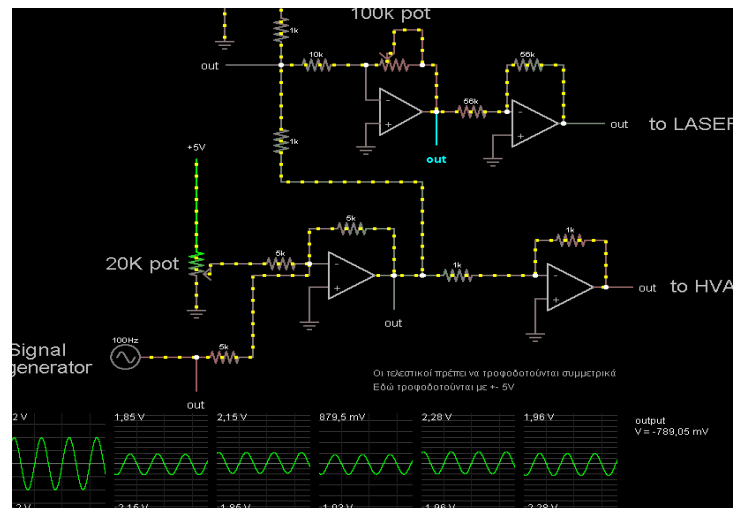
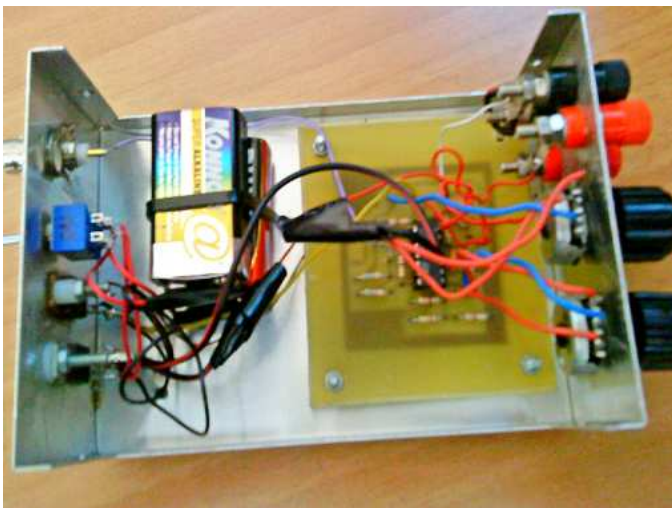




T.E.I ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ
ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κατασκευή ηλεκτρονικής συσκευής για το φασματικό
συντονισμό της εξόδου ενός Laser ημιαγωγού



Εισηγητής: Πετρίδης Κωνσταντίνος

ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ

Βασιλάκης Γεώργιος

Μπαλακτοής Αχιλλέας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

A) Εισαγωγή στην τεχνολογία Laser: 1) Ιστορία laser, 2) Αρχή λειτουργίας, 3) Κύριοι τύποι, 4) Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.

B) Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των ECDL (external cavity diode laser) :

Κεφάλαιο 1: Συστήματα για Laser Διόδου με Συντονιζόμενη Εξωτερική κοιλότητα

1.1 Οπτική ανάδραση σε διοδικά Laser εξωτερικής κοιλότητας

1.1.1 Γενικές επιδράσεις της εξωτερικής οπτικής ανάδρασης στα Laser διόδου.

1.1.1.1 Το μοντέλο κοιλότητας Laser τριών κατόπτρων

1.1.2 Εφαρμογή της οπτικής ανάδρασης

1.2 Φασματικά χαρακτηριστικά των ECDL

1.2.0.2 Συντονιστική ικανότητα μονού τρόπου

1.2.0.3 Εύρος συχνοτήτων

1.2.0.4 Εξάρτηση του μήκους κύματος από τη θερμοκρασία

1.3 Συστήματα συντονιζόμενων διοδικών laser με εξωτερική κοιλότητα

1.3.1 Διάταξη ECDL

1.3.2 Σχεδιασμός ECDL

1.3.3 Ευθυγράμμιση ECDL

1.3.3.1 Ρεύμα κατωφλιού

1.3.3.2 Ισχύς εξόδου

1.4 Γεωμετρία για καταστολή αναπήδησης τρόπου.

1.4.1 Διάταξη Littrow

1.4.2 Littman-Metcalf

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

A) Τρόποι συντονισμού ενός laser ECDL:

Κεφάλαιο 2: Εφαρμογή συντονιζόμενων διοδικών laser εξωτερικής κοιλότητας

2.1 ECDL συνεχώς συντονιζόμενα σε ευρεία περιοχή

2.1.1 Μηχανικός ευρύς συντονισμός

2.1.2 Μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό σύστημα ευρέος συντονισμού

2.2 Διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας με ηλεκτρονικό συντονισμό

2.2.1 Συντονισμός μήκους κύματος με ακουστοοπτικό διαμορφωτή

2.2.2 Ολίσηση συχνότητας με ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή

2.2.3 Ικανότητα συντονισμού μήκους κύματος με οθόνη υγρού κρυστάλλου

2.3 Διάφορα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας

2.3.1 Μπλέ-ιώδη διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας

2.3.2 Διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας υψηλής ισχύος

B) Συντονισμός με κλειδωμένο τρόπο ταλάντωσης πάνω από τα 80GHZ ενός laser ημιαγωγού εκτεταμένης κοιλότητας χωρίς επίστρωση αποφυγής ανακλάσεων.

Γ) Τεχνικός χαρακτηρισμός κατασκευής.

Δ) Datasheets.

Ε) Βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 1°

A) ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ LASER

Ο όρος λέιζερ προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) που αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας.

Τα λέιζερ παράγουν σύμφωνο, μονοχρωματικό φως (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος-χρώμα) το οποίο διαδίδεται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Αντίθετα οι συνηθισμένες πηγές φωτός, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, παράγουν μη-σύμφωνο φως προς όλες τις διευθύνσεις και επιπλέον έχουν μεγάλο φασματικό εύρος.

Η λειτουργία των λέιζερ ερμηνεύεται από την θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής. Πολλά υλικά έχουν βρεθεί ότι έχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των λέιζερ, με αποτέλεσμα την εφεύρεση πολλών τύπων λέιζερ με διαφορετικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

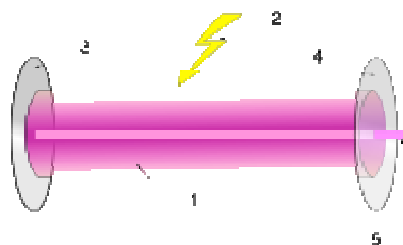
ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ LASER

Η υποκινημένη εκπομπή ή διαδικασία για τη δράση λέιζερ, προτάθηκε αρχικά από Αλβέρτο Einstein το 1917. Οι αρχές εργασίας των λέιζερ περιγράφηκαν από τους αμερικανούς φυσικούς Arthur Leonard Schawlow και Charles Hard Townes στους οποίους απονεμήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το έτος 1958 , που αμφισβητήθηκε από τον αμερικανό φυσικό και μηχανικό Gordon Gould. Το 1960 ο αμερικανός φυσικός Theodore Maiman παρατήρησε την πρώτη κίνηση λέιζερ στο στερεό ρουμπίνι. Ένα έτος αργότερα ένα λέιζερ αερίου ηλίου-νέου φτιάχτηκε από τον γεννημένο στο Ιράν αμερικανό φυσικό Ali Javan. Κατόπιν το 1966 ένα υγρό λέιζερ κατασκευάστηκε από τον επίσης αμερικανό φυσικό Peter Sorokin. Το δικαστήριο αμερικανικών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας το 1977, ενέκρινε μια από τις αξιώσεις του Gould που αφορούσε τις αρχές εργασίας του λέιζερ.

Αρχή λειτουργίας

Τα λέιζερ αποτελούνται από το ενεργό υλικό, και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Συνήθως είναι υλικό με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαρότητα και μορφή που παράγει φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής η οποία αποτελεί κβαντομηχανική διαδικασία που προτάθηκε από τον Αλβέρτο Αϊνστάιν για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το ενεργό υλικό αντλείται από μία εξωτερική πηγή ενέργειας. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι ηλεκτρικές ή φωτεινές, όπως η λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή λέιζερ. Η ενέργεια που απορροφάται, αποτίθεται στα σωματίδια του ενεργού υλικού έτσι ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μια διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Όταν ο αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων που βρίσκεται στην βασική κατάσταση, επιτυγχάνεται αντιστροφή πληθυσμού. Έτσι λοιπόν, μία δέσμη

φωτός που περνάει μέσα από το υλικό έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσει σε εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από ότι σε εξαναγκασμένη απορρόφηση, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ενίσχυση της δέσμης. Ένα διεγερμένο ενεργό υλικό μπορεί να λειτουργήσει επίσης και σαν [οπτικός ενισχυτής](#).



Αρχή λειτουργίας του Λείζερ:

1. Ενεργό υλικό του Λείζερ
2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης
3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο
4. Διάταξη εξόδου δέσμης
5. Δέσμη Λείζερ

Τα χαρακτηριστικά του φωτός που παράγονται από εξαναγκασμένη εκπομπή είναι παρόμοια με αυτά του αρχικού φωτός, ως προς το μήκος κύματος, την [πόλωση](#) και την [φάση](#). Έτσι λοιπόν, το φως του λέιζερ που παράγεται είναι σύμφωνο, ενώ η σταθερότητα της πόλωσης και η μονοχρωματικότητα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της [οπτικής κοιλότητας](#).

Η οπτική κοιλότητα αποτελεί παράδειγμα κοιλότητας ταλάντωσης και περιέχει μια σύμφωνη δέσμη φωτός μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών, έτσι ώστε κάθε φωτόνιο να περνά τουλάχιστον δύο φορές από το ενεργό υλικό προτού φύγει από την οπή εξόδου της πηγής λέιζερ ή χαθεί λόγω απορρόφησης ή [περίθλασης](#). Αν η ενίσχυση που προέρχεται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε εμφανίζεται [εκθετική](#) αύξηση της ισχύος του φωτός μέσα στην κοιλότητα. Όμως, κάθε εξαναγκασμένη εκπομπή αναγκάζει ένα σωματίδιο να επιστρέψει από την διεγερμένη κατάσταση στην βασική, μειώνοντας έτσι την ικανότητα του ενεργού υλικού για επιπλέον ενίσχυση. Όταν αυτό το φαινόμενο μεγιστοποιείται τότε λέμε ότι η ενίσχυση έχει φτάσει σε *κορεσμό*. Η συνθήκη όπου η ισχύς άντλησης γίνεται περίπου ίση με την τιμή κορεσμού της ενίσχυσης και με τις απώλειες της κοιλότητας οδηγεί σε κατάσταση ισορροπίας της ισχύος του λέιζερ μέσα στην κοιλότητα. Αυτή η τιμή ισορροπίας καθορίζει και το σημείο λειτουργίας του λέιζερ. Αν η ισχύς άντλησης είναι πολύ μικρή, η ενίσχυση δεν είναι αρκετή ώστε να καλυφθούν οι απώλειες του ταλαντωτή, με αποτέλεσμα να εκπέμπεται πολύ μικρή ένταση λέιζερ. Η ελάχιστη τιμή ισχύος άντλησης που απαιτείται για την παραγωγή λέιζερ ονομάζεται *κατώφλι λέιζερ*. Το ενεργό υλικό ενισχύει οποιοδήποτε φωτόνιο περάσει μέσα από αυτό, αλλά μόνο αυτά που είναι ευθυγραμμισμένα με την κοιλότητα μπορεί να περάσουν περισσότερο από μια φορά μέσα από το ενεργό υλικό για να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση.

Αν η δέσμη δημιουργείται και διαδίδεται σε ελεύθερο περιβάλλον και όχι μέσα σε κυματοδηγούς (όπως στην περίπτωση των [οπτικών ινών](#)), τότε η ένταση του φωτός εμφανίζει [κανονική \(Γκαουσιανή\) κατανομή](#), κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης της. Η δέσμη του λέιζερ είναι ιδιαίτερα ευθυγραμμισμένη, δηλαδή είναι παράλληλη και δεν αποκλίνει. Παρόλα αυτά τέλεια ευθυγραμμισμένη δέσμη δεν μπορεί να υπάρξει λόγω [περίθλασης](#). Για παράδειγμα, μια δέσμη με αρχική διάμετρο 2 mm, που δημιουργείται από ένα μικρό εργαστηριακό λέιζερ (όπως ένα [λέιζερ Ηλίου-Νέου](#)), αποκλίνει αποκτώντας διάμετρο 1,6 χιλιόμετρα, όταν διανύσει απόσταση ίση με αυτή της [γης-σελήνης](#). -

Κύριοι τύποι λέιζερ

Υπάρχουν διάφοροι κύριοι τύποι λέιζερ, που διαχωρίζονται ανάλογα με το υλικό το οποίο παράγει την ακτινοβολία. Οι τύποι αυτοί είναι

Στερεάς κατάστασης

Διακρίνονται σε *κρυστάλλου*, π.χ. YAG, Ruby, YVO, κ.τ.λ, τα οποία βρίσκονται σε μορφή δίσκου, ράβδου ή πλάκας. Και σε *γυαλιού*, π.χ. BK7, πυριτίου, κ.τ.λ, τα οποία βρίσκονται σε μορφή ίνας ή ράβδου.

Υγρών χρωστικών

Για παράδειγμα: Rhodamine 6G, Fluorescein, Coumarin, Stilbene, Umbelliferone, Tetracene, Malachite green, κ.τ.λ.

Αέριο χρωστικών

Διακρίνονται σε *ηλεκτρικά*: CO₂, N, Cu, Au και σε *χημικά*: O₂, I, H₂F. Μια συνήθης σύνθεση αερίων ενός ηλεκτρικού λέιζερ είναι: 10% CO₂, 10% N, 80% He.

Λέιζερ ημιαγωγών

Για παράδειγμα: GaAs, InP, GaSb, κ.τ.λ.

Θέματα υγείας

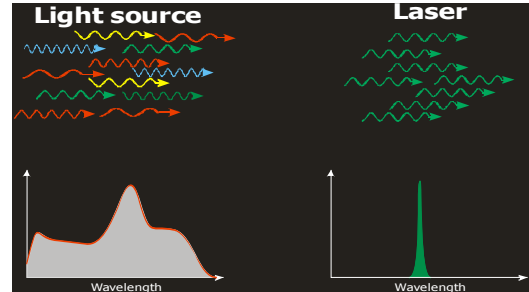
Σύμφωνα με τα πρότυπα [EN](#) 60825-1 και [ANSI](#) Z136.1, τα λέιζερ μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τη βλαπτικότητα τους ως εξής:

Κλάση Περιγραφή

- I Η ακτίνα δεν βλάπτει τα μάτια ή το δέρμα.
- IIM Η ακτίνα δεν βλάπτει τα μάτια ή το δέρμα, όταν δεν παρεμβάλλεται συγκεντρωτικός φακός ή άλλα οπτικά είδη.
Η ακτίνα δεν βλάβη τα μάτια ή το δέρμα όταν η έκθεση δεν ξεπερνάει τα 0,25 s. Η ακτίνα είναι ορατή στο γυμνό μάτι από τα 400 nm μέχρι τα 700 nm.
- IIM Όπως η Σειρά 2, όταν δεν παρεμβάλλεται συγκεντρωτικός φακός ή άλλα οπτικά είδη.
- IIIR Η ακτίνα βλάπτει τα μάτια.
- IIIB Η ακτίνα βλάπτει τα μάτια και μπορεί να βλάψει το δέρμα.
- IV Η ακτίνα είναι πολύ επικίνδυνη για τα μάτια και για το δέρμα, ακόμη και έπειτα από διάχυση σε επιφάνειες.

Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας laser

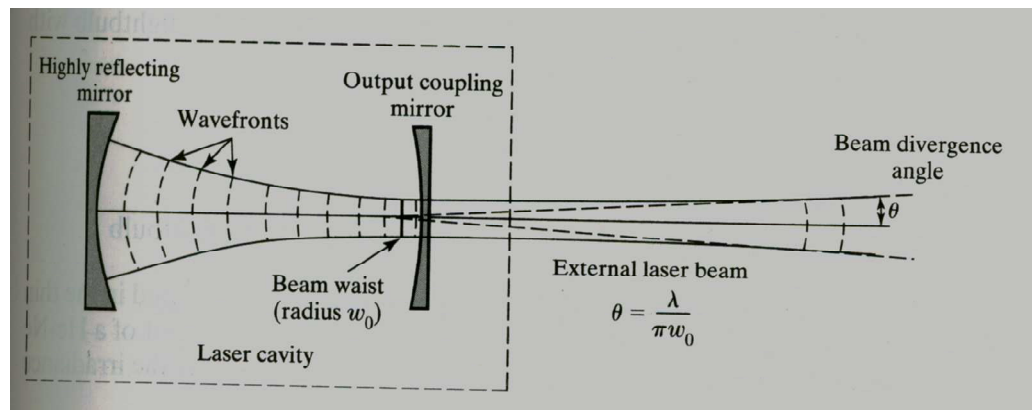
- (α) **Μονοχρωματικότητα**
Το ελάχιστο φασματικό εύρος μιας ακτινοβολίας laser είναι γνωστό ως όριο Schalow – Townes.



- (β) **Συμφωνία**
Το μήκος συμφωνίας μιας πηγής laser εκφράζει το μέγιστο μήκος μέσα στο οποίο διατηρείται η φάση του κύματος. Για το laser He-Ne το μήκος συμφωνίας είναι μερικά χιλιόμετρα.



Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας laser



B) Περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των ECDL (external cavity diode laser)

Συστήματα για Laser Διόδου με Συντονιζόμενη Εξωτερική κοιλότητα

Σε αυτό το κεφάλαιο, είμαστε σε θέση να εξετάσουμε το σύστημα Laser διόδου με εξωτερική κοιλότητα. Οι γενικές επιδράσεις της εξωτερικής οπτικής ανάδρασης στο Laser διόδου μελετούνται βάση του μοντέλου των 3 κατόπτρων, και στις περιπτώσεις της σταθερής και της δυναμικής κατάστασης με διάφορα ποσά ανάδρασης. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των ECDL παρουσιάζονται αναφορικά με την ισχύ εξόδου, την δυνατότητα συντονισμού σε μονό ρυθμό, το εύρος φάσματος, και την εξάρτηση του μήκους κύματος από την θερμοκρασία. Συστήματα Laser διόδου εξωτερικής κοιλότητας παρουσιάζονται σε διάφορους σχεδιασμούς της εξωτερικής κοιλότητας. Τέλος θα ασχοληθούμε με τις διαδικασίες ευθυγράμμισης για λειτουργία σε μονό ρυθμό και με τις τροποποιήσεις για την αποφυγή αλλαγής του τρόπου ταλάντωσης στα συστήματα Laser διόδου με εξωτερική κοιλότητα.

1.1 Οπτική ανάδραση σε διοδικά Laser εξωτερικής κοιλότητας

Η ευαισθησία της έντασης εξόδου ενός Laser διόδου στο πλάτος και στη φάση της εξωτερικής οπτικής αναδράσεως έχει καταγραφεί πλήρως [Eliseev et. Al. (1969), Salathe (1979), Glasser (1980), Olsson and Tang (1981), Liu et. al. (1984), Sivaprakasam et. al. (1996)]. Υπήρξε ουσιαστικό ενδιαφέρον για τα φασματικά χαρακτηριστικά της εκπομπής κάτω από την επίδραση διαφόρων πλατών εξωτερικών αναδράσεων, συμπεριλαμβανομένης της εισαγωγής στοιχείων σκέδασης εξωτερικής κοιλότητας. Οι επιδράσεις της οπτικής ανάδρασης στη συμπεριφορά του διοδικού Laser είναι πολύπλοκες και μελετήθηκαν στις αρχές του 1980 [Lang και Kobayashi (1980)]. Έχει δειχθεί ότι οι δυναμικές ιδιότητες των διοδικών Laser επηρεάζονται κατά μεγάλο βαθμό από την εξωτερική ανάδραση, ανάλογα με τις συνθήκες συμβολής μεταξύ του H/M πεδίου του Laser και του καθυστερημένου πεδίου (που επιστρέφει από την εξωτερική κοιλότητα). Η ουσία της οπτικής ανάδρασης είναι να αυξήσουμε τον παράγοντα ποιότητας (Q) του αντηχείου του Laser, και επομένως να στενέψουμε το φασματικό εύρος και να σταθεροποιήσουμε το μήκος κύματος του Laser.

Σε αυτήν την συχνότητα, επιτυγχάνουμε τις συνθήκες κατωφλιού και φάσης για Laser εξωτερικής κοιλότητας με τη χρήση του μοντέλου των τριών κατόπτρων στην περίπτωση σταθερής κατάστασης. Περαιτέρω επισημάνσεις για τις δυναμικές ιδιότητες του διοδικού Laser αναπτύσσονται στις γνωστές εξισώσεις των Lang-Kobayashi με απλή ή πολλαπλή ανάκλαση, και συναρτήσε με τις διαφορετικές περιπτώσεις μεγέθους ανακλαστικής ανάδρασης. Η λύση των εξισώσεων εξηγεί την ποικιλία των επιδράσεων της εξωτερικής ανάδρασης στις ιδιότητες των διοδικών Laser. Επίσης εισάγουμε διαφορετικά σχήματα εφαρμογής οπτικής ανάδρασης.

1.1.1 Γενικές επιδράσεις της εξωτερικής οπτικής ανάδρασης στα Laser διόδου.

Είναι γνωστό ότι η εξωτερική οπτική ανάδραση επηρεάζει κατά μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες των ημιαγωγικών Laser, το ανακλώμενο φως προς την κοιλότητα του Laser δημιουργεί διακυμάνσεις στο κατώφλι Laser, στην ισχύ εξόδου, και στο εύρος φάσματος της δέσμης [Olsson και Tang (1981)]. Τα περισσότερα από τα μοντέλα που έχουν σχέση με αυτά τα ζητήματα αγνοούν τις πολλαπλές ανακλάσεις στην εξωτερική κοιλότητα και απλά ενσωματώνουν την οπτική ανάδραση προσθέτοντας έναν όρο

καθυστερημένης χρονικά ανάδρασης στις κανονικές εξισώσεις του Laser [Lang και Kobayashi (1980), Hirota και Suematsu (1979)], μερικοί συμπεριλαμβάνουν τις πολλαπλές αντανάκλασεις ως εξάρτηση της ποσότητας της ανάδρασης. Εάν το Laser έχει αντανάκλαση επικάλυψη ($R_2 \ll R_3$ όπως φαίνεται στο Σχ.1.1), τότε χρειάζεται να ασχοληθούμε με μόνο μία διαδρομή επιστροφής από την εξωτερική κοιλότητα.

1.1.1.1 Το μοντέλο κοιλότητας Laser τριών κατόπτρων

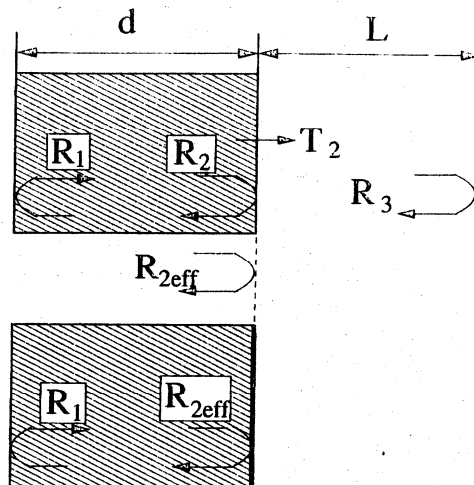
Το πλήρες μοντέλο του Laser διόδου με κοιλότητα Fabry-Perot με εξωτερική κοιλότητα βασίζεται στο μοντέλο των τριών κατόπτρων [Petemann (1988)] όπως φαίνεται στο Σχ.1.1. Τα M_1 , M_2 και M_3 υποδηλώνουν τις δύο επιφάνειες του laser F-P και το εξωτερικό κάτοπτρο, R_1 και R_2 είναι οι πραγματικοί αριθμοί της ανακλαστικότητας των κατόπτρων M_1 και M_2 , αντιστοίχως, και R_3 του εξωτερικού κατόπτρου, τα d και L είναι τα μήκη της κοιλότητας του Laser διόδου και της εξωτερικής κοιλότητας, αντιστοίχως. Η ανακλαστικότητα από το εξωτερικό κάτοπτρο M_3 μπορεί να συνδυαστεί με ανακλαστικότητα της εξωτερικής επιφάνειας M_2 του Laser, καταλήγοντας σε μία ενεργή ανακλαστικότητα \mathfrak{R}_2 , που επίσης φαίνεται στο Σχ.1.1. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται μια ισοδύναμη κοιλότητα δύο κατόπτρων η οποία αντικαθιστά το παθητικό τμήμα με ένα ενεργό κάτοπτρο με \mathfrak{R}_2 ανακλαστικότητα ισχύος. Αυτή η αντικατάσταση είναι αποδεκτή για ανάλυση σταθερής κατάστασης αλλά δεν ενδείκνυται για το μοντέλο δυναμικής λειτουργίας. Η ενεργός ανακλαστικότητα ισχύος δίδεται από

$$\mathfrak{R}_2 = \sqrt{R_2} + \frac{1-R_2}{\sqrt{R_2}} \sum_{k=1}^{\infty} [\sqrt{R_2 R_3} e^{-j\omega\tau_L}]^k, \quad (1.1)$$

Και με περαιτέρω απλοποίηση σε

$$\mathfrak{R}_2 = \sqrt{R_2} + \frac{R_3(1-R_2)e^{-j\phi_L}}{(1+\sqrt{R_2 R_3})e^{-j\omega\tau_L}} = R_{2eff} e^{-j\phi_L} \quad (1.2)$$

Όπου $\phi_L = \omega\tau_L$ και: ω η γωνιακή συχνότητα του Laser διόδου, τ_L είναι η καθυστέρηση στην εξωτερική κοιλότητα η οποία δίδεται από $\tau_L = 2L/c$, όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. R_{2eff} και ϕ_L είναι τα σύμβολα που αντιπροσωπεύουν την



Σχ.1.1 Laser εξωτερικής κοιλότητας και ισοδύναμη κοιλότητα με δραστικό κάτοπτρο για την αναπαράσταση του εξωτερικού τμήματος ανακλαστικότητα ισχύος και τη φάση της δραστικής ανακλαστικότητας \mathfrak{R}_2 , αντιστοίχως. Η συνθήκη κατωφλιού μπορεί να ξαναγραφεί με βάση την Εξ.(2.14)

$$\sqrt{R_1 R_{2eff}} e^{2(\Gamma_g - \alpha)d_e - j(\phi + \phi_L)} = 1 \quad (1.3)$$

Μετά, οι συνθήκες κέρδους και φάσης μπορούν να υπολογιστούν αντικαθιστώντας την R_2 με \mathfrak{R}_2 ,

$$\Gamma_g = a + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_{2eff}}}, \quad (1.4)$$

και

$$\phi = 2\pi q - \phi_L \quad (1.5)$$

Όποιες απώλειες εμφανίζονται στο εξωτερικό κάτοπτρο περιλαμβάνονται στην R_{2eff} .

1.1.1.1 Οι τρόποι ταλάντωσης της εξωτερικής κοιλότητας

Με απουσία ανάδρασης, η Εξ.(1.5) για κοιλότητα ενός Laser διόδου F-P γράφεται ως:

$$\phi = 2\pi q \quad (1.6)$$

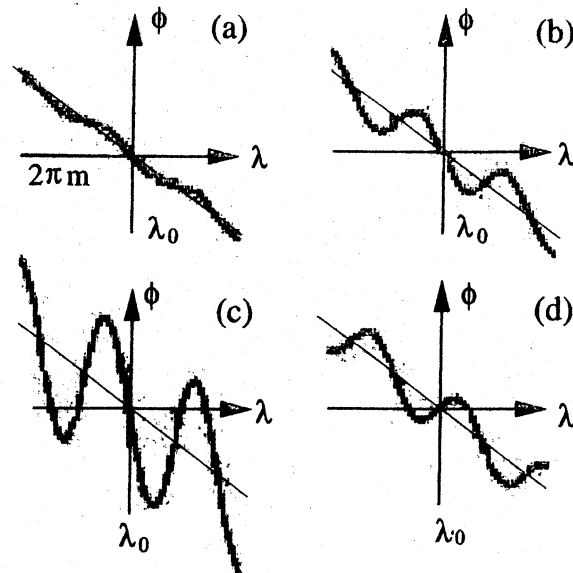
Θεωρούμε ένα Laser μοναδικού ρυθμού ταλάντωσης ο οποίος χαρακτηρίζεται από τον ακέραιο αριθμό q_0 με μήκος κύματος $\lambda_0 = 2nd / q_0$. Για μικρή απόκλιση στο μήκος κύματος σε λ από το λ_0 , το ϕ είναι μία γραμμικά αυξανόμενη συνάρτηση του λ , η οποία δίδεται από

$$\phi = 2\pi q_0 - 4\pi nd(\lambda - \lambda_0) / \lambda_0^2 \quad (1.7)$$

Όταν η ανάδραση είναι παρούσα, ο τρόπος ταλάντωσης της κοιλότητας των 3 κατόπτρων πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα και την εξίσωση (5.5), αλλά το ϕ δεν είναι πια μία γραμμική συνάρτηση του λ . Γενικά η συνθήκη φάσεως έχει πολλαπλές λύσεις για συγκεκριμένους συνδυασμούς του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας L και του συντελεστή εξωτερικής ανάκλασης R_3 . Αυτό επιδεικνύεται με τα διαγράμματα του ϕ ως συνάρτηση του λ για αυξανόμενα επίπεδα ανάδρασης στο Σχ.(1.2).

Γενικά, εάν η R_3 είναι μικρότερη από κάποια τιμή, τότε η $\phi(\lambda)$ θα μειώνεται μονότονα και το Laser θα παραμείνει σε κατάσταση μονού ρυθμού ταλάντωσης ανεξάρτητα από την φάση της ανάδρασης. Για μεγάλες τιμές ανάδρασης, η $\phi(\lambda)$ δεν μειώνεται πια μονότονα και το Laser θα επιδείξει πολλαπλούς τρόπους ταλάντωσης εξωτερικής κοιλότητας για τουλάχιστον κάποιες τιμές της φάσης ανάδρασης. Τελικά, για την R_3 μεγαλύτερη από την δεύτερη τιμή για την οποία ένα ελάχιστο στην $\phi(\lambda)$ είναι χαμηλότερο από τα επόμενα δύο συνεχόμενα μέγιστα, όπως φαίνεται στο Σχ.1.2(c), το

laser θα είναι σε κατάσταση λειτουργίας πολλαπλών τρόπων ταλάντωσης ανεξάρτητα από τη φάση της ανάδρασης. Επομένως μία εξωτερική κοιλότητα ή etalon μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το φιλτράρισμα των ανεπιθύμητων τρόπων ταλάντωσης.



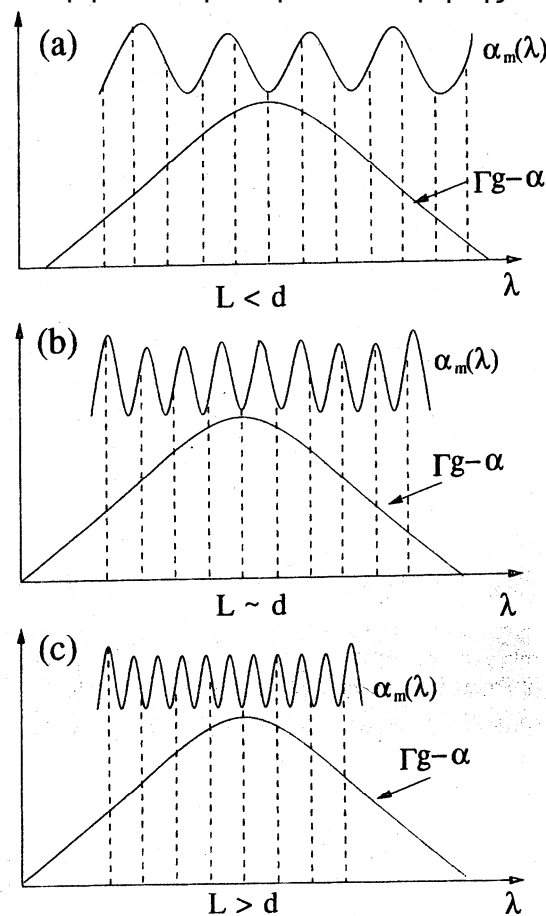
Σχ.1.2 Εξάρτηση μήκους κύματος της μετατόπισης φάσης της διαδρομής επιστροφής στην εξωτερική κοιλότητα του Laser σχεδιασμένη για διαφορετικά επίπεδα ανάδρασης: (a) ασθενής ανάδραση, λειτουργία μονού τρόπου. (b) ενδιάμεση ανάδραση, λειτουργία μονού τρόπου. (c) δυνατή ανάδραση, λειτουργία πολλαπλών τρόπων ταλάντωσης εξωτερικής κοιλότητας. Στο (d), το επίπεδο ανάδρασης είναι το ίδιο με το (b), αλλά η φάση στην εξωτερική κοιλότητα είναι μετατοπισμένη κατά π ακτίνια για να έχουμε λειτουργία πολλαπλών τρόπων. Στα (a)-(d) η στενή γραμμή ανταποκρίνεται στην απουσία ανάδρασης ($R_3=0$).

Το Σχ.1.3 δείχνει πως το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας καθορίζει την επιλογή των τρόπων ταλάντωσης για τις τρεις περιπτώσεις (a) $L < d$ (b) $L \sim d$, και (c) $L > d$. Παρουσιάζει τις διακυμάνσεις της κατοπτρικής απώλειας α_m , και την καμπύλη γενικού καθαρού κέρδους $\Gamma_g - \alpha$ σε σχέση με το μήκος κύματος μαζί με ενδείξεις των θέσεων των τρόπων ταλάντωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μέγιστα στην R_{2eff} ανταποκρίνονται στα ελάχιστα στην α_m .

Στο Σχ.1.3(a), η εξωτερική κοιλότητα είναι κάπως μικρότερη σε μήκος από την δίοδο laser, οι τρόποι ταλάντωσης της κοιλότητας του διοδικού Laser θα είναι τοποθετημένοι πιο κοντά μεταξύ τους από ότι τα ελάχιστα στο α_m . Σε αυτή τη περίπτωση ένα ελάχιστο απώλειας μπορεί να επιλέξει αποτελεσματικά ένα τρόπο μονοαξονικής ταλάντωσης εάν το α_m κυμανθεί αρκετά. Εάν τα μήκη της δίοδου Laser και της κοιλότητας είναι συγκρίσιμα όπως φαίνεται στο Σχ.1.3(b), οι συντονισμοί αμφοτέρων των κοιλοτήτων απέχουν αναμεταξύ τους περίπου ανά ίσες αποστάσεις, και

οι ενεργοί τρόποι ταλάντωσης θα είναι σχεδόν απέναντι από τα ελάχιστα του α_m δίνοντας μία συμπεριφορά παρόμοια με τα φαινόμενα vernier. Σχετικά καλή καταστολή τρόπου είναι δυνατή εάν η περίοδος δεν είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή. Στην τρίτη περίπτωση του Σχ.1.3(c), η καλή καταστολή τρόπου ταλάντωσης γενικά δεν είναι επιτεύξιμη εκτός αν το κάτοπτρο της εξωτερικής κοιλότητας είναι φίλτρο από μόνο του. Στη πραγματικότητα ένα φράγμα περίθλασης χρησιμοποιείται ευρέως για την επιλογή μονού τρόπου ταλάντωσης στα Laser διόδου με εξωτερική κοιλότητα μεγάλων μηκών.

Έχει μελετηθεί επίδραση της οπτικής ανάδρασης στις ιδιότητες των διοδικών Laser με μήκη εξωτερικής κοιλότητας κυμαινόμενα στα 1-2cm. Τα πειράματα έχουν δείξει την περιοδική μεταβολή στην ισχύ εξόδου, την μεταβολή στο φάσμα συχνοτήτων με την απόσταση του κατόπτρου, και το DC ρεύμα διέγερσης, το οποίο προέρχεται από την αλλαγή στις συνθήκες αλληλεπίδρασης στη σύνθετη κοιλότητα του Laser. Έχει επίσης βρεθεί ότι η εξωτερική οπτική ανάδραση μπορεί να φέρει το Laser σε κατάσταση πολλαπλών σταδίων και να εμφανίσει φαινόμενα υστέρησης.



Σχ.1.3 Σχηματική αναπαράσταση του καθαρού κέρδους διάδοσης $\Gamma_g - \alpha$, και της καθαρής απώλειας κατόπτρου α_m ως συνάρτηση του μήκους κύματος για εξωτερικές κοιλότητες, (a) $L < d$ (b) $L \sim d$ (c) $L > d$.

1.1.1.1 Δυναμικές ιδιότητες

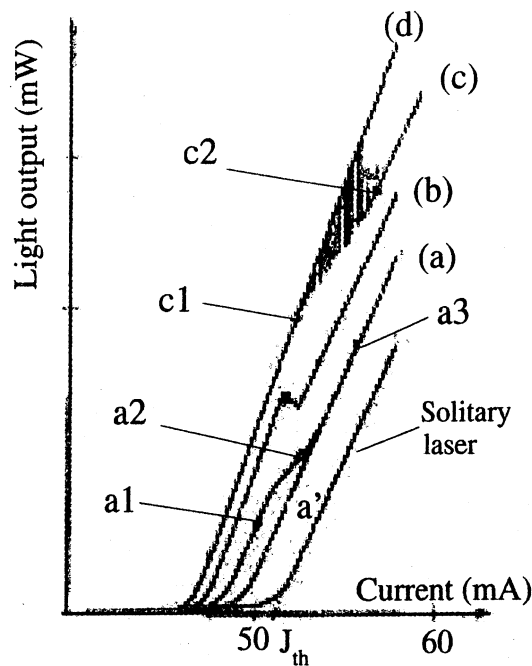
Κάποιες γνώσεις των δυναμικών ιδιοτήτων των ημιαγωγικών Laser διέγερσης μπορούν να επιτευχθούν από τα χαρακτηριστικά της ισχύος φωτός σε σχέση με το ρεύμα του laser διόδου στις διατάξεις εξωτερικής κοιλότητας. Βρέθηκε ότι μικρές μεταβολές στις πειραματικές συνθήκες μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στις

καμπύλες L-I, και συγκεκριμένα στην περιοχή του κατωφλίου. Το Σχ.1.4 δείχνει πέντε τυπικές περιπτώσεις με $L=30\text{cm}$, με την χαρακτηριστική καμπύλη χωρίς ανάδραση να είναι σχεδιασμένη για σύγκριση και για γρήγορο υπολογισμό των επιπέδων ανάδρασης. Κάθε μία από τις καμπύλες L-I (c) και (d) ανταποκρίνεται σε μία κατάσταση βέλτιστης ανάδρασης, και οι καμπύλες (a) και (b) ανταποκρίνονται στην κατάσταση μη ικανοποιητικής ευθυγράμμισης. Οι καμπύλες (c) και (d) επιδεικνύουν την έντονη εξάρτηση του συστήματος από τις ακριβείς πειραματικές συνθήκες. Για χαμηλά ρεύματα διέγερσης οι δύο καμπύλες ακολουθούν μία πανομοιότυπη τροχιά που μας θυμίζει φαινόμενα σύμφωνης ανάδρασης, και διαχωρίζονται σε δύο διαφορετικούς κλάδους για ρεύματα μεγαλύτερα από τα ρεύματα κατωφλίου του φαινομένου laser. Στον επάνω κλάδο [καμπύλη (d)], ένταση εξόδου παραμένει σταθερή κατά μήκος ολόκληρης της καμπύλης, ενώ παίρνει τη μορφή ενισχυμένου θορύβου πέρα από τις περιοχές μεταβάσεων c1-c2 της καμπύλης (c).

Οι καμπύλες L-I (b) και (c) έχουν εξαχθεί με φτωχή ευθυγράμμιση, και οι ιδιότητες τους περιληπτικά είναι οι παρακάτω: i) Η φύση της σύνθετης κοιλότητας του συστήματος κυριαρχεί ακόμη και κάτω από το κατώφλι, και έχουμε λιγότερη ανάδραση στη ενεργό περιοχή, εξαιτίας του χαμηλότερου Q της εξωτερικής κοιλότητας σε σύγκριση με την περίπτωση της τέλει ευθυγράμμισης ii) Όταν το ρεύμα διέγερσης αυξάνεται με ακριβή γεωμετρία εξωτερικής κοιλότητας, τότε παρατηρείται η ομαλή πτύχωση στην περιοχή του κατωφλίου του Laser [καμπύλη (a)]. Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις η πτύχωση δεν εμφανίζεται ενώ αυξάνεται η μέση ισχύς εξόδου [καμπύλη (a')].

Τα φαινόμενα που περιγράφονται παραπάνω μπορούν να εξηγηθούν με την γνωστή εξίσωση ρυθμού του Lang Kobayashi, η οποία καθορίζει τις δυναμικές ιδιότητες ενός laser εξωτερικής κοιλότητας,

$$\frac{dE(t)}{dt} = i\omega_0 + \frac{\Delta G}{2}(1 + i\kappa)E(t) + \xi E(t - \tau) \quad (1.8)$$



Σχ.1.4 Διάφορες χαρακτηριστικές εξόδου φωτός σε σχέση με το ρεύμα δημιουργημένες με μικρές αλλαγές στη διάταξη οπτικής ανάδρασης.

και

$$\frac{dN(t)}{dt} = j_0 - \frac{N(t)}{\tau} - G(N)|E(t)|^2, \quad (1.9)$$

στο οποίο το $G(N)$ είναι ανάλογο προς την διαφορά μεταξύ του πραγματικού κέρδους και του κέρδους σε κατάσταση διαφάνειας:

$$G(N) = (N - N_0)\Gamma G_N. \quad (1.10)$$

Το καθαρό κέρδος

$$\Delta G(N) = G(N) - \frac{1}{\tau_p}, \quad (1.11)$$

εξαρτάται από το ποσοστό απώλειας $1/\tau_p$ της κοιλότητας, τον συντελεστή γραμμικού κέρδους του υλικού $G(N)$ και την πυκνότητα φορέων N , ενώ Γ είναι ο παράγων γομίσματος, ξ είναι το πλάτος της ανάδρασης, το οποίο δίδεται από

$$\xi = \frac{1 - R_3}{\tau_L} (R_2 / R_3), \quad (1.12)$$

όπου τ_L είναι ο χρόνος πλήρους διαδρομής στην κοιλότητα του laser. τ είναι ο χρόνος ζωής του φορέα, J είναι το ρεύμα εισροής, ω_0 είναι η συχνότητα του laser στο κατώφλι απουσία ανάκλασης, κ ο συντελεστής σύζευξης φάσης. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις εξισώσεις συντάσσονται στον πίνακα 1.1

Πίνακας 1.1 Παράμετροι για την έκφραση των επιδράσεων της ανάδρασης εξωτερικής κοιλότητας

Παράμετροι	Έκφραση	Τυπικές τιμές
Μήκος κοιλότητας	d	300~500 μm
Πλάτος ενεργού ζώνης	w	~5μm
Πάχος ενεργού ζώνης	t	~0.1μm
Δείκτης περίθλασης	n	3.5
Ανακλαστικότητα στις τερματικές επιφάνειες του laser	$R_1 = R_2 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$	0.31
Πληρής χρόνος διαδρομής	$\tau_L = \frac{2L}{c}$	~ns
Χρόνος ζωής φωτονίων	τ_p	~2ps
Χρόνος ζωής φέροντος	τ	ps~ns
Παράγων εγκλεισμού	Γ	0.25
Πυκνότητα φέροντος σε διαφάνεια	N_0	~1·10 ²⁴ /m ³

Πυκνότητα φέροντος στο κατώφλι	N_{th}	$\sim 2 \cdot 10^{24}/m^3$
Διαφορικό κέρδος	$G_N = \left(\frac{\partial G}{\partial N} \right)_{N = N_0}$	$\sim 3 \cdot 10^{-12} m^3 s^{-1}$
Συντελεστής συμπίεσης κέρδους	e^{NL}	$\sim 2.5 \cdot 10^{-17} m^3$

Το πεδίο μπορεί να γραφεί ως

$$E(t) \sim \varepsilon(t) \exp[j(\omega t + \phi(t))], \quad (1.13)$$

και η οπτική ένταση $I(t) = \varepsilon^2(t)$. Οι εξ.(1.8) και (1.9) συμπεριλαμβάνουν μόνο έναν όρο ανάδρασης, και επομένως είναι ακριβείς με τον περιορισμό να είναι περίπτωση ασθενούς ανάδρασης, δηλ. $\xi_{TL} \ll 1$. Η συνεισφορά των συνεισφορών πολλαπλής ανάδρασης μας δίνει τις βελτιωμένες εξισώσεις ρυθμού:

$$\frac{dI(t)}{dt} = g(N(t) - N_{th})I(t) - e^{NL} g(N(t) - N_0)I^2(t) + \frac{2}{\tau_L} \text{Re}[\ln(f)]I(t) + \beta \frac{N(t)}{\tau} + F_I(t), \quad (1.14)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \omega_0 - \omega + \frac{\kappa}{2} g(N(t) - N_{th}) + \frac{1}{\tau_L} \text{Im}[\ln(f)]I(t) + F_\phi(t), \quad (1.15)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = J - \frac{N(t)}{\tau} - g(N(t) - N_0)I(t) + e^{NL} g(N(t) - N_0)I^2(t) + F_N(t), \quad (1.16)$$

οι οποίες είναι αποδεκτές για αυθαίρετα επίπεδα ανάδρασης. G είναι ΓG_N , F_N, F_I, F_ϕ είναι οι όροι θορύβου Langevin, το $e^{NL} g(N(t) - N_0)I^2(t)$ περιγράφει το φαινόμενο κορεσμού. Ο συντελεστής σύζευξης f είναι ένα άθροισμα όλων των όρων ανάδρασης και μπορεί να γραφεί ως

$$f = 1 + \sqrt{1 - R_2} \frac{\sqrt{R_3}}{R_2} \sum_{p=1}^{\infty} (-\sqrt{R_3 R_2})^{p-1} R_{eff}(p) \frac{\sqrt{I(t - p\tau)}}{I(t)} e^{j\theta^p(t) - p\psi}, \quad (1.17)$$

όπου $\psi = \omega\tau$ είναι η αλλαγή φάσης στην εξωτερική κοιλότητα και $\theta^p(t) = \phi(t - p\tau) - \phi(t)$. $R_{eff}(p)$ είναι η δραστική ανακλαστικότητα για την p -οστή δέσμη επιστροφής.

Αυτό το σύνολο των εξ.(1.14)~(1.16) ήταν το θέμα των εκτεταμένων μελετών στη συμπεριφορά ισχυρώς ασυμμετρικών laser εξωτερικών ημιαγωγών. Οι αριθμητικές λύσεις δίνουν ένα θορυβώδες ίχνος χρόνου, για τον οποίο έχει προταθεί συσχετισμός με την λεγόμενη κατάρρευση συνεκτικότητας. Τα περισσότερα από τα διάφορα φαινόμενα των πειραματικών εργασιών φαίνονται να περιλαμβάνονται σε αυτές τις εξισώσεις χάριν της υστερητικής φύσεως του όρου αναδράσεως ο οποίος αποδίδει το σύστημα απείρως υψηλών διαστάσεων. Η κατάρρευση συνεκτικότητας, οι διακυμάνσεις έντασης χαμηλής συχνότητας, οι διαλείψεις θορύβου, και οι αυτοταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας της έντασης με πολλαπλούς όρους καθυστέρησης, έχουν μελετηθεί μετά

από εκτεταμένους αριθμητικούς υπολογισμούς οι οποίοι βασίζονται σε διάφορες τιμές των παραμέτρων ελέγχου του συστήματος.

1.1.2 Εφαρμογή της οπτικής ανάδρασης

Γενικά , η μη ελεγχόμενη οπτική ανάδραση στο σχεδιασμό συστημάτων διοδικών laser με εξωτερική κοιλότητα είναι ανεπιθύμητη. Υπάρχουν μερικοί τρόποι για την πραγματοποίηση της οπτικής ανάδρασης όπως ακολούθως

i) Χρησιμοποιώντας απλά οπτικά στοιχεία, όπως κάτοπτρα για την ανατροφοδότηση μέρους της ισχύος εξόδου πίσω στη δίοδο του laser, η εξωτερική επιφάνεια της δίοδου και τα εξωτερικά οπτικά στοιχεία απαρτίζουν έναν ενιαίο ταλαντωτή όπως φαίνεται στο Σχ1.1. Έχουν περιγραφεί οι αλλαγές που προκαλούνται από την οπτική ανάδραση στα φάσματα εξόδου διαφόρων laser GaAlAs σε περιοχή λειτουργίας στα 830 nm .Η ακτινοβολία ανάδρασης που παραλαμβάνεται από κάτοπτρο τοποθετημένο 60 cm από το laser ελέγχεται ως προς την ένταση και ως προς τη φάση του. Το στένεμα ή η αραίωση των φασματικών γραμμών σε κάθε laser σε εξαρτάται από τις συνθήκες ανάδρασης. Το ελάχιστο φασματικό εύρος εκπομπής με ανάδραση είναι μικρότερο από 100KHz. Βελτιωμένη σταθερότητα του μήκους κύματος επίσης επιτυγχάνεται με οπτική ανάδραση με αποτέλεσμα 15dB λιγότερο φασικό θόρυβο. Ένα αναλυτικό μοντέλο για την κοιλότητα τριών κατόπτρων έχει αναπτυχθεί για την εξήγηση αυτών των παρατηρήσεων. Έχει αναλυθεί η επίπτωση της οπτικής ανάδρασης στο φάσμα συχνοτήτων του laser και στο κέρδος κατωφλιού, συμπεριλαμβάνοντας τις πολλαπλές ανακλάσεις. Έχει επιδειχθεί η πρώτη συστηματική μελέτη της επίδρασης της ασυμμετρίας της ανάδρασης, η οποία καθορίζεται από την ατελή ευθυγράμμιση του εξωτερικού κατόπτρου όπως ενός κεκλιμένου κατόπτρου, στις χαρακτηριστικές των ημιαγωγικών laser εξωτερικής κοιλότητας.

ii) Εφαρμόζοντας ασθενή οπτική σύζευξη της εξόδου του laser με οπτικό αντηχείο υψηλού Q. Με την οπτική γεωμετρία, το laser οπτικά κλειδώνεται στο συντονισμό μίας ξεχωριστής κοιλότητας αναφοράς Fabry-Perot, η μέθοδος εξαρτάται από την ύπαρξη οπτικής ανάδρασης μόνο στον συντονισμό μίας κοιλότητας αναφοράς υψηλού Q , και χρησιμοποιείται για την σταθεροποίηση των συχνοτήτων του laser, και επομένως για τη μείωση του εύρους της φασματικής καμπύλης συχνοτήτων δια 1000 από 20MHz σε περίπου 20kHz. Μία ομοεστιακή κοιλότητα Fabry-Perot (CFP) χρησιμοποιείται για την ανατροφοδότηση της δέσμης από την δίοδο laser και παρέχει ταυτόχρονα σταθεροποίηση οπτικού συντονισμού του διοδικού laser. Η επιλογή μίας ομοεστιακής κοιλότητας εξυπηρετεί κατά μεγάλο βαθμό τη σύζευξη του τρόπου ταλάντωσης της δίοδου laser στο CFP. Το CFP είναι κεκλιμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ως μία διάταξη τεσσάρων πυλών η οποία αναιρεί τη δέσμη ανάκλασης, αλλά διατηρεί την παροχή οπτικής ανάδρασης στο laser από τη δέσμη εκπομπής. Επιδεικνύεται πειραματικά ότι επιτυγχάνεται μείωση 50~60dB στο θόρυβο στατικών συχνοτήτων και μία δραματική μείωση του φασματικού εύρους συχνοτήτων από 20MHz σε λιγότερο από 4kHz.

iii) Χρησιμοποιώντας την αντανάκλαση (Anti Reflection-AR) επάνω στο chip του laser και μερικά εξωτερικά οπτικά στοιχεία για την παροχή του αντηχείου laser, τα εξωτερικά οπτικά στοιχεία μπορούν να περιέχουν στοιχεία επιλογής συχνοτήτων όπως φράγματα περίθλασης και-ή έταλον. Για ανάδραση που γίνεται χρήση φράγματος περίθλασης 0 με laser δίοδου με επικάλυψη AR ($R_2 \ll R_3$), η Εξ.(1.2) μπορεί να απλοποιηθεί σε απλή ανάκλαση δρόμου επιστροφής, η οποία δίδεται από

$$\mathfrak{R}_2 = \sqrt{R_2} + (1 - R_2)\sqrt{R_3(\omega)}e^{-j2\omega L/c}, \quad (1.18)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα του Laser δίοδου, $R_3(\omega)$ είναι η μετάδοση ισχύος του δρόμου επιστροφής της μονόπλευρης εξωτερικής κοιλότητας, έχει μέγιστο στη συχνότητα Littrow ω_0 , δηλ. στη συχνότητα η οποία αντανακλάται προς τα πίσω από το φράγμα περίθλασης. Ενώ το ω αποκλίνει από την ω_0 , η σύζευξη από το φράγμα περίθλασης έως τον χώρο ταλάντωσης ακριβώς έξω από την επιφάνεια του laser γίνεται προοδευτικά μικρότερη. Επομένως η ανακλαστικότητα φάσματος \mathfrak{R}_2 αλλάζει από R_2 μονάχα κοντά στη συχνότητα Littrow. Η συνθήκη κατωφλιού μετά από μία κυκλική διαδρομή μέσα στο αντηχείο του διοδικού laser μπορεί επομένως να γραφεί ως

$$\sqrt{R_1 R_{2eff}} e^{2[g(\omega)-\alpha]d} e^{-j2n(\omega)\omega d/c} = 1, \quad (1.19)$$

όπου $g(\omega)$ είναι το κέρδος ανά τρόπο ταλάντωσης του ημιαγωγού μέσου, α είναι η κατανεμημένη απώλεια ανά τρόπο ταλάντωσης, και d είναι το μήκος του.

Οι απαιτήσεις για το κέρδος τρόπου στο κατώφλι και οι σύνθετες συχνότητες ταλάντωσης της κοιλότητας γίνονται τότε

$$g(\omega) = \alpha + \frac{1}{2d} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_{2eff}}}, \quad (1.20)$$

και

$$2\pi q = 2n(\omega)\omega d / c + \Phi, \quad (1.21)$$

όπου

$$\Phi = \text{Arg}(R_{2eff}) = \arctan \left[\frac{(1 - R_2)\sqrt{R_3(\omega)} \sin(2\omega L / c)}{\sqrt{2} + (1 - R_2)\sqrt{R_3(\omega)} \cos(2\omega L / c)} \right], \quad (1.22)$$

ικανοποιείται για μία ομάδα συχνοτήτων (όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο τμήμα) η οποία στοιβάζεται κοντά στον επιλεγμένο από το φράγμα περίθλασης διαμήκη τρόπο ταλάντωσης του laser δίοδου, με τις αναμεταξύ αποστάσεις των ρυθμών αυτών να είναι κατά προσέγγιση $\pi L/c$. Το κατώφλι που ανταποκρίνεται σε αυτούς τους τρόπους κυμαίνεται. Γενικά θα υπάρχει ένας τρόπος ταλάντωσης ο οποίος ανταποκρίνεται στενά σε εποικοδομητική παρεμβολή από την εξωτερική κοιλότητα εάν ο αριθμός των λύσεων της Εξ.(1.21) στην περιοχή του κάθε τρόπου του απομονωμένου laser δίοδου, είναι αρκετά μεγάλος.

Στην περίπτωση της εποικοδομητικής παρεμβολής στην $\omega=\omega_0$, οι απαιτήσεις κέρδους ελαχιστοποιούνται, και η Εξ(1.20) γίνεται

$$g(\omega_0) = \alpha + \frac{1}{2d} \ln \left[\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2} + (1 - R_2)\sqrt{R_3(\omega)}} \right], \quad (1.23)$$

Εάν το κέρδος της κυκλικής διαδρομής φτάσει πρώτα τη μονάδα στην συντονισμένη συχνότητα ω_0 , το σύνθετο laser δίοδου θα ενεργοποιηθεί στην ανταποκρινόμενη ενέργεια φωτονίων. Η περιοχή συντονισμού καθορίζεται τότε από την ομαλότητα του φάσματος κέρδους σε σχέση με το ποσό ανάδρασης από το φράγμα περίθλασης. Εάν η αλλαγή στο κέρδος είναι μικρή κατά μήκος πλατιάς φασματικής περιοχής, τότε είναι δυνατός ο ευρυζωνικός συντονισμός ακόμη και με μικρό ποσό εξωτερικής ανάδρασης.

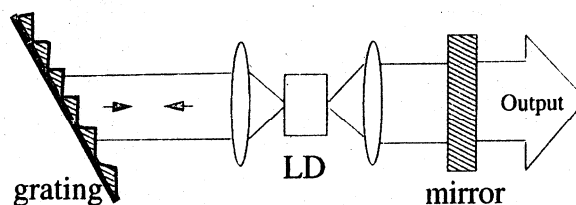
(iv) Συνδυάζοντας δύο διαφορετικές αντιλήψεις διοδικού laser: το διοδικό laser με (a) ανάδραση από φράγμα περίθλασης και (b) συντονιζόμενη οπτική ανάδραση από μία ξέχωρη κοιλότητα. Η νέα αντίληψη είναι ο συνδυασμός της άριστης ικανότητας συντονισμού και της γνωστής αξιοπιστίας διοδικών laser φράγματος περίθλασης με συντονιζόμενη οπτική ανάδραση. Το πείραμα βασίζεται σε ένα laser διόδου με επικάλυψη AR και εκπομπή σε μήκος κύματος 852 nm. Τα αποτελέσματα που παραλήφθηκαν είναι μία συνολική περιοχή συντονισμού των 36.4 nm, μία συνεχόμενη περιοχή συντονισμού των 45.1 GHz, και μία στενή περιοχή συχνοτήτων κάτω από τα 60 kHz.

1.2 Φασματικά χαρακτηριστικά των ECDL

Στο κεφάλαιο 2, έχουμε να συναντήσουμε τα φασματικά χαρακτηριστικά του διοδικού laser. Γενικά, το μήκος κύματος της εκπομπής ενός διοδικού laser δεν μπορεί να ελεγχθεί πλήρως, μία τυπική συσκευή μπορεί να λειτουργεί σε πολλούς ρυθμούς με ανταγωνισμό μεταξύ τους και αναπηδήσεις. Επιπλέον, οι διακυμάνσεις του ρεύματος διάχυσης σε ένα διοδικό laser προκαλεί μεταβολές στη συχνότητα στην ισχύ εξόδου, και στην κατανομή ισχύος στους διάφορους ρυθμούς ενός πολυτροπικού laser. Όπως περιγράψαμε στα προηγούμενα τμήματα, το laser εξωτερικής κοιλότητας με ανάδραση λειτουργεί σε μονό τρόπο με φάσμα συχνοτήτων σημαντικά στενότερο από ότι αυτό μίας απομονωμένης διόδου laser. Η εισαγωγή ενός σκεδαστικού στοιχείου στη διάταξη της εξωτερικής κοιλότητας μας επιτρέπει την επιλογή και τον συντονισμό μήκους κύματος εκπομπής με εξωτερικό έλεγχο, χωρίς περιπλοκές σχετικά με τη διακύμανση του επιπέδου τροφοδοσίας.

Ακολουθώντας, ασχολούμαστε με τα κύρια χαρακτηριστικά του διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας όπως η ισχύς εξόδου, η δυνατότητα συντονισμού σε μονό ρυθμό λειτουργίας, το εύρος φάσματος, και ο βαθμός εξάρτησης της συχνότητας από τη θερμοκρασία του laser διόδου.

Η διάταξη του laser εξωτερικής κοιλότητας απεικονίζεται στο Σχ 1.5. Για μέγιστη περίθλαση από το φράγμα περίθλασης, το laser διόδου πρέπει να είναι τοποθετημένο με το επίπεδο της επαφής p-n παράλληλο προς τις γραμμές του φράγματος περίθλασης. Ο αριστερός φακός συλλέγει την ακτινοβολία της διόδου και την εστιάζει επάνω στο φράγμα περίθλασης, η οποία στερεώνεται υπό την διάταξη Littrow, μέσω της οποίας η περιθλώμενη δέσμη πρώτης τάξεως αντανακλάται στην ίδια κατεύθυνση με την δέσμη πρόσπτωσης και επιστρέφει στην αριστερή επιφάνεια της διόδου. Η ακτινοβολία από την δεξιά επιφάνεια συγκεντρώνεται επάνω στον ζεύκτη εξόδου, ένα επικαλυμμένο με διηλεκτρικό, μερικώς ανακλαστικό επίπεδο κάτοπτρο.



Σχ.1.5 Σχηματικό διάγραμμα διοδικού laser δύο επιφανειών με εξωτερική κοιλότητα. Υιοθετημένο κατόπιν αδείας της *IEEE J.Quantum Electron QE-17*, 1, pp. 44-59. Fleming και Mooradian (1981) .

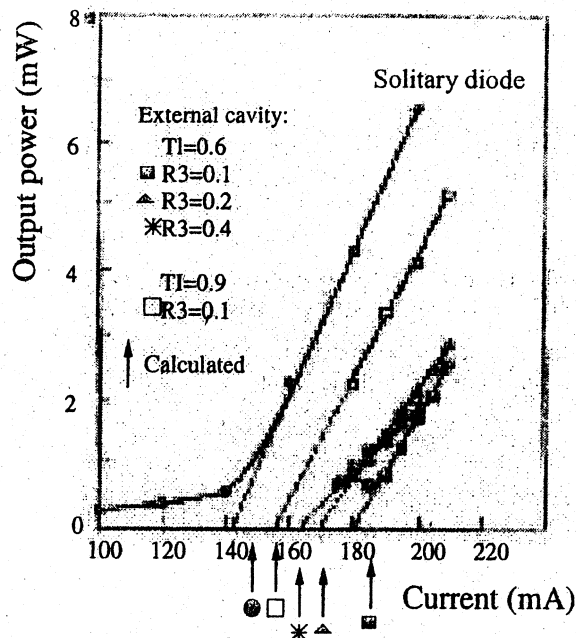
Η ισχύς εξόδου του laser σχεδιάζεται συναρτήσει του ρεύματος διάχυσης για το μεμονωμένο διοδικό laser και ECDL. Η ισχύς εξαναγκασμένης εκπομπής η οποία εκπέμπεται από την κοιλότητα μέσω του κατόπτρου εξόδου μπορεί να εξαχθεί με βάση την εξίσωση (2.25),

$$P_{out} = \eta_i \frac{h\nu}{e} (I - I_{th}) \left(\frac{\ln \frac{1}{\sqrt{R_3}}}{\alpha l + \ln \frac{1}{\sqrt{T_1^4 R_g R_3}}} \right), \quad (1.24)$$

Όπου η_i είναι η απόδοση εσωτερικής ακτινοβολούσας επανασύνδεσης, R_g και R_3 είναι οι ανακλαστικότητες του φράγματος περίθλασης και του κατόπτρου εξόδου αντίστοιχα. T_1 είναι η διάδοση του φακού. Οι συνθήκες κατωφλιού είναι:

$$\Gamma_g = a + \frac{1}{l} \ln \frac{1}{\sqrt{T_1^4 R_3 R_g}}, \quad (1.25)$$

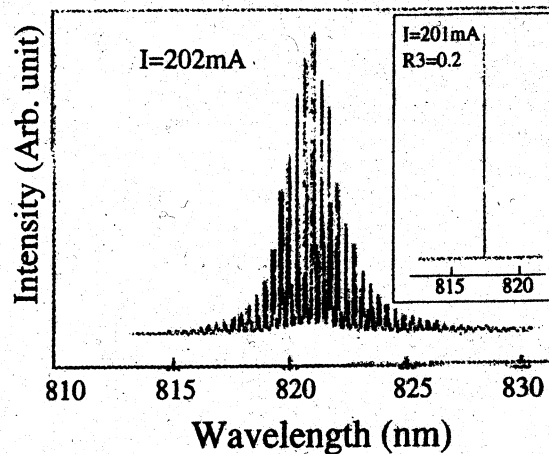
Όπου Γ είναι ο παράγων περιορισμού του τρόπου ταλάντωσης και g είναι το κέρδος κατωφλιού. Οι παραπάνω εξισώσεις για την έξοδο ισχύος και τη συνθήκη κατωφλιού δείχνουν ότι, για δεδομένο ρεύμα διάχυσης, το laser εξωτερικής κοιλότητας γενικά έχει κάπως μικρότερη έξοδο ισχύος από αυτή του απομονωμένου laser, (παρά το γεγονός ότι η διαφορική απόδοση μπορεί να είναι η ίδια), και επιπλέον, έχει υψηλότερο ρεύμα κατωφλιού, όπως φαίνεται στο Σχ.1.6



Σχ.1.6 Έξοδος οπτικής ισχύος της απομονωμένης διόδου σε σύγκριση με αυτή το laser εξωτερικής κοιλότητας με διάφορους συνδυασμούς κατόπτρων και φακών. Για την απομονωμένη δίοδο, $R_g = 0$, $R_1 = R_2 = 0.32$, για την εξωτερική κοιλότητα, $R_g = 0.9$, $R_1 = R_2 = 0.01$.

1.2.0.2 Συντονιστική ικανότητα μονού ρυθμού

Η έξοδος ενός μεμονωμένου διοδικού laser είναι συνήθως πολυτροπική, όπως το παράδειγμα στο Σχ.1.7. Το laser διόδου εξωτερικής κοιλότητας λειτουργεί σε μία συχνότητα η οποία φαίνεται στο ένθεμα του Σχ.1.7. Το Σχ.1.8 δείχνει την φασματική καμπύλη εξόδου, η οποία έχει εύρος πάνω από 10 nm για κάτοπτρο με αντανakλαστικότητα 20% ζεύκτη. Συνεχής συντονισμός της εκπομπής laser σε διαφορετική συχνότητα εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία η κοιλότητα ευθυγραμμίστηκε και από την ποιότητα της μη ανακλαστικότητάς της επιφάνειας επικάλυψης του διοδικού laser. Η συχνότητα του τρόπου λειτουργίας του laser θα μπορούσε να ρυθμιστεί σε οποιοδήποτε συχνότητα της μεμονωμένης διόδου. Αυτό το γεγονός μας δείχνει ότι η έξοδος μονού τρόπου του laser εξωτερικής κοιλότητας δε εξαρτάται σημαντικά από την επιλεκτικότητα συχνότητας της κοιλότητας Fabry-Perot που συντίθεται από τις επιφάνειες της διόδου, αλλά είναι περισσότερο αποτέλεσμα του ουσιαστικά ομογενούς φασματικού κορεσμού του κέρδους του laser. Ούτε είναι η έξοδος σε μονό ρυθμό είναι απλά ένα αποτέλεσμα της επιλεκτικότητας μήκους κύματος από το φράγμα περίθλασης.



Σχ.1.7 Φάσμα απομονωμένης διόδου πριν την λειτουργία της με εξωτερική κοιλότητα. Ένθετο: φάσμα της διόδου όταν λειτουργεί με εξωτερική κοιλότητα.

1.2.0.3 Εύρος γραμμής εκπομπής (Linewidth)

Το πιο εμφανές χαρακτηριστικό του σταθεροποιημένου laser εξωτερικής κοιλότητας είναι το στενό εύρος συχνοτήτων. Μεγαλώνοντας το μήκος της οπτικής κοιλότητας, η διαπλάτυση της φασματικής γραμμής εξόδου λόγω αυθόρμητης εκπομπής του laser μπορεί να μειωθεί δραματικά. Το φάσμα ισχύος του ηλεκτρικού πεδίου είναι, (FWHM=Full Width at Half Maximum) αναπαρίσταιται από μια Lorentzian καμπύλη που μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta\nu_q = \frac{h\nu_q g n_{sp} (\Delta\nu_g)^2}{P_0} a_i \cdot (1 + \beta^2), \quad (1.26)$$

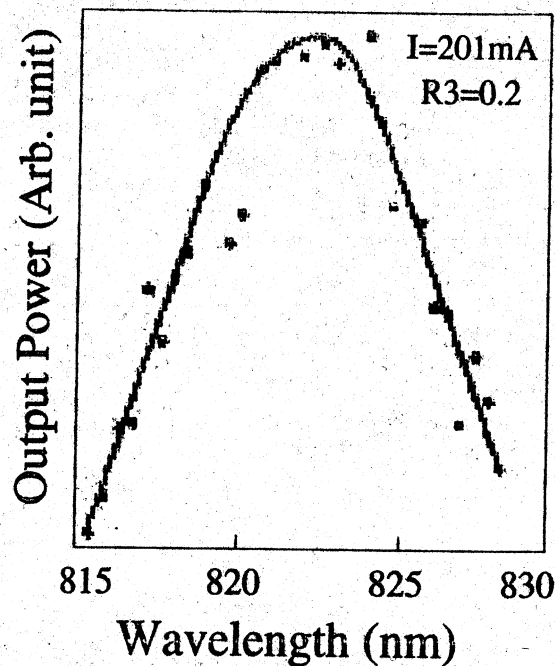
Όπου P_0 είναι η ισχύς του ρυθμού εκπομπής, n_{sp} είναι ο αριθμός των φωτονίων λόγω αυθόρμητης εκπομπής στον ρυθμό εκπομπής, g είναι το κέρδος, h είναι η σταθερά Planck, ν_q είναι η συχνότητα του laser. Η ολική απώλεια $a_i = \alpha - \ln \sqrt{R_1 R_2}$ για την

απομονωμένη δίοδο και $a_i = \alpha - \ln \sqrt{T_4 R_1 R_2}$ για διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας, R_1 και R_2 είναι οι ανακλαστικότητες των αντίστοιχων επιφανειών. Ο παράγων βελτιστοποίησης φασματικού εύρους β δίδεται από $(dn/dG)(dG/DN)$, οι τυπικές τιμές του κυμαίνονται από 2 έως 8. Το $\Delta\nu_g$ είναι το εύρος (FWHM) της κοιλότητας Fabry-Perot και συνδέεται με το χρόνο ζωής τ_p του φωτονίου και επομένως και με την απώλεια κοιλότητας μίας διέλευσης. Για μεμονωμένο laser δίοδου, η έκφραση για το εύρος φάσματος της κοιλότητας είναι

$$\Delta\nu_{gSD} = \frac{1}{2\pi\tau_p} = \frac{c}{2\pi nd}, \quad (1.27)$$

Όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου. Η εξ.(1.27) πρέπει να τροποποιηθεί όταν η δίοδος λειτουργεί μέσα σε εξωτερική κοιλότητα, όπου ο χρόνος ζωής φωτονίου είναι εμφανώς μεγαλύτερος εξαιτίας της διάδοσης χωρίς απώλειες κατά μήκος απόστασης $L \gg nd$:

$$\Delta\nu_{gEC} = \frac{c}{2\pi(nd + L)} \quad (1.28)$$



Σχ.1.8 Φάσμα συντονισμού διεγερόμενης ισχύος για το laser εξωτερικής κοιλότητας.

Το εύρος της γραμμής εξόδου $\Delta\nu_{gEC}$ συναρτηίσει του εύρους χωρίς ανάδραση $\Delta\nu_{gSD}$, και για δεδομένη ισχύ τρόπου P_0 , έχουμε

$$\Delta\nu_{gEC} = \frac{\Delta\nu_{gSD}}{(1 + \gamma)}, \quad (1.29)$$

Όπου $\gamma = L/nd \gg 1$, το εύρος φάσματος εξωτερικής κοιλότητας, μειώνεται κατά περίπου πέντε τάξεις μεγέθους στην εξωτερική κοιλότητα. Για ισχύ εξόδου 1 mW, το όριο εύρους φάσματος είναι μερικά MHz σε ένα τυπικό laser δίοδου GaAlAs. Όμως η αναλογία

μείωσης του εύρους συχνοτήτων είναι έγκυρη μόνο για χαμηλή ανάδραση (<1%). Υπάρχει δημοσιευμένη μία έγκυρη θεωρία για το εύρος συχνοτήτων σταθερής κατάστασης για εξωτερική κοιλότητα, με αυθαίρετη δυνατή ανάδραση [Hjelme και Mickelson (1987)].

Μαζί με την μείωση της αυθόρμητης διακύμανσης φάσης, η εξωτερική κοιλότητα αποδεσμεύει την συχνότητα συντονισμού του laser από την δυνατή εξάρτηση από τον δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού. Εφόσον το οπτικό μήκος της εξωτερικής κοιλότητας είναι $(nd+L)$, οι συχνότητες των τρόπων ταλαντώσης/εκπομπής είναι

$$\nu_q = \frac{qc}{2(nd + L)}, q = 1, 2, \dots \quad (1.30)$$

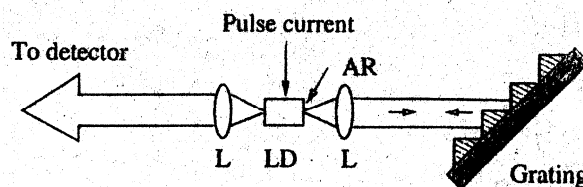
Όπου $\nu_q^{-1}(\partial \nu_q / \partial n) = n^{-1}[(1+\gamma)]^{-1}$. Για $\gamma \gg 1$, οι σχετικές αλλαγές στη συχνότητα τρόπου λόγω μεταβολών στο δείκτη διάθλασης μειώνονται κατά ένα παράγοντα γ , επομένως, η εξωτερική κοιλότητα αποδεσμεύει τη συχνότητα συντονισμού του laser από την δυνατή εξάρτηση από τον δείκτη διάθλασης του ημιαγωγού. Ενώ η διακύμανση του δείκτη διάθλασης συνεισφέρει σημαντικά στο παρατηρούμενο εύρος συχνοτήτων του απομονωμένου laser δίοδου, αντίστοιχη η συνεισφορά της στο laser εξωτερικής κοιλότητας, είναι αμελητέα.

1.2.0.4 Εξάρτηση του μήκους κύματος από τη θερμοκρασία

Η ευαισθησία σε θερμοκρασία του ρεύματος κατωφλίου για laser συντονιζόμενο σε μήκος κύματος μονού ρυθμού μετρήθηκε από $293 \text{ K } (20^\circ\text{C}) \leq T \leq 355 \text{ K } (82^\circ\text{C})$ και το μήκος κύματος κυμάνθηκε από $1.23 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.35 \mu\text{m}$. Όταν συμπεριληφθεί ο παράγων διακύμανσης του μέγιστου κέρδους με τις αλλαγές της θερμοκρασίας, η εξάρτηση του ρεύματος κατωφλίου από τη θερμοκρασία, δεν επηρεάζεται αν μεταβάλλουμε το μήκος κύματος λειτουργίας του laser σε μία ευρεία περιοχή συντονισμού. Η μεταβολή του κατωφλίου λειτουργίας του laser μπορεί να αναπαρασταθεί με την εμπειρική έκφραση

$$I_{th} = I_0 e^{T/T_0} \quad (1.31)$$

Όπου T_0 είναι η ολική χαρακτηριστική θερμοκρασία, σημειώστε ότι μικρές τιμές του T_0 δείχνουν μεγαλύτερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Οι συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ήταν φτιαγμένη InGaAsP με σχεδιασμό ετεροεπαφής. Η πειραματική διάταξη για την εξωτερική κοιλότητα επιδεικνύεται στο Σχ. 1.9, η οπτική έξοδος από μία επιφάνεια με αντανάκλαστική επικάλυψη συζευγνύεται αποτελεσματικά με την εξωτερική κοιλότητα με ένα φακό χαμηλών απωλειών.



Σχ.1.9 Σχηματικό διάγραμμα διοδικού laser με εξωτερική κοιλότητα. LD:δίοδος Laser, L:οπτικός φακός AR: αντανάκλαστική επικάλυψη.

Η εξωτερική κοιλότητα με μήκος 20 cm κλείνει με ένα φράγμα περίθλασης με 600 γραμμές/mm η οποία επιτρέπει τον συντονισμό της εκπομπής laser σε μία και μόνο συχνότητα κατά μήκος του φάσματος κέρδους του ημιαγωγού.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι σε μία μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών ,

$293\text{ K} \leq T \leq 355\text{ K}$ και σε μια μεγάλη περιοχή συντονισμού $1.23\mu\text{m} \leq \lambda \leq 1.35\mu\text{m}$ το ρεύμα κατωφλιού μπορεί να χαρακτηριστεί από την απλή έκφραση:

$$I_{th}(\lambda, T) = I_0(\lambda)e^{T/T_0} \quad (1.32)$$

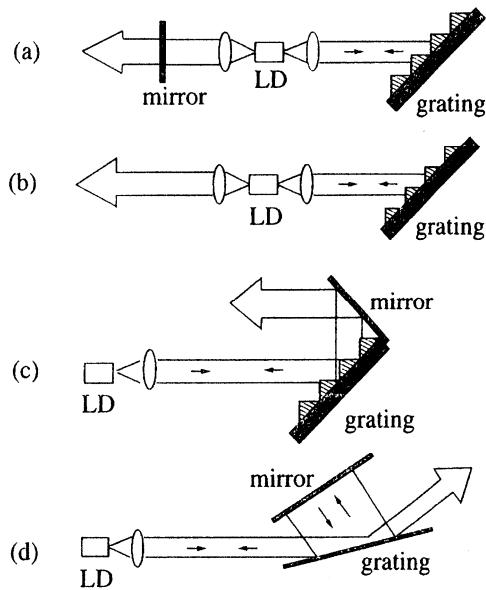
όπου $\lambda = \lambda - \xi T$. Η εξ.(1.32) είναι ένα αξιοσημείωτο αποτέλεσμα. Εφόσον το φράγμα περίθλασης φωτίζεται με μήκος κύματος $\lambda = 1.25\mu\text{m}$ και η οπτική σύζευξη προς την κοιλότητα έχει αντιανακλαστική επικάλυψη ευρείας ζώνης, το μέγεθος της αποτελεσματικότητας οπτικής σύζευξης δεν παρουσιάζει ουσιαστικές μεταβολές μέσα στην φασματική περιοχή που ερευνάται. Επομένως, το αυξημένο ρεύμα κατωφλιού που χρειάζεται με τον αποσυντονισμό από το μέγιστο κέρδος δεν είναι αποτέλεσμα αλλαγής του επιπέδου απωλειών, αλλά της αλλαγής της ενεργειακής κατανομής των φορέων φορτίων σε μία ορθά πολωμένη δίοδο laser.

1.3 Συστήματα συντονιζόμενων διοδικών laser με εξωτερική κοιλότητα

Μπορεί να φανεί από τις προηγούμενες ενότητες ότι η οπτική ανάδραση μπορεί να επιτύχει τον συντονισμό του διοδικού laser σε ευρείες περιοχές και το στένεμα το εύρους συχνοτήτων εκπομπής με τη χρήση διαφόρων ειδών οπτικών στοιχείων. Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιούμε την υψηλή σκεδαστική ισχύ οπτικής ανάδρασης για να επιτύχουμε μία μεγάλη περιοχή συντονισμού και στενό φάσμα εκπομπής σε διαφορετικές διατάξεις εξωτερικών κοιλοτήτων. Εξετάζονται οι βέλτιστοι σχεδιασμοί και ευθυγραμμίσεις εξωτερικής κοιλότητας. Τα φράγματα περίθλασης είναι το πιο διαδομένο στοιχείο σκεδαστικής ανάδρασης, ανάμεσα στα etalon, τα πρίσματα, τα ηλεκτρονικά συντονιζόμενα διπλοθλαστικά φίλτρα και τα ακουστικοοπτικά συντονιζόμενα φίλτρα που έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης ευρέως και επιτυχώς, και τα οποία θα παρουσιάσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

1.3.1 Διάταξη ECDL

Υπάρχει αρκετός αριθμός καλών σχεδιασμών laser εξωτερικής κοιλότητας, ο καθένας από τους οποίους συνοδεύεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το Σχ.1.10 παρουσιάζει τέσσερις διαφορετικούς σχεδιασμούς της οπτικής ανάδρασης οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των διοδικών laser. Για καλή λειτουργία, οι αντιανακλαστικές επικαλύψεις στην επιφάνεια εξόδου του τσιπ της δίοδου είναι άκρως επιθυμητές.



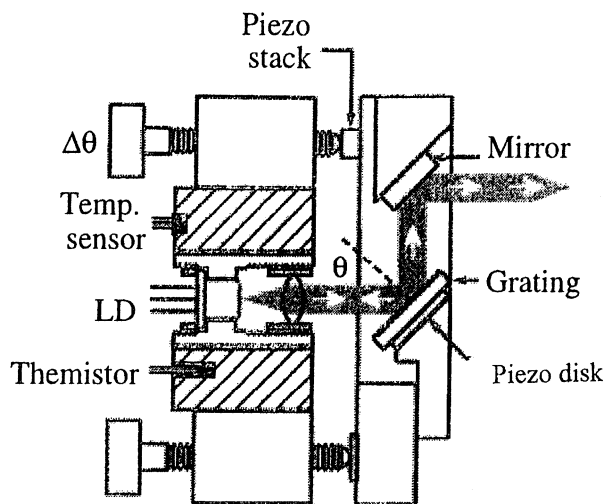
Σχ.1.10 Διάφορες διατάξεις οπτικής ανάδρασης: (a) και (b) διάταξη εξωτερικής κοιλότητας δύο πλευρών, (c) διάταξη Littrow εξωτερικής κοιλότητας μίας πλευράς σε , (d) διάταξη εξωτερικής κοιλότητας χρησιμοποιώντας εσχάρα σε σχήμα σύμπτωσης-αμυχής Littman-Metcalf.

Στο σχήμα 1.10 (a), φαίνεται η διάταξη εξωτερικής κοιλότητας δύο πλευρών, αυτό το σχήμα έχει ένα τσιπ διόδου με επικάλυψη AR και στις δύο πλευρές. Κάθε τμήμα εκτεταμένης κοιλότητας ξαναανακλάται στην αντίστοιχη επιφάνεια του ημιαγωγικού τσιπ. Ένα από τα τμήματα της εκτεταμένης κοιλότητας περιέχει το φράγμα περίθλασης για την επιλεξιμότητα μήκους κύματος, το άλλο έχει μόνο ένα κάτοπτρο σύζευξης οπτικής εξόδου. Η διάταξη στο Σχ.1.10 (b) είναι παρόμοια με αυτήν του Σχ.1.10 (a) με τη διαφορά ότι το κάτοπτρο εξόδου έχει αντικατασταθεί με οπτικό φίλτρο. Οι δύο διατάξεις εξωτερικής κοιλότητας δύο πλευρών των Σχ.1.10 (a) και (b) προσφέρουν πλεονεκτήματα αύξησης της καταστολής ταλάντωσης της κοιλότητας της διόδου, τα οποία λαμβάνονται από τη μείωση της ανακλαστικότητα και των δύο επιφανειών και από την γεωμετρική σταθερότητα θέσης της δέσμης εξόδου όταν το φράγμα περίθλασης περιστρέφεται για να συντονίσει το μήκος κύματος. Από την άλλη μεριά, έχει τα μειονεκτήματα της ειδικής σχεδίασης laser ώστε να υπάρχει ανεμπόδιστη πρόσβαση και στις δύο επιφάνειες, και της αύξησης της δυσκολίας ευθυγράμμισης, και της πρόσθετης απώλειας σύζευξης η οποία συνδέεται με το δεύτερο τμήμα της εκτεταμένης κοιλότητας.

Στο Σχ.1.10 (c) είναι η διάταξη εκτεταμένης κοιλότητας μίας πλευράς σε διάταξη Littrow, η οποία είναι η πιο διαδομένη διάταξη για τους ακόλουθους λόγους: i) Απαιτείται μια μόνο επιφάνεια με επικάλυψη AR. ii) Είναι διαθέσιμη εμπορικά συσκευή με μία επιφάνεια εξόδου. iii) Παρουσιάζει απλότητα και ευκολία ευθυγράμμισης. iv) Άριστη απόδοση. Όμως, ακόμη και με υψηλής ποιότητας στρωμάτων επικάλυψης των επιφανειών οι επιδράσεις του συντονισμού της κοιλότητας σε συχνότητα της μεμονωμένης διόδου είναι ακόμα παρατηρήσιμες και είναι μερικές φορές η αιτία μη ιδανικής συμπεριφοράς. Υπάρχει επίσης το μειονέκτημα ότι η δέσμη μετακινείται ενώ συντονίζεται το μήκος κύματος. Μία λύση για αυτό το πρόβλημα είναι η χρησιμοποίηση ενός κατόπτρου με την επιφάνεια του τοποθετημένη κάθετα προς την επιφάνεια του φράγματος περίθλασης ώστε να δημιουργηθεί ένας επαναανακλαστήρας. Η περιστροφή συγχρόνως και του φράγματος και του κατόπτρου αφήνει την κατεύθυνση της δέσμης

εξόδου αναλώσιμη, αν και θα υπάρξει κάποια μετακίνηση της δέσμης εάν ο άξονας περιστροφής δεν καθορίζεται από την τομή του φράγματος περίθλασης και του κατόπτρου.

Ένα άκρως απλό laser αυτού του τύπου έχει αναπτυχθεί κατασκευάζοντας το με φθηνές εμπορικές συσκευές με μόνο λίγες τροποποιήσεις. Ένα laser των 780nm κατασκευασμένο σύμφωνα με αυτό το σχέδιο έχει ισχύ εξόδου 80 mW, και εύρος συχνοτήτων 350kHz. Όπως φαίνεται στο Σχ1.11, τα συστήματα ECDL βασίζονται στη ρυθμιστική διάταξη Littrow. Κάθε ένα αποτελείται από ένα Sanyo DL-7140-201 διοδικό laser και ασφαιρικούς φακούς σε παραλληλία οι οποίοι είναι σταθεροποιημένοι σε ένα σωλήνα ευθυγράμμισης ο οποίος είναι σταθεροποιημένος σε μία τροποποιημένη βάση κατόπτρου. Ο αισθητήρας θερμίστορ των 10 kΩ και ένας θερμοηλεκτρικός ψύκτης Peltier χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας της διόδου. Ένα επιχρυσωμένο φράγμα περίθλασης με 1800 γραμμές/mm πάνω σε ένα 15x15x3 mm³ υπόστρωμα παρέχει ανάδραση με επιλεξιμότητα μήκους κύματος με τυπική αποτελεσματικότητα περίθλασης από 15% έως 80% της ισχύος, η οποία ανακλάται απευθείας ώστε να σχηματίσει την δέσμη εξόδου. Η σχάρα στερεώνεται στην μπροστινή επιφάνεια της βάσης του κατόπτρου, ώστε να παρέχεται δυνατότητα για οριζόντια και κάθετη ρύθμιση. Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος PZT σε σχήμα δίσκου πάχους 1 mm κάτω από την σχάρα χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του μήκους της κοιλότητας για βέλτιστο συντονισμό συχνότητας. Η δέσμη εξόδου ανακλάται από ένα κάτοπτρο συνδεδεμένο με τον βραχίονα της σχάρας. Η διπλή ανάκλαση από την εσχάρα και το κάτοπτρο διατηρεί σταθερή έξοδο ενώ ρυθμίζεται η γωνία της σχάρας και το μήκος κύματος λειτουργίας του laser. Η ισχύς εξόδου είναι τυπικά 40mW στα 780 nm, και το μήκος κύματος μπορεί να συντονιστεί με ασυνέχειες σε μία περιοχή 10 nm με περιστροφή μόνο της σχάρας, και σε ευρύτερη περιοχή με κατάλληλη ρύθμιση θερμοκρασίας.



Σχ.1.11 Σχέδιο διοδικού laser με εξωτερική κοιλότητα. Μία AlGaAs δίοδος laser, ασφαιρικοί φακοί παραλληλισμού, και σχάρα περίθλασης σε σχηματισμό Littrow, στερεώνονται σε μία κινούμενη βάση κατόπτρου. Ένα θερμίστορ αισθητήρας θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για ανάδραση για τη σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του laser με έναν θερμοηλεκτρικό ψύκτη (Δεν αναπαρίσταται). Ένας ημιαγωγικός αισθητήρας LM35 παρέχει ξεχωριστή ένδειξη θερμοκρασίας. Το κάτοπτρο παρέχει σταθεροποιημένη κατεύθυνση της δέσμης εξόδου ενώ ρυθμίζεται η γωνία της σχάρας. Μία στοιβή πιεζοηλεκτρικού υλικού χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της γωνίας σχάρας

και επομένως του μήκους κύματος (20GHz /100V) και ένα δισκίο ρυθμίζει το μήκος της κοιλότητας για την ανάδραση κλειδώματος συχνότητας.

Τα laser επίσης έχουν μία στοίβα πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα ο οποίος οδηγεί τον βραχίονα περιστροφής της σχάρας-κατόπτρου, αυτή η στοίβα τροποποιεί την γωνία της σχάρας και το μήκος της κοιλότητας, επιτρέποντας την ηλεκτρονική ρύθμιση του μήκους κύματος των 20GHz μέσα στην περιοχή των 100V της στοίβας. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη περιοχή σάρωσης και πιο ασφαλείς τάσεις σε σύγκριση με την αρχική σχεδίαση. Κάθε laser στερεώνεται σε μία βαριά μεταλλική βάση ώστε να έχουμε απόσβεση φαινομένων αδράνειας και θερμότητας. Η βάση είναι απομονωμένη από το οπτικό έδρανο με ρευστοελαστικό πολυμερικό υλικό στις γωνίες και είναι καλυμμένο με κλωβό αλουμινίου, ο οποίος είναι επίσης μονωμένος από το laser με λωρίδες σορβοθάνης. Το laser και τα οπτικά απορρόφησης παραμορφώσεων προστατεύονται με ακρυλικό κάλυμμα, το κάλυμμα αλουμινίου και το κάλυμμα ακρυλικού προστατεύουν τα laser από ρεύματα αέρος, βελτιώνουν την σταθερότητα θερμοκρασίας, και αποσβένουν τις ακουστικές δονήσεις.

Ένα διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας με ανάδραση σχάρας περιθλάσεως έχει αναπτυχθεί κοντά στη μετάβαση του καισίου στα 894 nm παράγωντας πάνω από 20 mW ισχύος μονού τρόπου, με συνεχή περιοχή συντονισμού πάνω από 25 GHz. Συγκρινόμενο με τον συνήθες σχηματισμό Littrow ο οποίος περιγράφηκε παραπάνω ο σχεδιασμός τους αποτελείται από ένα ζευγάρι απλών κινούμενων βάσεων,τη μία που κρατάει την δίοδο και τους φακούς παραλληλισμού, και την άλλη που κρατάει την σχάρα περίθλασης. Αυτό μας επιτρέπει την εύκολη και ακριβή βελτίωση της εξόδου laser , και η θερμοκρασία της δίοδου μπορεί να ελεγχθεί με ελάχιστη επίδραση στο μήκος της κοιλότητας.

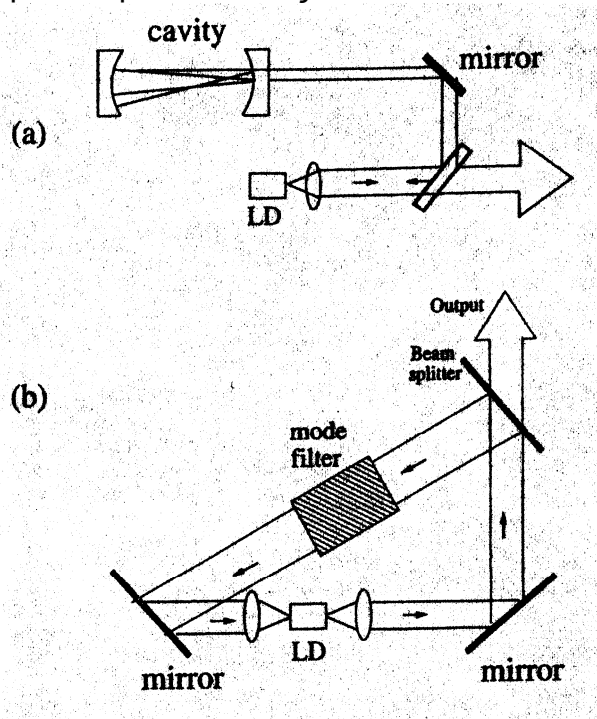
Στο Σχ.1.10 (d) έχουμε ένα laser εκτεταμένης κοιλότητας το οποίο χρησιμοποιεί σχάρα σε σχηματισμό πρόσπτωσης-αμυχής. Αυτός ο σχεδιασμός εφαρμοσμένος σε διοδικό laser συχνά αποκαλείται ως διάταξη Littman-Metcalf διότι εισήγαγαν την χρήση της προσπτώσεως αμυχής για τον έλεγχο των laser Dye.

Είναι μία κοιλότητα τριών κατόπτρων αποτελούμενη από την οπίσθια επιφάνεια του laser δίοδου με επικάλυψη υψηλής ανακλαστικής ικανότητας, το μέσο λειτουργίας του laser, την μπροστινή επιφάνεια του laser με επικάλυψη αντιανακλαστικού υλικού , ένα φακό ευθυγράμμισης, μία σχάρα περίθλασης σε σύμπτωση αμυχής, και ένα εξωτερικό κάτοπτρο. Η ανάκλαση μηδενικής τάξεως από την σχάρα είναι η έξοδος του laser. Η ανάκλαση πρώτης τάξεως από την σχάρα ανακλάται πίσω μέσα στο laser από το εξωτερικό κάτοπτρο. Η μία άκρη της κοιλότητας του laser είναι η οπίσθια επιφάνεια του διοδικού laser και η άλλη άκρη είναι το εξωτερικό κάτοπτρο. Η διάταξη είναι παρόμοια με αυτή των Littman-Metcalf για τα παλμικά laser. Διαφέρει όμως στο ότι εδώ ένα κάτοπτρο προστίθεται για την ευθυγράμμιση της δέσμης, το μέσο απολαβής είναι μέσα σε έναν κυματοδηγό, και το laser είναι συνεχές κύμα. Αυτή η διάταξη έχει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλότερη φασματικά καταμέριση της ισχύος και ακινησία της δέσμης εξόδου όταν το laser συντονίζεται. Το φασματικό εύρος που βασίζεται σε αυτή τη διάταξη καθορίζεται από

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi w \sin \theta^2} \quad (1.33)$$

όπου $\Delta\lambda$ είναι το ήμισυ πλάτος της φασματικής κατανομής της εξόδου του laser με μήκος κύματος λ , w είναι το πλάτος της σχάρας που φωτίζεται, και θ είναι η γωνία μεταξύ της κανονικής δέσμης της σχάρας και της δέσμης πρόσπτωσης. Για τη μείωση

του εύρους φάσματος του laser προσπαθούμε να καλύψουμε τη δέσμη laser προς την σχάρα αυξάνοντας την γωνία προσπτώσεως.



Σχ. 1.12 Διαφορετικές διατάξεις οπτικής ανάδρασης: (a) μία διάταξη συντονισμένου οπτικού κλειδώματος χρησιμοποιώντας την συνεστιακή κοιλότητα Fabry-Perot. (b) διάταξη κοιλότητας δακτυλίου.

Το Σχ.1.12 (a) είναι μία διάταξη “κλειδώματος” της συχνότητας χρησιμοποιώντας μία ομοεστιακή κοιλότητα Fabry-Perot. Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούμε την ασθενή οπτική σύζευξη με ένα ταλαντωτή υψηλού Q, το laser βλέπει οπτική ανάδραση από την κοιλότητα Fabry-Perot μόνο όταν η συχνότητα του laser ταιριάζει με ταλάντωση της κοιλότητας. Με αυτόν τον τρόπο το φασματικό εύρος μπορεί να μειωθεί σε λίγα kilohertz και η κεντρική συχνότητα του laser σταθεροποιείται με την ταλάντωση της κοιλότητας. Το laser συντονίζεται αλλάζοντας το μήκος της κοιλότητας Fabry-Perot κατασκευασμένη από Invar με ένα PZT. Ένας από τους περιορισμούς αυτού του συστήματος είναι ότι χρειάζεται κάποια πρόσθετα αργά ηλεκτρονικά ώστε να κρατηθεί το laser κλειδωμένο με την ίδια δίοδο της κοιλότητας για μεγάλο χρονικό διάστημα και να παραμείνει το laser συγχρονισμένο με τον τρόπο ταλάντωσης της κοιλότητας για μεγάλες σαρώσεις. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι ότι το εύρος φάσματος είναι πολύ στενό και ότι η σταθερότητα καθορίζεται από την εξωτερική κοιλότητα. Τα μειονεκτήματα είναι η ευαισθησία του διαχωρισμού στη κοιλότητα του laser και το γεγονός ότι η περιοχή συντονισμού του laser είναι ουσιαστικά η ίδια με αυτή του βασικού μη σταθεροποιημένου laser αφού περιορίζεται στο καθεστώς της ασθενούς αναδράσεως.

Το Σχ.1.12 (b) δείχνει ένα laser κοιλότητας-δακτυλίου, το οποίο είναι το πιο δύσκολο ως προς την ευθυγράμμιση της εξωτερικής κοιλότητας. Όπως στην εξωτερική κοιλότητα δύο πλευρών, η κοιλότητα δακτυλίου έχει το πλεονέκτημα της αύξησης καταστολής απομονωμένων συντονισμών εξαιτίας της αναίρεσης ανακλάσεων και στις δύο επιφάνειες. Μπορεί να γίνει μίας κατευθύνσεως τοποθετώντας έναν οπτικό απομονωτή μέσα στην κοιλότητα. Έχει κατασκευαστεί ημιαγωγικό laser δακτυλίου συντονιζόμενο σε ευρεία περιοχή, μιας συχνότητας, με στενό φασματικό εύρος δέσμης 350 kHz, με συντονισμό πάνω από 50nm με ηλεκτρονικό τρόπο με τη χρήση φίλτρου οπτικής ίνας Fabry-Perot.

Σε αντίθεση με την διάταξη Littman που περιγράφηκε προηγουμένως, το κάτοπτρο συντονισμού μπορεί να αντικατασταθεί με ένα δεύτερο φράγμα περίθλασης υπό γωνία Littrow. Αυτή η διάταξη διπλού φράγματος περίθλασης υλοποιήθηκε θεωρητικά από τον Littman και εφαρμόστηκε πειραματικά από Shoshan και Orpenheim, αντίστοιχα, για την ανάπτυξη των παλμικών laser dye στενού εύρους. Όπως φαίνεται στο Σχ.5.13, το παθητικό εύρος συχνοτήτων του συνδυασμού του φράγματος περίθλασης κάθετης πρόσπτωσης και του φράγματος περίθλασης Littrow είναι

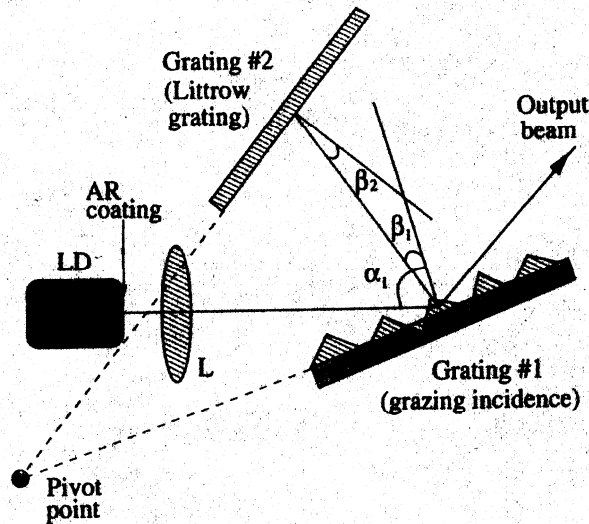
$$\delta\nu_{dg} = \frac{2c}{\pi w \lambda \left(2 \frac{q_1}{d_1 \cos \beta_1} + \frac{q_2}{d_2 \cos \beta_2} \right) \frac{\cos \beta_1}{\cos \alpha_1}}, \quad (1.34)$$

Όπου c η ταχύτητα του φωτός, w η ακτίνα της δέσμης, d_1 και d_2 η αποστάσεις αυλακώσεων του φράγματος περίθλασης κάθετης πρόσπτωσης και του φράγματος περίθλασης Littrow, αντίστοιχα, q_1 και q_2 οι αντίστοιχες τάξης περίθλασης. α_1 είναι η γωνία πρόσπτωσης, β_1 είναι η γωνία περίθλασης του πρώτου φράγματος περίθλασης β_2 η γωνία Littrow του δεύτερου φράγματος περίθλασης, και λ είναι το μήκος κύματος του laser. Η εξ.(1.34) απλοποιείται για τον συνδυασμό φράγματος περίθλασης-κάτοπτρου ($q_2=0$) σε

$$\delta\nu_{dg} = \frac{cd_1}{\pi q_1 w \lambda} \cos \alpha_1 \quad (1.35)$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (1.34) και (1.35), βλέπουμε ότι η διάταξη διπλού φράγματος περίθλασης επιτρέπει ένα εύρος ζώνης το οποίο είναι παράγων του $(1 + d_1 \cos \beta_1 / 2d_2 \cos \beta_2)$ μικρότερο από αυτό της κοιλότητας φράγματος περίθλασης-κάτοπτρου ($q_1 = q_2 = 1$). Με σταθερές αποστάσεις αυλακώσεων του φράγματος περίθλασης κάθετης πρόσπτωσης, αυτή η μείωση εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τις αποστάσεις αυλακώσεων του φράγματος περίθλασης Littrow. Χρησιμοποιώντας σχάρα Littrow με περίοδο 1200g/mm και μία τυπική γωνία προσπτώσεως 80° με μήκος κύματος 770 nm, παίρνουμε έναν παράγοντα μείωσης εύρους συχνοτήτων ίσο με 1.3.

Όμως, χρησιμοποιώντας τους ίδιους παραμέτρους αλλά φράγμα περίθλασης με διπλάσια περίοδο σχάρας από την παραπάνω, μπορούμε να επιτύχουμε έναν παράγοντα μείωσης ίσο με 2.6. Επομένως η γωνία πρόσπτωσης α_1 μπορεί να μειωθεί για λειτουργία με δεδομένο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Αυτό μειώνει τις απώλειες κοιλότητας, και επομένως αυξάνει την περιοχή συντονισμού. Ακόμη, η διάταξη διπλού φράγματος περίθλασης μας επιτρέπει να συγχρονίσουμε την σάρωση τρόπου ταλάντωσης της κοιλότητας και τη σάρωση μήκους κύματος ανάδρασης με μία απλή μηχανική κατασκευή, και επομένως να έχουμε συντονισμό μήκους κύματος χωρίς αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης.

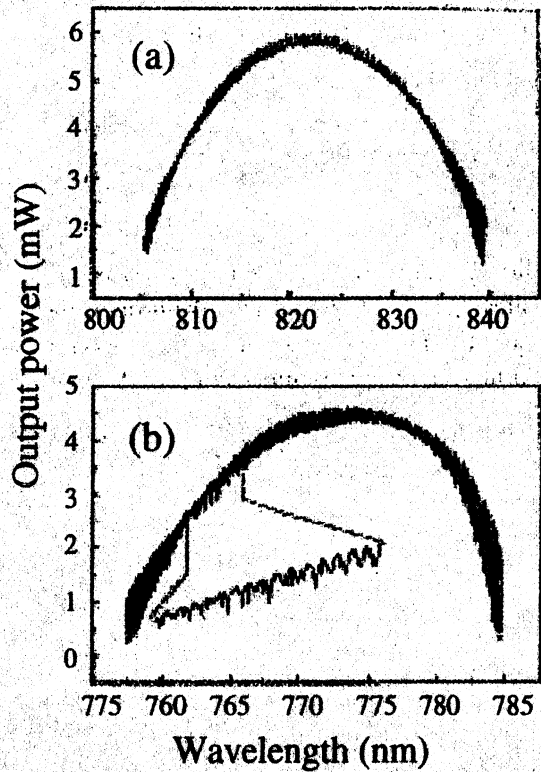


Σχ.1.13 Σχηματική διάταξη διπλής εσχάρας. LD δίοδος laser AR αντιανακλαστικότητα L ευθυγραμμιστής.

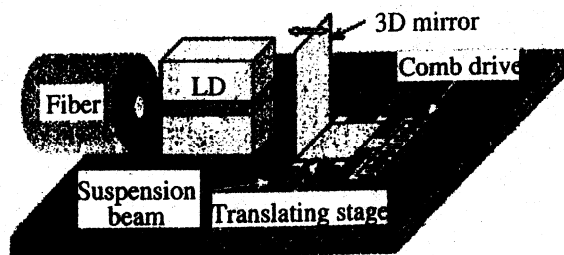
Τελικώς, η ανεξαρτησία του μήκους κύματος από την γωνία περιστροφής του στοιχείου συντονισμού είναι μικρότερη στη διάταξη διπλού φράγματος περίθλασης από ότι στη διάταξη φράγμα περίθλασης-κατόπτρου. Επομένως το laser μπορεί να συντονιστεί με ευκρίνεια υψηλής συχνότητας.

Η καμπύλη συντονισμού ενός βελτιωμένου συστήματος laser των 80nm φαίνεται στο Σχ.1.14 (a), το laser συντονίζεται συνεχόμενα σε μονό διαμήκη τρόπο ταλάντωσης χωρίς ολίσθηση τρόπου ταλάντωσης σε μήκος κύματος από 805nm έως 840nm με ρεύμα 90mA και θερμοκρασία 20°C. Στο κέντρο της καμπύλης συντονισμού στα 820nm επιτυγχάνουμε μέγιστη ισχύ εξόδου 6mW. Η διαμόρφωση της ισχύος εξόδου προέρχεται από την ασθενή υπολειπόμενη ανάκλαση της μπροστινής επιφάνειας της διόδου laser, δημιουργώντας έναν ταλαντωτή χαμηλής ποιότητας. Η εξάρτηση της ισχύος εξόδου από το μήκος κύματος για σύστημα laser εξωτερικής κοιλότητας 775nm φαίνεται στο Σχ.1.14 (b). Το laser είναι συνεχόμενα συντονιζόμενο από 758nm έως 785nm με ισχύ εξόδου 4.5mW στο μέγιστο της καμπύλης συντονισμού στα 775nm. Χρησιμοποιώντας τα ίδια συστατικά μίας διάταξης Littman μονής εσχάρας άλλα με γωνία πρόσπτωσης της εσχάρας ίση με 84°, μπορέσαμε να επιτύχουμε μία περιοχή συντονισμού 20nm.

Έχει προταθεί η ενσωμάτωση μικρομηχανικού κατόπτρου και διόδου laser ώστε να δημιουργηθεί ένα μικροσκοπικό συντονιζόμενο laser εξωτερικής κοιλότητας. Ένα μικρομηχανικό συντονιζόμενο διοδικό laser έχει κατασκευαστεί με την ενσωμάτωση ενός επιφανειακού μικρομηχανικού τρισδιάστατου κατόπτρου, και ενός FP διοδικού laser και μίας οπτικής ίνας η οποία συζευγνύει την ακτινοβολία εξόδου του laser, όπως φαίνεται στο Σχ.1.15. Η οπτική ίνα είναι ευθυγραμμισμένη πολύ κοντά στο άλλο κάτοπτρο εξόδου της διόδου laser με στόχο την απευθείας σύζευξη την δέσμη εξόδου του laser από την δίοδο laser χωρίς την ανάγκη ύπαρξης για φακούς σύζευξης. Τό τρισδιάστατο κάτοπτρο το οποίο στέκεται στο α στάδιο μετατόπισης μπορεί να οδηγηθεί ηλεκτρονικά. Η επιφάνεια του μικροκατόπτρου τοποθετείται παράλληλα ως προς αυτήν του παραθύρου εξόδου της διόδου laser και αντανακλά μέρος της δέσμης laser πίσω μέσα στην ίδια την δίοδο laser. Εφαρμόζοντας διαφορετικές τάσεις στον κινητήριο μηχανισμό του 3D κατόπτρου αλλάζει το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας, με αποτέλεσμα τον συντονισμό σε ένα νέο μήκος κύματος.



Σχ.1.14 Ισχύς εξόδου σε αντιπαράθεση με το μήκος κύματος για (a) σύστημα laser 820nm και για το (b) 775nm laser εξωτερικής κοιλότητας. Ο συντονισμός μήκους κύματος επιτυγχάνεται χωρίς αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης κατά μήκος όλου του φάσματος.



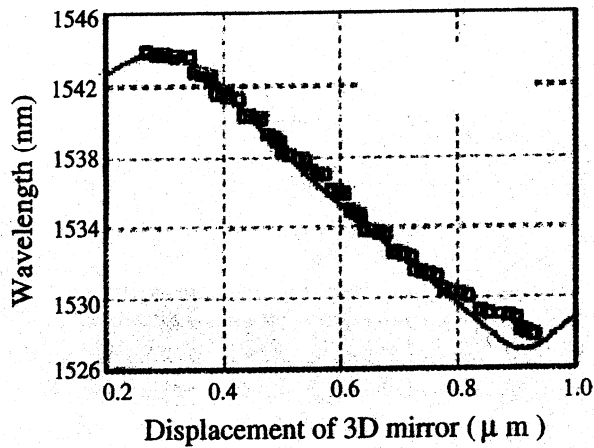
Σχ.5.15 Σχηματικό διάγραμμα συντονιζόμενου laser με χρήση ενός κάθετου μεταφραστικού μικροκατόπτρου για την αλλαγή μήκους της εξωτερικής κοιλότητας.

Όπως φαίνεται στο σχ.1.16, μία περιοχή συντονισμού ευρους 16 nm επιτυγχάνεται μετακινώντας το μικροκάτοπτρο πλευρικά οδηγώντας έναν ηλεκτροστατικό μηχανισμό κίνησης ενωμένο με το τρισδιάστατο μικρομηχανικό κάτοπτρο. Όταν το 3D κάτοπτρο μετακινηθεί από 0.3 έως 0.9 μm , το μήκος κύματος αλλάζει από περίπου 1544nm σε 1528 nm.

1.3.2 Σχεδιασμός ECDL

Για το σχεδιασμό όλου του συστήματος διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας, κάποιοι στοιχειώδεις παράμετροι πρέπει να μας απασχολήσουν. Πρέπει να μεγιστοποιήσουμε την ανάδραση, να ευθυγραμμίσουμε με ακρίβεια την κοιλότητα laser ώστε να

επιλέξουμε το μήκος κύματος, και να ελέγχουμε με ακρίβεια την θερμοκρασία του laser τσιπ αφαιρώντας την πλεονάζουσα θερμότητα.



Σχ.1.16 Διακύμανση του μήκους κύματος συντονιζόμενου laser με την μετόπιση του τρισδιάστατου κατόπτρου. Η έντονη γραμμή είναι η καμπύλη εξομοίωσης βασισμένη σε πειραματικά δεδομένα.

Χρειάζεται αρκετά υψηλο σημα αναδρασης ώστε να έχουμε σταθερή λειτουργία ECDL, ώστε να βελτιώσουμε την ικανότητα συντονισμού μονού τρόπου χωρίς αναπήδηση τρόπου. Το βέλτιστο σήμα ανάδρασης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του laser και από την ανακλασιμότητα της επιφανείας εξόδου. Το μέγεθος της απόδοσης για την δύναμη εξωτερικής ανάδρασης είναι ο λόγος απώλειας της κοιλότητας, δηλ. ο λόγος απώλειας του κατόπτρου της απομονωμένης κοιλότητας ως προς την απώλεια της εξωτερικής κοιλότητας. Ο λόγος απώλειας κοιλότητας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 20dB για οποιοδήποτε σχεδιασμό εξωτερικής κοιλότητας. Για να έχουμε την δυνατή ανάδραση, είναι πολύ επιθυμητή η χρήση καλής ποιότητας φακού με αριθμητικό άνοιγμα $NA \geq 0.55$. Υπάρχουν δύο μεγέθη που εκφράζουν πλεονέκτημα για την επιλεκτικότητα μήκους κύματος. Το πρώτο είναι η επιλεκτικότητα τρόπου ταλάντωσης της απομονωμένης κοιλότητας, το οποίο είναι ο λόγος το εύρους ζώνης φίλτρου επιλογής τρόπου ταλάντωσης FWHM ως προς την απόσταση του απομονωμένου αξονικού τρόπου ταλάντωσης το οποίο γράφεται ως

$$N_{int} = \frac{\Delta\lambda_{FWHM}}{\Delta\lambda_{int}} \quad (1.36)$$

Θα επιτευχθεί καλή ικανότητα συντονισμού στην ανίχνευση μεταξύ του μήκους κύματος της ταλάντωσης και του μήκους κύματος μέγιστης ανάδρασης με $N_{int} \leq 0.3$ εφόσον ο λόγος απώλειας της κοιλότητας είναι $>20dB$. Το άλλο είναι η επιλογή τρόπου εξωτερικής κοιλότητας:

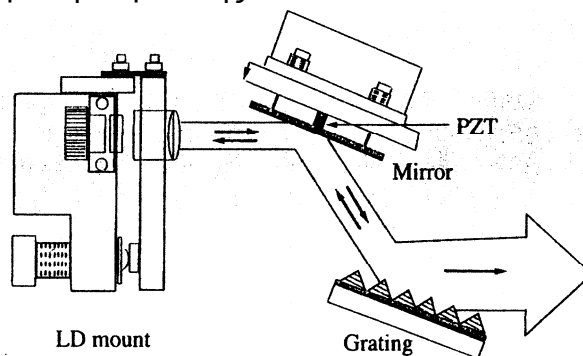
$$N_{ext} = \frac{\Delta\lambda_{FWHM}}{\Delta\lambda_{ext}} \quad (1.37)$$

το οποίο είναι ο λόγος του εύρους ζώνης το φίλτρου FWHM επιλογής τρόπου ταλάντωσης ως προς την απόσταση τρόπου εξωτερικής κοιλότητας. Για να

εξασφαλιστεί ο μονός τρόπος ταλάντωσης, είναι αναγκαίο να έχουμε $N_{ext} < 1$. Πρέπει να εξασφαλίσουμε μία σταθερή θερμικά και μηχανικά κατασκευή χρησιμοποιώντας καλό υλικό και τηρώντας βασικές αρχές κινηματικής. Αν και τα ECDL παρέχουν στενό εύρος φάσματος, είναι επίσης πιο επιρρεπή σε εξωτερικές διαταράξεις από τα απομονωμένα laser με τα οποία αρχίσαμε. Για σταθερή λειτουργία μονής συχνότητας, τα ECDL πρέπει να απομονωθούν από κραδασμούς και διακυμάνσεις πίεσεως.

1.3.3 Ευθυγράμμιση ECDL

Το Σχ.1.17 αναπαριστά τη διάταξη διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας σε γεωμετρία Littrow, το οποίο απαιτεί σταθερή θερμική και μηχανική δομή χρησιμοποιώντας καλό υλικό και αρχές κινηματικού σχεδιασμού. Το ECDL αποτελείται από βάση θωράκισης ανοξειδωτου ατσάλιου (δεν φαίνεται) η οποία ενεργεί ως άκαμπτος σκελετός για τον ταλαντωτή laser και ως απαγωγέας θερμότητας. Ένα διοδικό laser με επικάλυψη αντανάκλαστικότητας σταθεροποιείται μέσα σε ένα μικρό χάλκινο σώμα το οποίο γεφυρώνει τον ψύκτη Peltier και ενώνεται στη βάση του laser. Η βάση τότε στερεώνεται πάνω στη βάση θωράκισης. Ο φακός ευθυγράμμισης συνδέεται στη βάση του laser με ένα δυνατό ασάλινο ελατήριο το οποίο είναι συσπειρωμένο, ο φακός στερεώνεται στο εκκεντρικό δακτύλιο ο οποίος είναι συσπειρωμένος σε συγκεκριμένη θέση μετά από την αρχική χονδρική ευθυγράμμιση. Η ρύθμιση ακριβείας της εστίασης γίνεται με υψηλής ποιότητας βίδας μικρορύθμισης. Ένα κάτοπτρο διηλεκτρικού υψηλής ποιότητας κολλιέται πάνω σε βάση κατόπτρου με βίδα ακριβείας. Ένας πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας PZT είναι σφηνωμένος ανάμεσα στο κάτοπτρο και τη βάση. Το φράγμα περίθλασης είναι τοποθετημένο σε γεωμετρία Littman ώστε να συζεύξει την πρώτη τάξη περίθλασης πίσω μέσα στη δίοδο laser. Ένα κλάσμα της δέσμης που προσπίπτει στη σχάρα ανακλάται έξω από τον ταλαντωτή και δημιουργεί την έξοδο του laser. Η σχάρα που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διάταξη έχει 1800 γραμμές/mm για $\lambda=780 \text{ nm}$. Τυπικός λόγος ισχύος ανάδρασης από 5% έως 50% συζευγνύεται στην πρώτη τάξη περίθλασης, το φράγμα περίθλασης τοποθετείται πάνω σε αλουμίνιο το οποίο είναι στερεωμένο πάνω στη βάση θωράκισης.



Σχ.1.17 Σχηματικό διάγραμμα ενός απλού συστήματος laser εξωτερικής κοιλότητας συντονισμού κατόπτρου, το οποίο αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: βάση του laser, κάτοπτρο, και σχάρα. Ο ψύκτης Peltier του laser, και ο ευθυγραμμιστής είναι όλα ενσωματωμένα σε μία σταθερή βάση laser. LD: βάση laser, PZT: πιεζοηλεκτρικός σωλήνας.

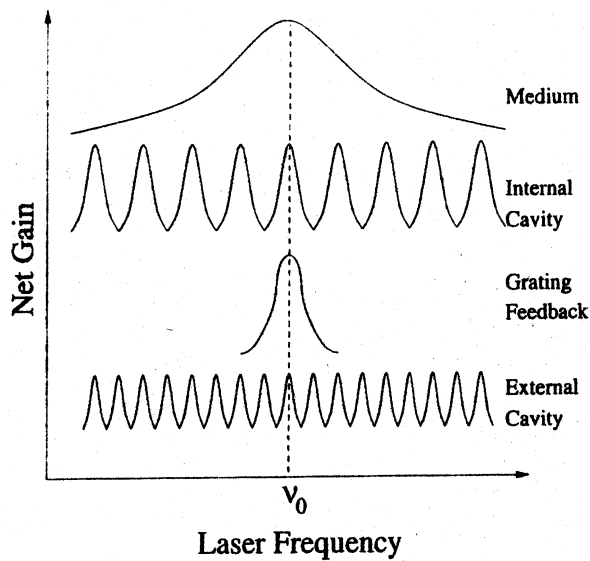
Η οπτική ανάδραση για να μειώσουμε το εύρος ζώνης και για την σταθεροποίηση του διοδικού laser έχει συζητηθεί νωρίτερα. Ένα διοδικό laser τείνει να εκπέμπει σε συχνότητα τρόπου ταλάντωσης με το μεγαλύτερο καθαρό κέρδος. Το Σχ.1.18 δείχνει τις

διάφορες συνεισφορές στην εικόνα απολαβής του laser. i)το μέσο laser, αυτό εξαρτάται από το υλικό της διόδου laser και συγκεκριμένα από το διάστημα ζώνης. Η απολαβή από αυτή τη συνεισφορά μας δείχνει ένα ευρύ φάσμα, του οποίου το μέγιστο εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία του τσίπ. ii)Η εσωτερική κοιλότητα, η επαφή της διόδου δημιουργεί ένα μικρό Etalon, το οποίο συνεχίζει να επηρεάζει την καμπύλη απολαβής ακόμη και αν μία από τις επιφάνειες έχουν επικάλυψη AR. Η λειτουργία απολαβής της κοιλότητας ολισθαίνει σε συχνότητα με τις αλλαγές στην θερμοκρασία της διόδου και του ρεύματος. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, τα μέγιστα και της απολαβής του μέσου laser αλλά και της απολαβής της εσωτερικής κοιλότητας ολισθαίνουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Όμως δεν ολισθαίνουν με τον ίδιο ρυθμό, και το αποτέλεσμα είναι ότι ο τρόπος ταλάντωσης του laser αναπηδά σε διαφορετικά μέγιστα της συνάρτησης απολαβής κοιλότητας. Για αυτό τον λόγο μία τυπική δίοδος laser χωρίς επικάλυψη και χωρίς ανάδραση δεν μπορεί να συντονιστεί σε οποιοδήποτε αυθαίρετο μήκος κύματος. iii)Η ανάδραση πύλης, υποθέτοντας το όριο περίθλασης του φράγματος περίθλασης, το φασματικό εύρος $\Delta\nu$ πρώτης τάξεως το οποίο προσεγγιστικά είναι ίσο με $\nu/\Delta\nu = N$, όπου ν η συχνότητα και N είναι ο αριθμός γραμμών της σχάρας που αντίκειται στην δέσμη laser. Συνήθως το $\Delta\nu$ κυμαίνεται από δεκάδες έως εκατοντάδες GHz. Η θέση του μέγιστου καθορίζεται από την θέση της σχάρας. iv)Η εξωτερική κοιλότητα, η οπίσθια επιφάνεια του laser και η σχάρα αποτελεί την εξωτερική κοιλότητα, της οποίας η καμπύλη μεταβάλλεται αλλάζοντας την θέση της σχάρας. Μία ελεύθερη φασματική περιοχή συντονίζεται μετακινώντας το φράγμα περίθλασης κατά ένα μήκος κύματος. Το φράγμα περίθλασης περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα περιστροφής ενώ μεταφράζει, αλλάζοντας την συνάρτηση απολαβής του φράγματος περίθλασης ώστε το μέγιστο της να ακολουθεί μερικώς το μέγιστο της εξωτερικής κοιλότητας. Αυτό αυξάνει την περιοχή συντονισμού του laser.

Η οπτική ευθυγράμμιση του laser εξωτερικής κοιλότητας απαιτεί ακρίβεια και επιδεξιότητα. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι ώστε να έχουμε οπτική ανάδραση και να πάρουμε την επιθυμητή συχνότητα ν_0 μονού τρόπου ταλάντωσης, η απολαβή κάθε ενός των συστατικών θα πρέπει να έχει μέγιστο στην ν_0 όπως φαίνεται στο Σχ1.18. Παρακάτω έχουμε δύο συνηθισμένους τρόπους για να επιτύχουμε οπτική ανάδραση.

1.3.3.1 Ρεύμα κατωφλιού

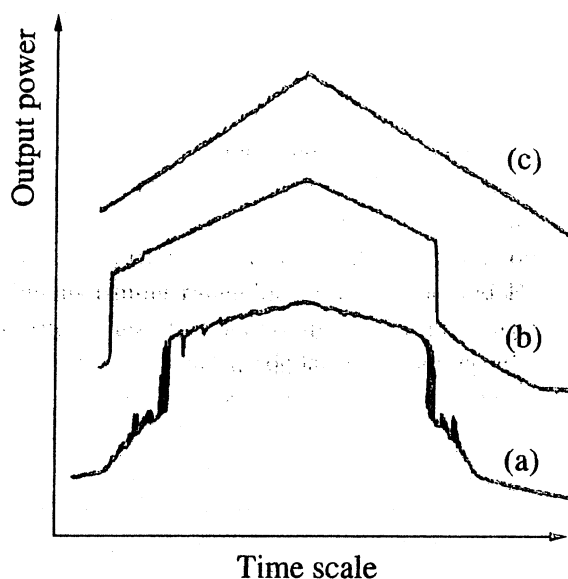
Ξεκινούμε θέτοντας το ρεύμα άντλησης τέτοιο ώστε το laser να λειτουργεί ελαφρώς κάτω από το κατώφλι. Ρυθμίζοντας βίδες μικρορύθμισης, οι δύο φωσφορίζουσες δέσμες που εμφανίζονται από το φράγμα περίθλασης, (η μία δέσμη είναι πολύ πιο ασθενής από την κύρια διότι έχει κάνει μία πλήρη κυκλική διαδρομή μέσα στην κοιλότητα laser) φέρνονται σε σημείο να είναι μαζί μέχρι σχεδόν να υπερκαλύπτονται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μία απότομη αύξηση της φωτεινότητας της εκπομπής laser. Το ρεύμα άντλησης μετά μειώνεται μέχρι να εξαφανιστεί η δράση laser και επαναλαμβάνεται η ευθυγράμμιση. Μία αρκετά καλή ευθυγράμμιση επιτυγχάνεται μειώνοντας το ρεύμα κατωφλιού κατά 10~15% σε σύγκριση με το ρεύμα κατωφλιού της διόδου σε ελεύθερη λειτουργία.



Σχ.1.18 Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων οπτικών στοιχείων της απολαβής διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας.

1.3.3.2 Ισχύς εξόδου

Ξεκινούμε ελέγχοντας την ισχύ εξόδου ως συνάρτηση του ρεύματος άντλησης, μία τριγωνική κλίμακα εφαρμόζεται στο ρεύμα άντλησης. Ελέγχοντας την ισχύ εξόδου του ECDL με μία φωτοδίοδο μεγάλης περιοχής και ένα παλμογράφο παίρνουμε την καμπύλη L-I με οπτική ανάδραση όπως φαίνεται στο Σχ.1.19(a). Όταν υπάρχει ανάδραση από την εκτεταμένη κοιλότητα, θα έχουμε απότομες ασυνεχείς μεταβολές στην συμπεριφορά κατωφλιού. Επαναλαμβανόμενες ρυθμίσεις της εστίασης και της ευθυγράμμισης της εκτεταμένης κοιλότητας θα έχουν ως αποτέλεσμα το σχεδιάγραμμα όπως φαίνεται στο Σχ.1.19(c). Η δεύτερη μέθοδος είναι απλή και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη στην ευθυγράμμιση των ECDL. Επίσης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μία κάμερα CCD για τον έλεγχο των αλλαγών της έντασης ώστε να πάρουμε την βέλτιστη ανάδραση.



Σχ.1.19 Ισχύς εξόδου του ECDL σε αντιπαράθεση με το ρεύμα εισροής, το οποίο σαρώνει κοντά στο σημείο κατωφλιού με μορφή τριγωνικού κύματος. Τρεις καμπύλες L-I φαίνονται για διαφορετικές ευθυγραμμίσεις κοιλότητας. Καμπύλη (a) φτωχή ευθυγράμμιση και λειτουργία πολλαπλών τρόπων ταλάντωσης, (b) απότομη αναπήδηση σημαίνοντας την λειτουργία μονού τρόπου ταλάντωσης, (c) βέλτιστη ευθυγράμμιση.

1.4 Γεωμετρία για καταστολή αναπήδησης τρόπου ταλάντωσης.

Σε αυτό το τμήμα περιγράφουμε τις γεωμετρίες οι οποίες επιτρέπουν την σάρωση διοδικών laser μονού τρόπου για διατάξεις Littrow και Littman-Metcalf, αντίστοιχα.

1.4.1 Διάταξη Littrow

Η καταστολή αναπήδησης του τρόπου ταλάντωσης σε ένα συντονιζόμενο laser με τη χρήση φράγματος περίθλασης Littrow, μπορεί να επιτευχθεί με ταυτόχρονη σάρωση της γωνίας του φράγματος περίθλασης Littrow και του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας. Ο πιο απλός τρόπος για να πάρουμε τέτοιες συζευγμένες κινήσεις είναι η περιστροφή του φράγματος περίθλασης Littrow γύρω από κάθετο άξονα. Έχει αποδειχθεί ότι το βέλτιστο σημείο περιστροφής μπορεί να μας δώσει μέγιστη περιοχή συνεχούς συντονισμού. Είναι δυνατόν να συντονίσουμε το laser σε μήκος κύματος σε μεγάλες περιοχές από 240nm έως 1450nm με διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας, αλλά με αναπηδήσεις τρόπου ταλάντωσης. Όμως μία συνεχής περιοχή συντονισμού από 15 nm γύρω στα 1300nm χωρίς αναπήδηση τρόπου έχει επιτευχθεί με τα ίδια ECDL και με μία απλή μηχανική διάταξη. Σε τέτοια laser, η γωνία του φράγματος περίθλασης ελέγχει το μήκος κύματος λ_r με ελάχιστες απώλειες. Πάντως, το μήκος κύματος λειτουργίας του laser εξαρτάται επίσης από το μήκος της κοιλότητας το οποίο καθορίζει της θέσεις των τρόπων ταλάντωσης συντονισμού. Συνεχής συντονισμός παρέχεται εάν το μήκος κύματος συντονισμού λ_q του αριθμού διαμήκους τρόπου q και το μήκος κύματος ελάχιστης απώλειας λ_r , ολισθήσουν φασματικά με τον ίδιο ρυθμό ώστε να κρατήσουν την λειτουργία laser σε περιοχή χαμηλής απώλειας. Μία τέτοια συνθήκη μπορεί να πληρείται με τη χρήση συνδυασμού περιστροφής-μετατόπισης της θέσης σχάρας υπερβαίνοντας την πολυπλοκότητα του μηχανικού σχεδιασμού της σταθεροποίησης.

Μπορούμε να συντονίσουμε ένα laser μονού τρόπου μετακινώντας το φράγμα περίθλασης. Για να καταλάβουμε πως αλλάζει η συχνότητα όταν μετακινούμε το φράγμα περίθλασης, ερευνούμε διαφορετικές περιπτώσεις. Στο Σχ.1.20 (a), το φράγμα περίθλασης μετακινείται κατά μήκος της διεύθυνσης της δέσμης laser, η ταλάντωση του στασίμου κύματος μέσα στην κοιλότητα θα τεντωθεί, με αποτέλεσμα τον συνεχή συντονισμό της συχνότητας. Αλλά ενώ αλλάζει η συχνότητα, αυτό το τέντωμα επίσης διαφοροποιεί την γωνία περίθλασης από το φράγμα περίθλασης, και μετά από λίγο, ένας τρόπος ταλάντωσης με άλλη μία ημιπερίοδο κύματος μέσα στην κοιλότητα θα στοχεύει απευθείας προς το κάτοπτρο, δηλ. ο τρόπος αυτός θα έχει χαμηλές απώλειες, οδηγώντας σε μία απότομη αναπήδηση πίσω σε συχνότητα όπως φαίνεται στη δεξιά πλευρά του Σχ.1.20 (a). Εάν, όμως, η σχάρα μετακινηθεί κάθετα προς την δέσμη όπως φαίνεται στο Σχ.1.20 (b), η απόσταση ανάμεσα από την όποια αυλάκωση της σχάρας και το κάτοπτρο δεν αλλάζει, που σημαίνει ότι ακόμη κι αν η κοιλότητα γίνεται μακρύτερη, δεν υπάρχει αλλαγή στη συχνότητα. Μπορούμε επίσης να αλλάξουμε την συχνότητα του laser αλλάζοντας τη γωνία της σχάρας, συνεπώς επιλέγοντας τη συχνότητα ανάδρασης προς το κάτοπτρο. Εάν η σχάρα περιστραφεί γύρω από το κεντρικό σημείο της δέσμης, όπως φαίνεται στο Σχ.1.20 (c), η συχνότητα της κοιλότητας στη μέση της δέσμης δεν θα αλλάξει. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση της συχνότητας έως ο επόμενος πιθανός τρόπος να έχει χαμηλές απώλειες, και τότε ο τρόπος ταλάντωσης του laser αναπηδά στην επόμενη νέα συχνότητα.

Πως θα πρέπει να κινηθεί η σχάρα εάν θέλουμε να επιτύχουμε συνεχή συντονισμό χωρίς αναπήδηση τρόπου; Είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε μία περιστροφή του φράγματος περίθλασης μόνο για να βελτιστοποιήσουμε την ακριβή θέση του άξονα περιστροφής για να έχουμε βέλτιστο συνεχή συντονισμό μήκους κύματος. Το σχηματικό διάγραμμα του ECDL φαίνεται στο Σχ1.21. Η τομή του άξονα του laser και του επιπέδου της σχάρας σηματοδοτείται με το G, η αρχή του άξονα στο σημείο O ορίζεται ως OG=L, όπου L το οπτικό μήκος της κοιλότητας laser. Η πρώτη τάξη περίθλασης της σχάρας ανακλάται πίσω στην κοιλότητα για γωνία περίθλασης θ . Για περίοδο σχάρας d, το λ_r δίδεται από

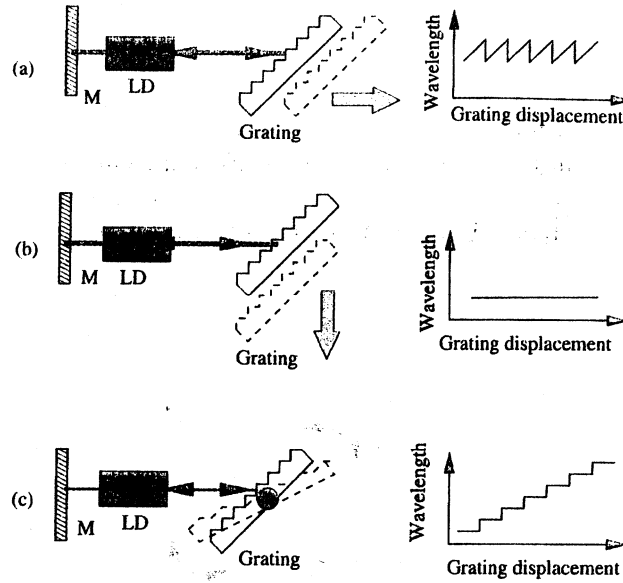
$$\lambda_r = 2d \sin \theta \quad (1.38)$$

Το μήκος κύματος συντονισμού του τρόπου κοιλότητας λ_q δίδεται από την γνωστή έκφραση $\lambda_q = 2L/q$, έχοντας υπόψη την μετάφραση της σχάρας στο επίπεδό της. Βρίσκουμε το λ_q ,

$$\lambda_q = \frac{2L}{q + t_0(\theta)/d}, \quad (1.39)$$

Όπου $t_0(\theta)$ είναι η απόσταση από το G προς ένα σημείο αυλάκωσης της σχάρας το οποίο θεωρείται ως αναφορά. Υποτίθεται ότι η σχάρα περιστρέφεται γύρω από άξονα $R(z_0, y_0)$ παράλληλο προς τις γραμμές της σχάρας και ότι πριν από τη όποια περιστροφή της σχάρας η αρχική της γωνία είναι θ_0 , το οπτικό μήκος της κοιλότητας είναι $L(\theta_0)=L_0$, και η συχνότητα του q-ιστού τρόπου ταλάντωσης είναι ακριβώς στην συχνότητα ελάχιστης απώλειας λ_r :

$$\lambda_q(L_0) = \lambda_r(\theta_0). \quad (1.40)$$



Σχ.1.20 Διαφορετικοί τρόποι μετακίνησης της σχάρας και η συνεπαγόμενη αλλαγή στο μήκος κύματος.

Όταν το φράγμα περίθλασης περιστρέφεται η γωνία θ αλλάζει και επομένως το λ_r ολισθαίνει. Ενδιαφερόμαστε για την διαφορά,

$$F(\theta) = \lambda_q(\theta) - \lambda_r(\theta), \quad (1.41)$$

η οποία είναι μηδέν για $\theta = \theta_0$ και πρέπει να παραμείνει μηδέν για το μεγαλύτερο δυνατό χρόνο για μεγάλη περιστροφή της σχάρας. Εάν η $F(\theta)$ παραμείνει μικρότερη από το μισό του διαστήματος $\Delta\lambda$ του τρόπου ταλάντωσης κοιλότητας, ο q-ιστός τρόπος θα παραμείνει κυρίαρχος και δεν θα εμφανιστεί αναπήδηση τρόπου όσο συντονίζεται το μήκος κύματος. Επομένως, η συνθήκη για καταστολή αναπήδησης τρόπου είναι

$$|F(\theta)| < \Delta\lambda / 2, \quad (1.42)$$

Αυτή η συνθήκη λαμβάνεται για $\theta = \theta_0$ και μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλες $(\theta - \theta_0)$ τιμές εάν οι παράγωγοι της $F(\theta)$ φθίνουν για $\theta = \theta_0$.

Με χρήση των εξισώσεων (1.38) και (1.39), η εξ.(1.41) μπορεί να γραφεί ως

$$F(\theta) = \frac{2L(\theta)}{q + t_0(\theta)/d} - 2d \sin \theta. \quad (1.43)$$

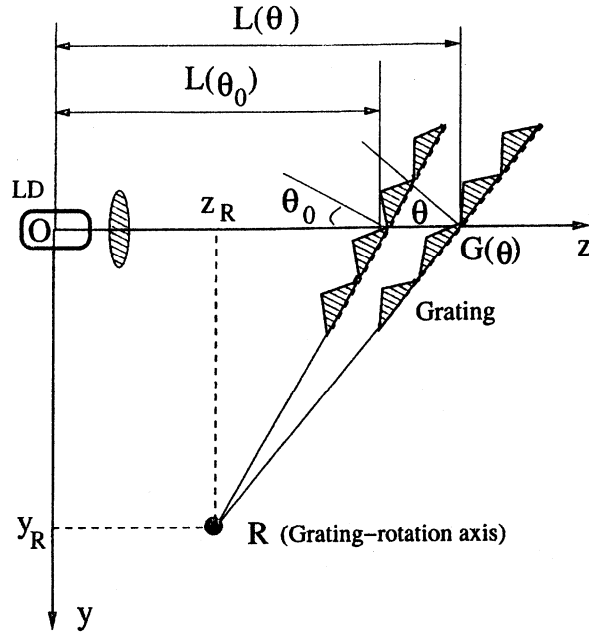
Για απλότητα, υποτίθεται ότι για $(\theta = \theta_0)$ η επιφάνεια της σχάρας αναφοράς είναι ακριβώς επάνω στον άξονα laser [$t_0(\theta_0) = 0$] και ότι υπάρχει ένας τρόπος συντονισμού στο μήκος κύματος ελάχιστης απώλειας $F(\theta_0) = \lambda_q(\theta_0) - \lambda_r(\theta_0)$. Τότε η $F(\theta)$ μπορεί να γραφεί ως

$$F(\theta) = 2d \left[\frac{L(\theta) \sin \theta_0}{L_0 + t_0(\theta) \sin \theta_0} - \sin \theta \right], \quad (1.44)$$

για να καθορίσουμε τα βέλτιστα σημεία περιστροφής, παίρνουμε την πρώτη παράγωγο της $F(\theta)$,

$$F'(\theta_0) = 2d \left[\frac{L'(\theta_0) \sin \theta_0 - t_0'(\theta_0) \sin^2 \theta_0}{L_0} - \cos \theta_0 \right],$$

(1.45)



Σχ.5.21 Σχηματικό διάγραμμα διάταξης laser.

Στην πρώτη τάξη κοντά στη συνθήκη $\theta = \theta_0$ έχουμε

$$t_0(\theta_0) = \left[\frac{L(\theta_0) - z_R}{\cos \theta_0} \right] (\theta - \theta_0), \quad (1.46)$$

το οποίο δίνει

$$t_0'(\theta_0) = \left[\frac{L_0 - z_R}{\cos \theta_0} \right], \quad (1.47)$$

το $L'(\theta_0)$ μπορεί να υπολογιστεί από την έκφραση για $L(\theta)$, η οποία προέρχεται από την γεωμετρία για το Σχ.5.21, η οποία δίδεται από

$$L(\theta) = -y_R \left[\frac{\sin \theta_0}{\cos \theta} - \tan \theta \right] - z_R \left[\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} - 1 \right] + L_0 \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}, \quad (1.48)$$

και είναι εύκολο να βρούμε ότι η $F'(\theta_0) = 0$ για

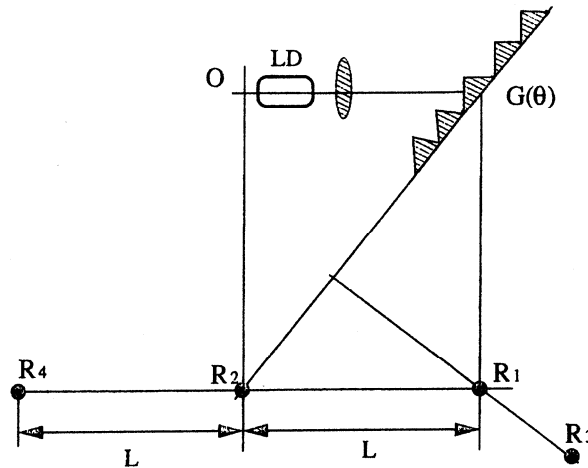
$$y_R = \frac{L_0}{\tan \theta_0}. \quad (1.49)$$

Επομένως, το βέλτιστο σημείο περιστροφής το οποίο παρέχει συνεχόμενο συντονισμό στην πρώτη τάξη είναι το σημείο της γραμμής R_1R_2 όπως φαίνεται στο Σχ.1.22. Εάν

γράψουμε τώρα την έκφραση της $F(\theta)$ στην δεύτερη τάξη για το σημείο της γραμμής R_1R_2 και χρησιμοποιήσουμε την τιμή του z_R από την Εξ.(1.49), παίρνουμε

$$F(\theta) = d \sin(\theta_0) \left(\frac{z_R}{L_0} + 1 \right) (\theta - \theta_0)^2, \quad (1.50)$$

η οποία ακυρώνεται για $z_R = -L_0$. Επομένως το βέλτιστο σημείο περιστροφής το οποίο παρέχει συνεχή συντονισμό στην δεύτερη τάξη της $F(\theta)$ είναι το R_4 όπως φαίνεται στο Σχ.1.22.



Σχ.1.22 Συγκεκριμένοι άξονες περιστροφής : το R_4 είναι το βέλτιστο σημείο περιστροφής. LD: δίοδος laser, G: σχάρα.

1.4.2 Littman-Metcalf

Εδώ περιγράφουμε μία γεωμετρία η οποία επιτρέπει την σάρωση για μονό τρόπο διοδικών laser για διάταξη Littman-Metcalf. Έχει συζητηθεί ότι η σωστή επιλογή άξονα περιστροφής της σχάρας μπορεί να παρέχει ταυτόχρονες αλλαγές στο μήκος της κοιλότητας και στη γωνία περίθλασης οι οποίες πληρούν τις απαιτήσεις οι οποίες χρειάζονται για συνεχόμενη σάρωση μονού τρόπου.

Η βασική γεωμετρία του διοδικού laser διαμήκη μονού τρόπου ταλάντωσης και πρόσπτωσης-αμυχής φαίνεται σχηματικά στο Σχ.1.23 όπως προτάθηκε από τον Liu. Ο συντονισμός επιτυγχάνεται απλά περιστρέφοντας ένα κάτοπτρο. Επιλέγοντας προσεκτικά την θέση του σημείου περιστροφής γύρω από το οποίο περιστρέφεται το κάτοπτρο. Μπορούμε να σαρώσουμε ταυτόχρονα το μήκος της κοιλότητας και την γωνία ανάδρασης της σχάρας, επιτρέποντας έτσι μία συνεχή μονού τρόπου σάρωση σε μία περιορισμένη περιοχή. Έχει βρεθεί ότι είναι δυνατόν να καθορίσουμε τέτοιο σημείο περιστροφής ώστε να πληρεί την συνθήκη ανίχνευσης ακριβώς σε όλη την περιοχή συντονισμού της σχάρας.

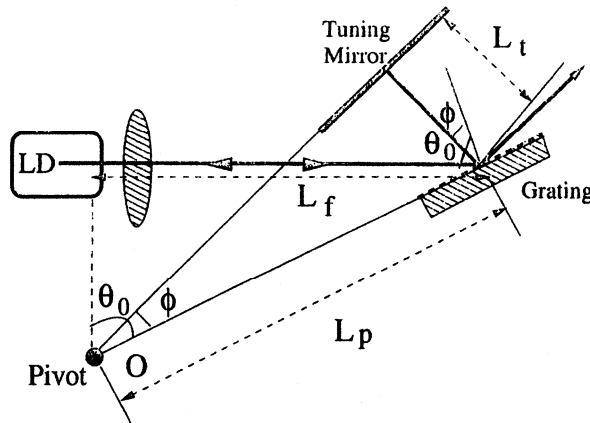
Για να επιτύχουμε την ανίχνευση είναι αναγκαίο να ικανοποιούνται οι ακόλουθες δύο εξισώσεις της διάταξης Littrow, οι οποίες μαζί καθορίζουν το μήκος κύματος του laser:

$$\lambda_r = \frac{d}{p} (\sin \theta_0 + \sin \phi), \quad (1.51)$$

και

$$\lambda_q = \frac{2L(\phi)}{q} = \frac{2}{q}(L_f + L_t(\phi)), \quad (1.52)$$

όπου $L(\phi)$ είναι το μήκος της οπτικής κοιλότητας (L_f είναι η οπτική απόσταση μεταξύ της σχάρας) και του στερεωμένου κατόπτρου. $L_t(\phi)$ είναι η οπτική απόσταση μεταξύ της σχάρας και του κατόπτρου συντονισμού, q είναι ο αριθμός τρόπου, d είναι η περίοδος σχάρας, p η τάξη της περίθλασης, θ_0 είναι η γωνία πρόσπτωσης, και ϕ είναι η γωνία περίθλασης. Εάν επιλέξουμε τον άξονα περιστροφής να είναι η τομή των επίπεδων επιφανειών της σχάρας και του κατόπτρου



Σχ.1.23 Το παλμικό Dye laser με πρόσπτωση-αμυχής με γεωμετρία αυτοανίχνευσης.

συντονισμού, και αναδείξουμε την απόσταση μεταξύ του κέντρου της γωνίας σχάρας και του άξονα περιστροφής με το L_p , τότε η $L(\phi)$ είναι απλά

$$L(\phi) = L_f + L_p \sin \phi, \quad (1.53)$$

αντικαθιστώντας αυτό το αποτέλεσμα στην Εξ.(1.52) μας δίνει

$$\lambda_r = \frac{2}{q}(L_f + L_p \sin \phi). \quad (1.54)$$

Η σύγκριση των Εξ.(1.51) και (1.54) μας αποκαλύπτει ότι εάν

$$\frac{2}{q}L_f = \frac{d}{p} \sin \theta_0, \quad (1.55)$$

και

$$\frac{2}{q}L_p = \frac{d}{p}, \quad (1.56)$$

τότε η ανίχνευση επιτυγχάνεται με ακρίβεια για όλα τα προσβάσιμα μήκη κύματος. Για την περίπτωση της πρόσπτωσης αμυχής έχουμε την πρόσθετη συνθήκη $\sin \theta_0 \approx 1$ έτσι

ώστε ο περιστροφέας να βρίσκεται σε απόσταση $L_p \approx L_f$. Το προτεινόμενο σχήμα σάρωσης laser μας επιβάλλει όντως σοβαρές απαιτήσεις όσον αφορά τη βάση περιστροφής που χρησιμοποιείται για το κάτοπτρο συντονισμού. Συγκεκριμένα, μία μηχανική μετατόπιση μισού μήκους κύματος θα έχει ως αποτέλεσμα την αναπήδηση τρόπου. Πρέπει προσεχθεί η θέση περιστροφής ώστε να είναι τοποθετημένη σωστά.

Δυστυχώς, ο μηχανικός συντονισμός είναι αργός σε όλες τις διατάξεις ECDL ,και είναι δύσκολο να επιτύχουμε μεγάλες αναλογίες επαναλήψεων, συντονισμό υψηλής συχνότητας, και καλή ικανότητα επαναπαραγωγής. Για να ξεπεράσουμε αυτά τα προβλήματα, μπορούμε αντί να μετακινούμε την σχάρα μηχανικά, να συντονίσουμε την συχνότητα laser ηλεκτρονικά. Θα τα εξερευνήσουμε με περισσότερη λεπτομέρεια στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 2^ο

A) Τρόποι συντονισμού ενός laser ECDL:

Εφαρμογή συντονιζόμενων διοδικών laser εξωτερικής κοιλότητας

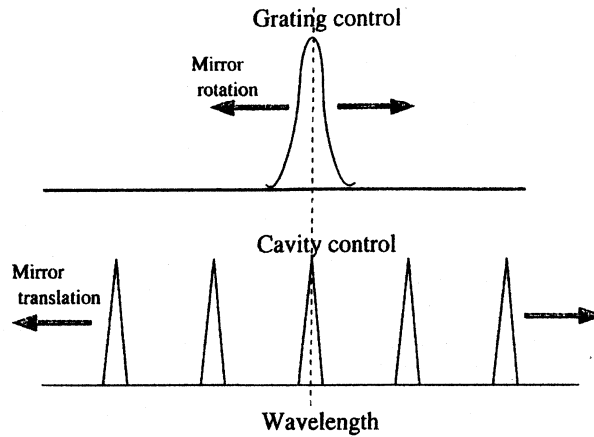
Στο προηγούμενο κεφάλαιο, ασχοληθήκαμε με συστήματα διοδικών laser εξωτερικής κοιλότητας, και παρουσιάσαμε διάφορες διατάξεις και προσεγγίσεις για την επίτευξη συνεχούς συντονισμού μονού τρόπου. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα δείξουμε τους διάφορους τρόπους υλοποίησης συστημάτων διοδικών laser εξωτερικής κοιλότητας. Τα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας με ευρεία περιοχή συνεχούς συντονισμού πραγματοποιούνται με μηχανικό και μικροηλεκτρομηχανικό συντονισμό των εξωτερικών κατόπτρων ή των φραγμάτων περίθλασης ταυτόχρονα. Τα ηλεκτρονικώς συντονιζόμενα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας δημιουργούνται με την χρήση ακουστο- και ηλεκτρο-οπτικών συντονιζόμενων φίλτρων και με χωροδιαμορφωτές φωτός υγρού κρυστάλλου. Τελικώς, αναπτύσσουμε κάποια συντονιζόμενα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας όπως τα μπλέ ιώδη και τα υψηλής ισχύος.

2.1 ECDL συνεχώς συντονιζόμενα σε ευρεία περιοχή

Περιγράφουμε σε αυτήν την ενότητα την ικανότητα συνεχούς συντονισμού στα 82nm με μηχανικό συντονισμό του κατόπτρου και του φράγματος περίθλασης ταυτόχρονα. Εισάγουμε επίσης τα συνεχώς συντονιζόμενα σε ευρεία περιοχή διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας τα οποία βασίζονται σε μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα σε διάφορες μορφές.

2.1.1 Μηχανικός ευρύς συντονισμός

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, εάν ο συντονισμός του μήκους κύματος γίνεται απλά περιστρέφοντας την σχάρα χωρίς την μετατόπιση της, θα έχουμε αναπήδηση τρόπου εξωτερικής κοιλότητας για ένα FSR της κοιλότητας του laser, το οποίο είναι τυπικά 3 GHz για κοιλότητα μήκους 5cm. Η συνεχής ικανότητα συντονισμού χωρίς αναπήδηση διαμήκους τρόπου μπορεί να παραληφθεί από το ECDL με συνδυασμένη περιστροφή-μετατόπιση της σχάρας, όπως φαίνεται στο Σχ.2.1. Η σύγχρονη περιστροφή και μετατόπιση του κατόπτρου συντονισμού καταστέλλει την αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης. Η πρώτη επίδειξη αυτής της τεχνικής έχει αναφερθεί να έχει εύρος 15nm έως 1226nm χωρίς αναπήδηση τρόπου.

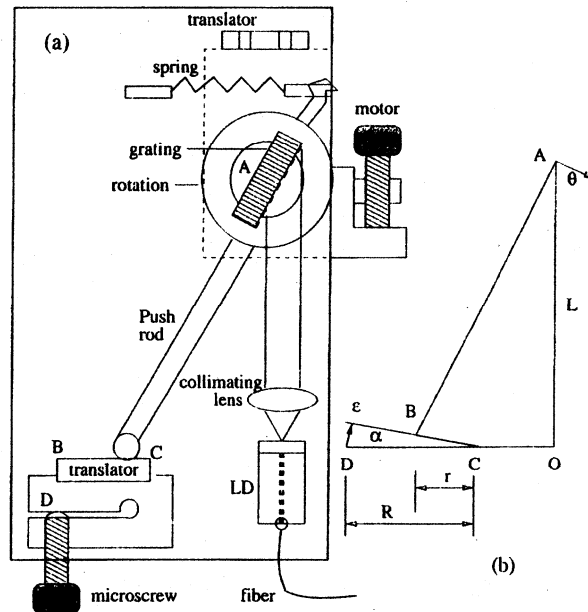


Σχ.2.1 Σχηματικό διάγραμμα συνεχούς συντονισμού με συνδυασμό περιστροφής και μετάφρασης.

Ένα βελτιωμένο ECDL με μήκος κύματος λειτουργίας γύρω στα 1540nm με ικανότητα συντονισμού μήκους κύματος σε ένα εύρος 82nm με αναπήδηση τρόπου έχει επιδειχθεί από τους Favre και Le Guen (1991) , η διάταξη φαίνεται σχηματικά στο Σχ.2.2(a). Το ημιαγωγικό laser των 1.55 μm θαμμένης έχει επικάλυψη AR στην μία επιφάνεια με εναπομένονσα ανακλαστικότητα μειούμενη από 10^{-4} σε $\lambda=1550$ nm έως 10^{-5} σε $\lambda=1582$ nm. Η έξοδος της επιφάνειας με επικάλυψη AR ευθυγραμμίζεται πάνω σε φράγμα περίθλασης με 1200 αυλακώσεις/mm με φακό 0.615 NA με εστιακό μήκος 6.5 mm, το οπτικό μήκος της κοιλότητας ECDL είναι 50 mm σε $\lambda=1540$ nm. Η έξοδος απομονώνεται με οπτικό απομονωτή με ποσοστό απόσβεσης 60dB. Η περιστροφή του φράγματος περίθλασης γύρω από την κεντρική γραμμή A είναι μηχανικά ελεγχόμενη με μία ράβδο πίεσης, η άκρη της οποίας κινείται ελεύθερα κατά μήκος του άξονα CB. Η περιστρεφόμενη σχάρα είναι στερεωμένη πάνω σε έναν περιστροφέα με κινητήρα ο οποίος ελέγχει την ταυτόχρονη αλλαγή του μήκους L της κοιλότητας και της γωνίας πρόσπτωσης θ της σχάρας.

Έχουμε εκπομπή μονού τρόπου όταν το μήκος κύματος λ_q ενός τρόπου ταλάντωσης του ECDL ταιριάζει με το μήκος κύματος λ_r της σχάρας σε συνθήκες αμοιβαίας ανάκλασης. Ο διαφορικός μικρομετρικός κοχλίας ρύθμισης ο οποίος φαίνεται στο Σχ.2.2(a) χρησιμοποιείται για τη μικρομετρική ρύθμιση του λ_r περιστρέφοντας ελαφρώς το φράγμα περίθλασης χωρίς να αλλάζει το μήκος L της κοιλότητας. Ο αποσυντονισμός μήκους κύματος κατά τον οποίο η εκπομπή ECDL κλειδώνεται σε έναν διαμήκη τρόπο ταλάντωσης έχει βρεθεί πειραματικά ότι είναι ίσος με την ελεύθερη φασματική περιοχή της κοιλότητας ECDL. Η συνθήκη συνεχούς συντονισμού ικανοποιείται εάν το λ_r και το λ_q μπορούν να μεταβληθούν με την ίδια αναλογία η οποία απαιτεί το $AB=L/\sin\theta$ να είναι σταθερό στην περιοχή συντονισμού όπως φαίνεται στο Σχ.2.2(b). Η διαδικασία μηχανικού συντονισμού συμπεριλαμβάνει την ρύθμιση του άξονα CB με τον μικρομετρικό κοχλία ώστε να μεγιστοποιήσουμε την περιοχή συνεχούς συντονισμού χωρίς να έχουμε αναπήδηση τρόπου. Η μέγιστη περιοχή συνεχόμενου συντονισμού $\Delta\lambda$ μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του μικρομετρικού αποσυντονισμού $\delta \in$, και δίδεται από

$$\Delta\lambda = \frac{R\lambda^2}{2\delta \in (L \tan \theta - r)} , \quad (2.1)$$



Σχ.2.2 Διάταξη laser εξωτερικής κοιλότητας. (a) Τοποθέτηση (b) ισοδύναμο σχήμα γεωμετρίας, $L=50\text{cm}$, $r=7\text{mm}$, $R=24\text{mm}$. όπου λ είναι το μέσο μήκος κύματος και r και R είναι οι μηχανικές αποστάσεις όπως καθορίζονται στο Σχ.2.2 (b).

2.1.2 Μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό σύστημα ευρέος συντονισμού

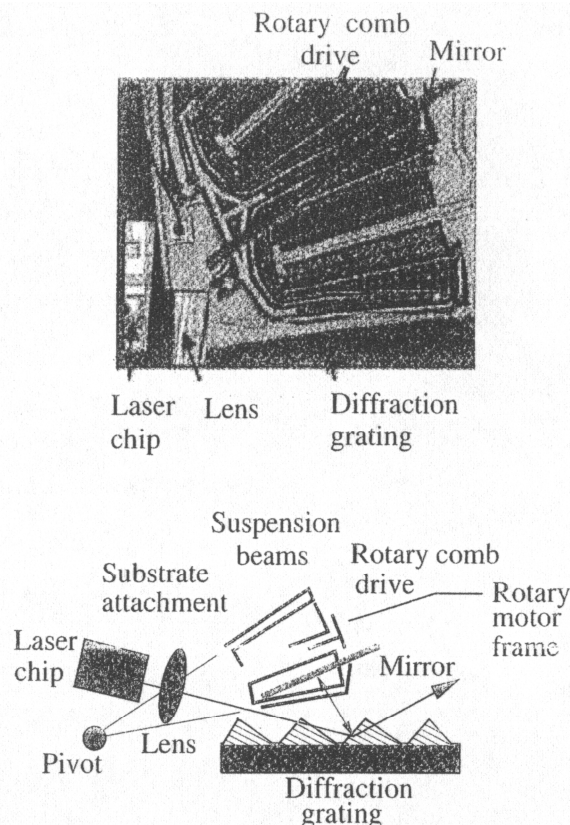
Τα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας τα οποία βασίζονται σε συμβατικά laser ημιαγωγού διόδου με κυματοδηγό λωρίδας και σε πιεζοηλεκτρικά ελεγχόμενο φράγμα περίθλασης πρόσπτωσης αναπτύχθηκαν αρχικώς στην αρχή της δεκαετίας 80' από τις BTRL και CNET. Πιο πρόσφατα, τα laser ημιαγωγών έχουν συνδυαστεί με κάτοπτρα και φράγματα περίθλασης πάνω σε μικρομηχανικούς ηλεκτροστατικούς μηχανισμούς των NEC, Iolon, Fujitsu, Santur, και Agility ανεξάρτητα η κάθε μία. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η μείωση σε μέγεθος και κόστος, σε συνδυασμό με βελτίωση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας.

Τα παραδοσιακά ECDL συντονίζονται πιεζοηλεκτρικά με ογκώδη οπτομηχανικό μηχανισμό. Έχει παροσιαστεί ένα νέο υψηλής ισχύος, ευρέως συντονιζόμενο διοδικό laser εξωτερικής μικροκοιλότητας βασιζόμενο σε ένα μικροηλεκτρομηχανικό σύστημα (MEMS) έναν ηλεκτροστατικό ενεργοποιητή. Ένα σχηματικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχ.2.3 και είναι ένα διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας Littman-Metcalf το οποίο συντονίζεται με έναν MEMS ενεργοποιητή πυριτίου. Η πηγή φωτός είναι ένα InGaAsP/InP διοδικό laser πολυκρυσταλλικού πηγαδιού με υψηλή ισχύ εξόδου και μήκος κύματος $1.55\mu\text{m}$. Η ανάκλαση της επιφάνειας διακοιλότητας της διόδου laser καταστέλλεται με τη χρήση επικάλυψης αντανάκλαστικότητας (ανακλαστικότητα $<2 \times 10^{-3}$) σε συνδυασμό με κεκλιμμένη επιφάνεια, ώστε να είναι δυνατόν η δραστηρική ανακλαστικότητα της επιφάνειας να είναι μικρότερη από $<10^{-4}$.

Η δέσμη εξόδου του laser ευθυγραμμίζεται προς την οπίσθια επιφάνεια της διόδου, η οποία ενεργεί ως ο συζεύκτης εξόδου του ταλαντωτή. Το φως που αναδύεται από την διακοιλότητα επιφάνεια της διόδου ευθυγραμμίζεται από έναν μικροοπτικό φακό περιορισμένης διάθλασης και μετά περιθλάται με πρόσπτωση αμυχής από μία σχάρα περίθλασης ελεύθερου χώρου. Η απευθείας ανακλώμενη μηδενικής τάξεως δέσμη καθιστά την έξοδο του laser, ενώ η πρώτης τάξεως περιθλώμενη δέσμη laser διαδίδεται

προς το εξωτερικό κάτοπτρο στερεωμένο εκτός επιπέδου πάνω σε περιστροφικό μικρο-ενεργοποιητή πυριτίου.

Ο συντονισμός μήκους κύματος επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας μία τάση στον μικρο-ενεργοποιητή ο οποίος περιστρέφει το κάτοπτρο για να επιτρέψει ένα συγκεκριμένο περιθλώμενο μήκος κύματος να συζευχθεί πίσω μέσα στην δίοδο laser. Το συγκεκριμένο μήκος κύματος της εξόδου του laser καθορίζεται από το εύρος ζώνης απολαβής της δίοδου, από την σκέδαση της σχάρας και από της δομές των τρόπων ταλάντωσης της εξωτερικής κοιλότητας. Το laser συντονίζεται εφαρμόζοντας τάση στα στοιχεία κτένας του MEMS ενεργοποιητή για να δημιουργήσει μία ηλεκτροστατική δύναμη που θα περιστρέψει το κάτοπτρο γύρω από τον ουσιαστικό άξονα του. Το περιθώριο μεταβολής γωνίας του ενεργοποιητή καθορίζει την περιοχή συντονισμού. Μία ποικιλία ενεργοποιητών των 150V με περιοχές μέχρι και $\pm 2.8^\circ$, έχουν χρησιμοποιηθεί για το συντονισμό περιοχής μήκους κύματος έως και 42nm. Ο γεωμετρικός άξονας περιστροφής του κατόπτρου μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να ρυθμίζει το μήκος της κοιλότητας. Το μήκος κύματος του laser το οποίο καθορίζεται από την γωνία περίθλασης μετά σαρώνει σύγχρονα με την ζώνη συχνότητων προώθησης του φίλτρου σχάρας, και το laser συντονίζεται συνεχόμενα χωρίς αναπήδηση τρόπου. Η τάση του ενεργοποιητή καθορίζει την συχνότητα του laser με ακρίβεια ανοιχτού βρόγχου σε 10GHz κατά προσέγγιση, και η συχνότητα μετά σταθεροποιείται σε ± 1.25 GHz με τη χρήση του σήματος σφάλματος από το κλειδίωμα του μήκους κύματος του etalon που βρίσκεται μέσα σε σερβομηχανισμό ο οποίος ρυθμίζει την θέση του κατόπτρου.

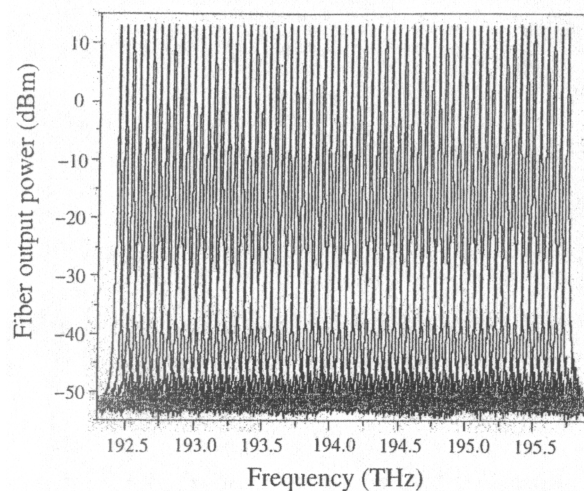


Σχ.2.3 Φωτογραφία μικρο-ECDL και σχεδιάγραμμα διάταξης κοιλότητας Littman-Metcalf με laser δίοδου, φακό ευθυγράμμισης, σχάρα περίθλασης, και εξωτερικό κάτοπτρο στερεωμένο πάνω σε έναν MEMS ενεργοποιητή περιστροφής. Επιτυγχάνεται συντονισμός χωρίς αναπήδηση τρόπου περιστρέφοντας το κάτοπτρο γύρω από ένα

εικονικό σημείο περιστροφής το οποίο ορίζεται από την τομή των δύο γραμμών που εκτείνονται από τις δέσμες ανάρτησης του ενεργοποιητή.

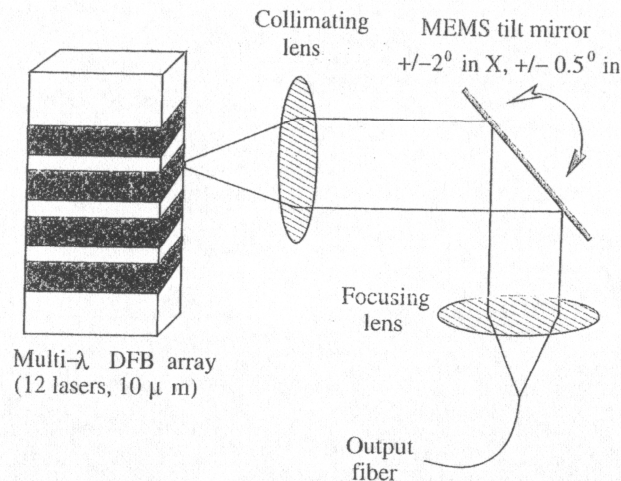
Η ευθυγραμμισμένη δέσμη εξόδου από το ECDL, με ισχύ εξόδου έως και 70mW, περνάει δια μέσου ενός απομονωτή και συζευγνύεται μέσα σε ένα ουραίο οπτικής ίνας διατήρησης πόλωσης (PM polarization maintaining) με αποτελεσματικότητα σύζευξης 65%. Ένας διαχωριστής δέσμης ανακλά το 5% του φωτός μέσα σε έναν ενσωματωμένο κλειδωτή μήκους κύματος. Το MEMS κλείστρο χρησιμοποιείται για την διακοπή της εξόδου για σκοτεινό συντονισμό, με σωστή εξωτερική ανάδραση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας ελεγχόμενος με τάση εξασθενητής (VOA voltage controlled attenuator). Η ικανότητα συντονισμού μήκους κύματος του ECDL που βασίζεται σε MEMS φαίνεται στο Σχ.2.4, το οποίο παρουσιάζει την υπέρθεση του φάσματος λειτουργίας laser κατά μήκος μίας περιοχής συνεχόμενου συντονισμού των 40nm. Έχει επιτευχθεί μέγιστη ισχύς εξόδου από το ECDL έως και 40mW. Ένα laser εξωτερικής κοιλότητας μπορεί επίσης να κατασκευαστεί εξολοκλήρου επάνω σε ένα τσίπ, χρησιμοποιώντας σχάρα χαραγμένη μέσα στον ημιαγωγό.

Ένα διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας βασισμένο σε ημιαγωγικό οπτικό ενισχυτή κυματοδηγού λωρίδας, σε σφαιροειδή φακό, και μία σχάρα περίθλασης κατασκευασμένη με κάθετη βαθιά χάραξη ραδιενεργών ιόντων επάνω σε πυρίτιο, έχει παρουσιαστεί πρόσφατα [Lohmann και Syms (2003)]. Η διαδικασία κατασκευής της σχάρας είναι πολύ απλή, ένα στρώμα πάχους 3μm αντιστάτη επικάθεται, σε σχήμα σκάλας με λιθογραφία επαφής, και ψήνεται για σκλήρυνση ώστε να ενεργήσει ως επιφανειακή μάσκα. Το πυρίτιο μετά χαράσσεται χρησιμοποιώντας μία κυκλική διαδικασία αδρανοποίησης χάραξης. Μετά από την χάραξη, ο εναπομένον αντιστάτης παίρνει μορφή λωρίδων μέσα σε κονιορτοποιητή πλάσματος, μετά η ανακλαστικότητα βελτιώνεται με χρήση ενός στρώματος ψεκασμένου χρυσού. Έχουν δοθεί τα χαρακτηριστικά της ζώνης συχνοτήτων που περνάει για την 12^η τάξη σχάρας, έχει επιδειχθεί ο συντονισμός ενός laser εξωτερικής κοιλότητας σε μία φασματική περιοχή πάνω από 120 nm, με μέγιστη ισχύ συζευγμένη μέσω οπτικής ίνας με μονό τρόπο ταλάντωσης στο 1mW και ποσοστό απόσβεσης παράπλευρων τρόπων ίσο με 30dB.



Σχ.2.4 Φάσμα λειτουργίας του ECDL επιδεικνύει τα 40nm συνεχούς περιοχής με >50dB ποσοστό απόσβεσης παράπλευρων τρόπων ταλάντωσης.

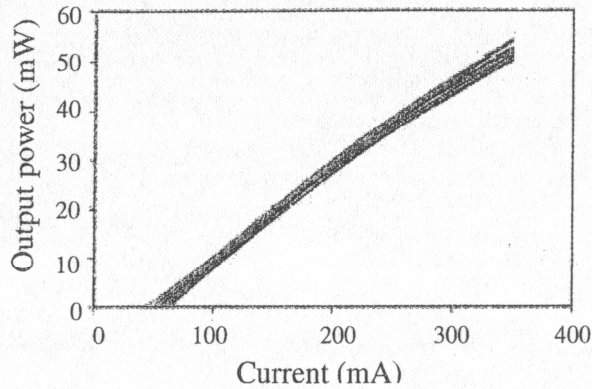
Μία νεωτεριστική διάταξη για laser συντονιζόμενο κατά μήκη κύματος έχει προταθεί και παρουσιαστεί, η οποία παρέχει ευρύ συντονισμό, λειτουργία κατανεμημένης ανάδρασης (distributed feedback = DFB) ,και αξιοπιστία για μία ομάδα DFB laser, ένα μικρομηχανικό κάτοπτρο έχει χρησιμοποιηθεί για την επιλογή ενός στοιχείου της ομάδας. Η κλίση του MEMS χαλαρώνει τις ανοχές αφού η οπτική ευθυγράμμιση ακριβείας γίνεται ηλεκτρονικά. Μόνο ένα laser χρησιμοποιείται τη φορά, με χονδρικό συντονισμό κατά την επιλογή του σωστού laser και μικρομετρικό συντονισμό ρυθμίζοντας τη θερμοκρασία του τσίπ.



Σχ.2.5 Σχηματικό διάγραμμα μίας διάταξης συντονιζόμενου laser. Το MEMS κάτοπτρο κλίσης στο εστιακό επίπεδο του φακού ευθυγράμμισης επιλέγει ένα laser από την ομάδα DFB και επιτρέπει τον ηλεκτρονικό συντονισμό ακριβείας της ευθυγράμμισης.

Το σχηματικό διάγραμμα φαίνεται στο Σχ.2.5. Αντί να χρησιμοποιήσουμε έναν πολύπλοκο ενσωματωμένο συνδυαστή με απώλειες, ένα εξωτερικό MEMS κάτοπτρο κλίσης χρησιμοποιείται για την επιλογή του σωστού DFB, το κάτοπτρο τοποθετείται στο εστιακό επίπεδο του φακού ευθυγράμμισης, και επομένως διορθώνει τις χωρικές μεταβολές της παραγόμενης δέσμης. Η προσέγγιση αυτή έχει το πλεονέκτημα της πολύ μεγάλης απλοποίησης του τσίπ, αφού δεν χρειάζονται ενεργές ή παθητικές μεταφράσεις, και το τσίπ μπορεί να κατασκευαστεί σε σχεδόν στο ίδιο μέγεθος ενός DFB σταθερού μήκους κύματος. Η οπτική απώλεια ενός παθητικού συνδυαστή αναιρείται με σχεδόν όλη την ισχύ εξόδου του laser να συζευγνύεται προς την οπτική ίνα.

Η συσκευή είναι εύκολη στην κατασκευή της και σταθερή μηχανικά αφού τώρα η χρονοβόρα και δαπανηρή ευθυγράμμιση ακριβείας γίνεται ηλεκτρονικά με το κάτοπτρο κλίσης. Ένας βρόγχος ανάδρασης διατηρεί την βέλτιστη ευθυγράμμιση και κάνει διορθώσεις σε περίπτωση που έχουμε την όποια μηχανική μικρομεταβολή. Το τσίπ της ομάδας DFB περιέχει 12 laser στα 10μm με απόσταση μήκους κύματος στα 2.8nm. Τα laser μοιράζονται το ίδιο InGaAsP υλικό μέσο απολαβής τεντωμένου κβαντικού πηγαδιού και διαφέρουν μόνο με την κλίση της σχάρας, το μέσο μπορεί να παρέχει 50mW ισχύος τσίπ στα 300mA ρεύματος σε θερμοκρασία θήκης 30°C, η καμπύλη φωτός-ρεύματος μίας τέτοιας ομάδας φαίνεται στο Σχ.6.6.



Σχ.2.6 Καμπύλες φωτός-ρεύματος μίας ομάδας laser 12 στοιχείων στους 35°C θερμοκρασία ψύκτρας.

Με μία τόσο στοιβαγμένη ομάδα, μόνο μία μικρή κλίση του MEMS κατόπτρου χρειάζεται, περίπου $\pm 1.5^\circ$ στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αλλά το κάτοπτρο στην πραγματικότητα σχεδιάζεται για μέγιστη κλίση $\pm 2^\circ$ στο επίπεδο και μπορεί επίσης να κλίνει $\pm 0.5^\circ$ στον άλλον άξονα, επιτρέποντας έτσι την χονδρική ρύθμιση των θέσεων. Η συσκευή πεταλούδας συνδυάζεται με ηλεκτρονικά ελέγχου και έναν εξωτερικό κλειδωτή μήκους κύματος. Τα 33nm συνολικού συντονισμού στα 20mW ισχύος διοχετευμένης σε οπτική ίνα παρέχονται σε μία πλήρως λειτουργική συσκευή. Το Σχ.2.7 δείχνει το υπερτιθέμενο φάσμα σε διαύλους ITU των 50GHz, ο χρόνος συντονισμού μεταξύ των διαύλων είναι τυπικά ένα δευτερόλεπτο, η συσκευή κλειδώνεται πάνω στο πλέγμα ITU μέσα στα 0.4GHz.

2.2 Διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας με ηλεκτρονικό συντονισμό

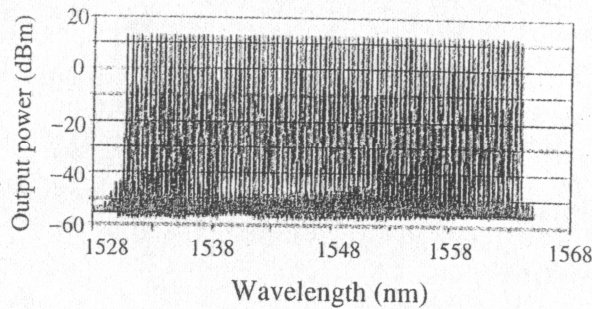
Διάφορες διατάξεις που χρησιμοποιούν ακουστοηλεκτροοπτικά συντονιζόμενα φίλτρα με ηλεκτρονικό έλεγχο, όπως επίσης διαμορφωτή φωτός χώρου, έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί σε αυτήν την ενότητα. Χωρίς μηχανική επαναρύθμιση, αυτές οι συσκευές συντονίζονται αλλάζοντας τη συχνότητα του οδηγού ραδιοσυχνότητας και/ή εφαρμόζοντας τάση σάρωσης στα συντονιζόμενα φίλτρα τα οποία παρέχουν συντονιζόμενο μήκος κύματος με εμπρόσθια σε συμφωνία φάσης σύζευξη μεταξύ τρόπων διαφορετικού δείκτη σε ένα κύριο μέσο και των προσπίπτουσων δεσμών.

2.2.1 Συντονισμός μήκους κύματος με ακουστοοπτικό διαμορφωτή

Ένα ακουστοοπτικό φίλτρο έχει ένα στενό εύρος ζώνης οπτικής διαπερατότητας με την κεντρική συχνότητα ελεγχόμενη ηλεκτρονικά από την συχνότητα οδήγησης. Ένας ακουστοοπτικός διαμορφωτής για τον συντονισμό ενός dye laser στην ορατή φασματική περιοχή χρησιμοποιήθηκε στις αρχές της δεκαετίας 1970. Έχει συζητηθεί ο γρήγορος συντονισμός του διοδικού laser στα 850 nm χρησιμοποιώντας έναν ακουστοοπτικό διαμορφωτή μέσα στην κοιλότητα του laser. Επίσης ανακοινώθηκε ο ηλεκτρονικός συντονισμός ενός InGaAsP laser ημιαγωγού στα 1300nm σε μία ευρεία περιοχή συντονισμού των 83nm χρησιμοποιώντας ακουστοοπτικό φίλτρο μέσα σε μία διάταξη εξωτερικής κοιλότητας, και παρατηρήθηκε λειτουργία σε ένα μήκος κύματος αλλά και λειτουργία πολλαπλών μηκών κύματος.

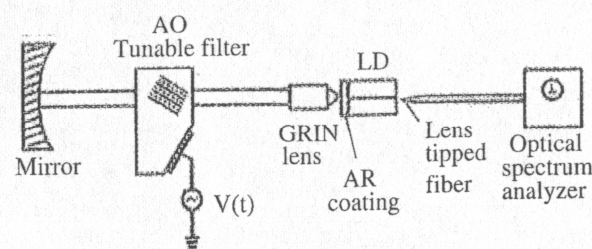
Η βασική διάταξη κοιλότητας για ακουστικά συντονιζόμενη εξωτερική κοιλότητα φαίνεται σχηματικά στο Σχ.2.8. Οι συσκευές ακουστοοπτικού φίλτρου φτιάχνονται από κρυσταλικό υλικό TeO_2 με το εύρος ζώνης FWHM να είναι 3nm, και η μέγιστη εκπομπή

στο κεντρικό μήκος κύματος λ_0 είναι περίπου 80% για ισχύ ακουστικής οδήγησης 3W. Ο συντονισμός επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την συχνότητα της τάσης οδήγησης η οποία εφαρμόζεται στον ακουστικό μετατροπέα, μπορούμε να συντονίσουμε το λ_0 σε μία περιοχή από 1.2 μm έως 1.6 μm μεταβάλλο-



Σχ.2.7 Υπερτιθέμενο φάσμα μίας μονάδας ITU 84x50 GHz στα 12dBm ή 20mW.

ντας την συχνότητα ηλεκτρικής οδήγησης από 55MHz σε 75MHz με τον απαιτούμενο χρόνο για την αλλαγή από το ένα μήκος κύματος στο άλλο να είναι 3 μs για τη συσκευή. Το οπτικό φάσμα της συντονισμένης οπτικής εξόδου φαίνεται στο Σχ.2.9. Το ψηλότερο και το χαμηλότερο στην εικόνα φάσμα δείχνουν τις άκρες της περιοχής συντονισμού, ενώ το μεσαίο σχήμα είναι ένα τυπικό φάσμα στο κέντρο της περιοχής, το οποίο επεκτείνεται στα 83nm. Έχουμε καλή καθαρότητα τρόπου ταλάντωσης με περίπου 30dB αναλογία απόσβεσης (κύριος τρόπος προς πλευρικός τρόπος). Όμως κάθε κύριος τρόπος περιέχει πολλούς τρόπους εξωτερικής κοιλότητας οι οποίοι δεν διακρίνονται με αναλυτή οπτικού φάσματος.

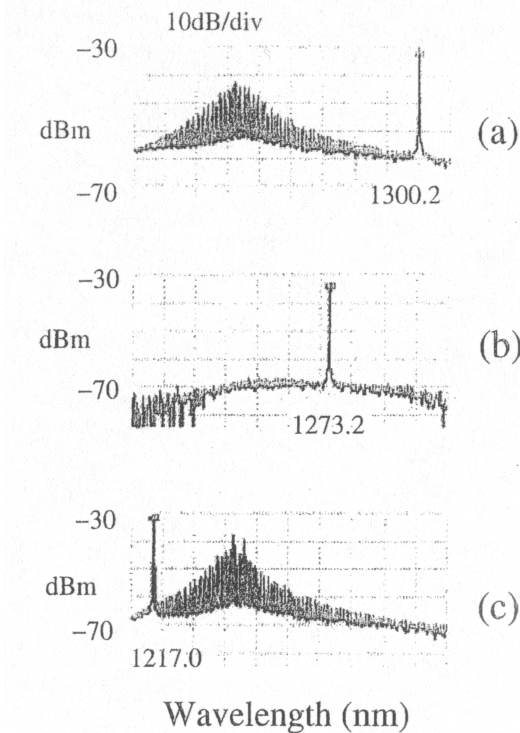


Σχ.2.8 Διάταξη εξωτερικής κοιλότητας για laser ημιαγωγού με ακουστοοπτικό συντονισμό LD: δίοδος laser
AR: αντανάκλαστικότητα.

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του ακουστοοπτικού φίλτρου είναι ότι μπορεί να εισαχθεί πολλαπλή σχάρα μέσα στον κρύσταλλο εφαρμόζοντας ταυτόχρονα πολλαπλές συχνότητες ηλεκτρικής οδήγησης στην είσοδο του μετατροπέα. Ρυθμίζοντας προσεκτικά τα επίπεδα των σημάτων στα διαφορετικά μήκη κύματος, μπορούμε να επιτύχουμε λειτουργία laser σε διαφορετικά μήκη κύματος ταυτόχρονα. Τα φάσματα του φωτός εξόδου φαίνονται στο Σχ.2.10. Ένα ατυχές χαρακτηριστικό του ακουστοοπτικού φίλτρου είναι το γεγονός ότι ένα οπτικό κύμα συχνότητας ν ολισθαίνει πάνω και κάτω σε συχνότητα όταν περνάει από το φίλτρο κατά ένα ποσό ίσο με την συχνότητα f του ακουστικού οδηγού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κανονικοί τρόποι του ακουστοοπτικού συντονιζόμενου laser εξωτερικής κοιλότητας να είναι χρονικά εξαρτώμενοι τρόποι ολισθήσεως (Chirp), δηλαδή

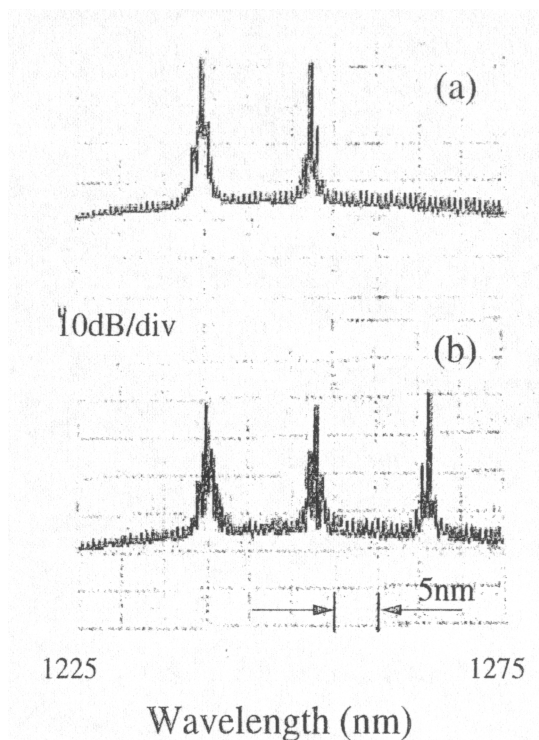
$$\nu_q = \frac{c}{2l} (q + f_{chirp} t), \quad (2.2)$$

όπου $f_{chirp} = 2f$ είναι η συχνότητα ολισθήσεως, ο παράγων 2 προέρχεται από το γεγονός το laser πηγαινοέρχεται στο φίλτρο δύο φορές. Για πολλές εφαρμογές, είναι ενοχλητική η ολίσθηση του κανονικού τρόπου. Η ολίσθηση συχνότητας εξαιτίας της ολίσθησης μπορεί να αντιμετωπιστεί εισάγοντας ένα δεύτερο ακουστοοπτικό διαμορφωτή μέσα στην κοιλότητα, όπως φαίνεται στο Σχ.2.11, το δεύτερο μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί ώστε να παρέχει μία ίση αλλά αντίθετη ολίσθηση συχνότητας σε σχέση με το πρώτο, και έτσι η ολίσθηση αναιρείται.



Σχ.2.9 Αναλύσεις οπτικού φάσματος της εξόδου για ακουστοοπτικά συντονιζόμενη διόδο laser για τρεις τιμές ακουστικής συχνότητας οδήγησης (a) $f=69.494$ MHz (b) $f=71.1$ MHz και (c) 74.57 MHz. Η συνολική περιοχή συντονισμού που φαίνεται στο σχήμα είναι 83nm.

Το Σχ.2.12 δείχνει τα οπτικά φάσματα της εξόδου του laser που λαμβάνονται από σύστημα με εξωτερική κοιλότητα αντιμετώπισης συχνότητας χρησιμοποιώντας δύο ακουστοοπτικά φίλτρα μέσα στην κοιλότητα οδηγούμενα και τα δύο με την ίδια συχνότητα. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε αναίρεση ολισθήσεως. Όμως το laser ακόμη λειτουργεί με πολλαπλό τρόπο ταλάντωσης και με ασυνέχειες. Έχει προταθεί και παρουσιαστεί μία νέα προσέγγιση η οποία μπορεί να επιτύχει ταχύ, και σύμφωνο φασικά συνεχόμενο συντονισμό ευρείας ζώνης ενός ημιαγωγικού laser μονού τρόπου με εξωτερική κοιλότητα. Ως εδώ, δύο ακουστοοπτικοί διαμορφωτές χρησιμοποιούνται για τον ηλεκτρονικό έλεγχο της γωνίας πρόσπτωσης του φωτός επάνω σε σχάρα περίθλασης και της οπτικής φάσης της κυκλικής διαδρομής. Για να έχουμε την φάση της κυκλικής διαδρομής, χρησιμοποιείται μία γραμμή μεγάλης καθυστέρησης για την παραγωγή ενός σήματος διαμόρφωσης της ακουστοοπτικής συσκευής.

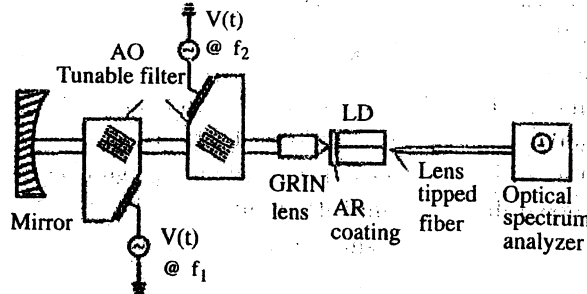


Σχ.2.10 Σήματα αναλυτή οπτικού φάσματος της εξόδου του συντονιζόμενου laser όπου φαίνεται ο συντονισμός με πολλαπλά μήκη κύματος όταν πολλαπλές συχνότητες εισάγονται στο ακουστοοπτικό φίλτρο. (a) $f=81.3$ MHz και 82.3 MHz, (b) $f=80.3$ MHz, 81.3 MHz και 82.3 MHz.

Το Σχ.2.13 δείχνει το διάγραμμα του προτεινόμενου ηλεκτρονικά συντονιζόμενου ημιαγωγικού laser εξωτερικής κοιλότητας. Η διάταξη είναι διαφορετική από αυτή του προηγούμενου κατά δύο τρόπους. Πρώτον, αντί για ακουστοοπτικό συντονιζόμενο φίλτρο, μία εξωτερική σχάρα και ένα ζευγάρι ακουστοοπτικών διαμορφωτών χρησιμοποιούνται ως επιλεκτικό στοιχείο μήκους κύματος σε διάταξη Littrow. Αυτό μας επιτρέπει την γρήγορη και ακριβείας επιλογή του μήκους κύματος λειτουργίας του laser μεταβάλλοντας μόνο την γωνία πρόσπτωσης προς την σχάρα η οποία κλειδώνεται με την συχνότητα οδήγησης (f) του ακουστοοπτικού διαμορφωτή. Κάθε ακουστοοπτικός διαμορφωτής είναι τοποθετημένος στην ίδια κατεύθυνση περίθλασης. Συγκρινόμενη με τις προηγούμενες μεθόδους, αυτή η προσέγγιση μας δίνει επιλεξιμότητα μήκους κύματος υψηλής ευκρίνειας, και επιτρέπει την λειτουργία μονού τρόπου του laser. Δεύτερον, μία ηλεκτρική γραμμή καθυστέρησης συγχωνεύεται μέσα στην γραμμή του μικροκυματικού σήματος που πηγαίνει στον μία από τις ακουστοοπτικές συσκευές. Η βασική ιδέα είναι παρόμοια με ένα laser εξωτερικής κοιλότητας, στο οποίο έχει πιστοποιηθεί ο συνεχής συντονισμός σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος με ταυτόχρονο μηχανικό έλεγχο του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας και του μήκους κύματος ταλάντωσης του laser.

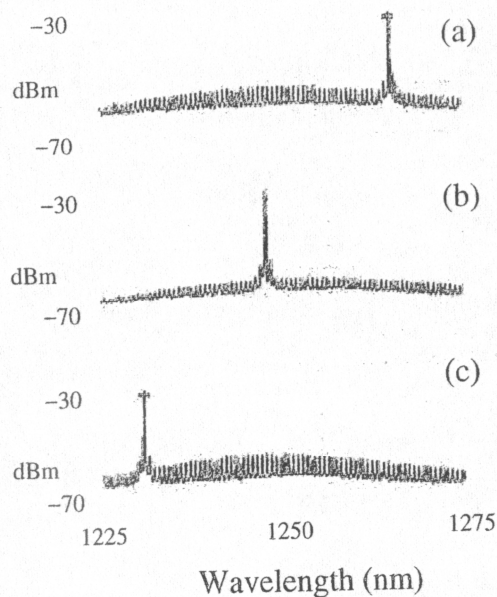
Ο συνεχής συντονισμός της συχνότητας laser επιτυγχάνεται αλλάζοντας ταυτόχρονα την συχνότητα ηλεκτρικής οδήγησης f και την σχετική φάση φ . Το Σχ.2.14 παρουσιάζει τον συνεχόμενο συντονισμό laser. Όταν η συχνότητα ηλεκτρικού σήματος f αλλάζει συνεχώς χωρίς να αλλάζει η φάση της, το laser εμφανίζει αναπήδηση τρόπου σε σχήμα σκάλας δια μέσου κάθε τρόπου Fabry-Perot της εξωτερικής κοιλότητας, όπως φαίνεται στο Σχ.2.14 (a), αφού δεν μπορούμε να αλλάξουμε της συχνότητες των τρόπων της εξωτερικής κοιλότητας αλλάζοντας την f . Όταν αλλάζουμε το φ χωρίς να αλλάζουμε το f , το laser εμφανίζει αναπήδηση τρόπου με μορφή πριονωτή για κάθε π ,

όπως φαίνεται στο Σχ.2.14 (b). Αυτή είναι η επονομαζόμενη λειτουργία σε συχνότητα ολισθήσεως σε ένα laser με ανάδραση μετατοπισμένης συχνότητας η οποία μελετήθηκε από τον Nakamura το 1997. Αυτή η λειτουργία εξηγεί πως μπορούμε να συντονίσουμε την συχνότητα του laser αποφεύγοντας την αναπήδηση τρόπου όταν το f και το φ αλλάζουν ταυτόχρονα όπως αναπαριστάται στο Σχ.2.14(c).



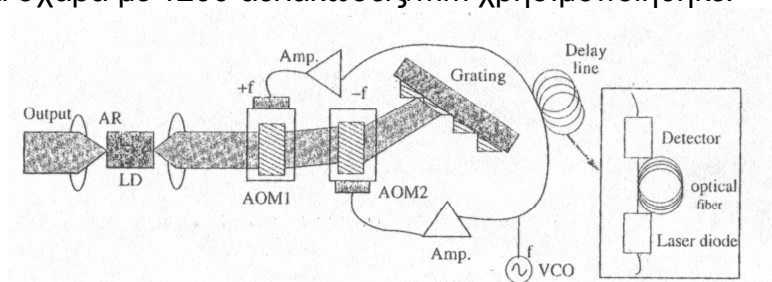
Σχ.2.11 Διάταξη εξωτερικής κοιλότητας με χρήση δύο ακουστοοπτικών φίλτρων για την αντιμετώπιση της μετατόπισης οπτικής συχνότητας.

Η πιο απλή μέθοδος για να μεταβάλλουμε ταυτόχρονα το f και το φ είναι η χρήση μίας γραμμής ηλεκτρικής καθυστέρησης, όπως φαίνεται στο εσώκλειστο του Σχ.2.13, μπορούμε να μεταβάλλουμε την σχετική φάση φ των ηλεκτρικών σημάτων οδήγησης που εφαρμόζονται στις ακουστοοπτικές συσκευές αλλάζοντας το f σε σχέση με τον τύπο $\varphi = \pi f \tau$, όπου τ είναι ο χρόνος καθυστέρησης. Επομένως η επακόλουθη μετατόπιση φάσης της κυκλικής διαδρομής του οπτικού σήματος το οποίο επιστρέφει στο laser είναι 2φ . Επομένως η συχνότητα των τρόπων ταλάντωσης Fabry-Perot μίας εξωτερικής κοιλότητας αλλάζει την ελεύθερη φασματική περιοχή του (Free Spectral Range=FSR) αλλάζοντας το φ κατά π . Για να τροποποιήσουμε τον συντονισμό συχνότητας του laser με τα f και φ , μπορούμε να πάρουμε τον βέλτιστο χρόνο καθυστέρησης από $\tau = \langle df_{laser} / df \rangle / (2FSR)$, όπου $\langle df_{laser} / df \rangle$ είναι ο συντονισμός της συχνότητας laser προς την συχνότητα διαμόρφωσης. Στο Σχ.2.14(a), το $\langle df_{laser} / df \rangle$ μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ο συντελεστής της κεντρικής συχνότητας της ζώνης διέλευσης της ανάδρασης σχάρας προς την συχνότητα διαμόρφωσης. Έτσι είναι δυνατόν να συντονίσουμε την συχνότητα του laser συνεχόμενα με χρήση μίας γραμμής ηλεκτρικής καθυστέρησης ως καθυστερητή φάσης ώστε να μεταβάλλουμε ταυτόχρονα τα f και φ ταυτόχρονα.

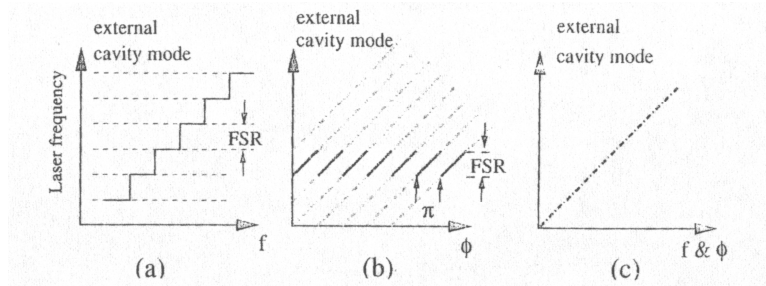


Σχ.2.12 Οπτικό φάσμα εξόδου συντονιζόμενου laser χωρίς το φαινόμενο ολισθήσεως με τη χρήση δύο ακουστοοπτικών φίλτρων μέσα στην κοιλότητα. (a) $f=68\text{MHz}$, (b) $f=69\text{MHz}$, (c) 70 MHz .

Μία κοιλότητα Fabry-Perot ημιαγωγού InGaAs με επικάλυψη αντιανακλαστικότητα ($<0.1\%$) στην επιφάνεια του στα $1.55\mu\text{m}$ χρησιμοποιήθηκε για την παρουσίαση του συνεχούς συντονισμού της συχνότητας laser μέσω της τεχνικής που περιγράφηκε παραπάνω. Η αποτελεσματικότητα της περίθλασης των ακουστοοπτικών διαμορφωτών ήταν $\sim 70\%$. Μία σχάρα με 1200 αυλακώσεις/ mm χρησιμοποιήθηκε.



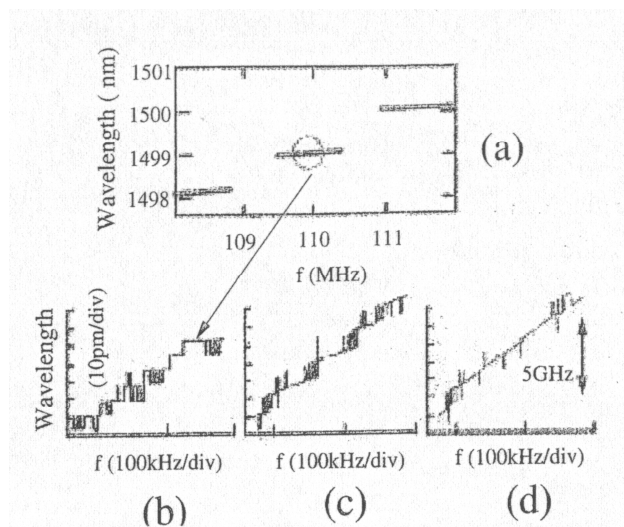
Σχ.2.13 Δομή ηλεκτρονικά συντονιζόμενου ημιαγωγικού laser εξωτερικής κοιλότητας: AOM1,AOM2: ακουστοοπτικοί διαμορφωτές, VCO: ταλαντωτής ελεγχόμενος με τάση, Amp: ενισχυτής μικροκυμάτων, LD: δίοδος laser.



Σχ.2.14 Εξήγηση του συντονισμού συχνότητας του laser: (a) το f αλλάζει χωρίς να αλλάζει το φ (b) το φ αλλάζει χωρίς να αλλάζει το f . (c) το f και το φ αλλάζουν ταυτόχρονα.

Το εύρος ζώνης του laser υπολογίζεται λιγότερο από 1 MHz από το σήμα διακροτήματος. Το Σχ.2.15(a) δείχνει την διακύμανση του μήκους κύματος όταν το f συντονίζεται χωρίς γραμμή καθυστέρησης. Οι ασυνέχειες του συντονιζόμενου μήκους κύματος είναι αποτέλεσμα των τρόπων ταλάντωσης Fabry-Perot της εσωτερικής κοιλότητας του ίδιου του ημιαγωγικού laser.

Το Σχ.2.15(b) δείχνει μία μεγενθυμένη έκδοση του Σχ.2.15(a). Είναι προφανές ότι το laser παρουσιάζει αναπήδηση τρόπου σε σχήμα σκάλας, εξαιτίας του τρόπου Fabry-Perot της εξωτερικής κοιλότητας, όπου η συχνότητα του τρόπου αναπήδησης είναι ίση με την ελεύθερη περιοχή φάσματος των τρόπων Fabry-Perot της εξωτερικής κοιλότητας $\sim 1\text{GHz}$.



Σχ.2.15 Συμπεριφορά του μήκους κύματος του laser ως αποτέλεσμα του συντονισμού συχνότητας: (a),(b) $\tau=0$ (c) $\tau=7.5 \mu\text{s}$ (d) $\tau=15\mu\text{s}$

Για να επιτύχουμε μεγάλη καθυστέρηση χρησιμοποιούμε μία οπτική γραμμή καθυστέρησης. Έχει βρεθεί ότι το μήκος κύματος συμπεριφέρεται με διαφορετικό τρόπο όταν το f συντονίζεται με διαφορετική γραμμή καθυστέρησης. Όταν το $\tau = 7.5 \mu\text{s}$, μπορούμε να δούμε αναπήδηση τρόπου τύπου σκάλας. Μπορούμε να δούμε καθαρά ότι το laser συντονίζεται με ταυτόχρονη αλλαγή των f και φ . Όταν $\tau = 15 \mu\text{s}$, η αναπήδηση σκάλας του τρόπου αλλάζει σε συνεχόμενο συντονισμό για μερικά GHz με εξαίρεση κάποιες τυχαίες αναπηδήσεις τρόπου. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για τον πλήρη ηλεκτρονικό έλεγχο της εξωτερικής κοιλότητας των διοδικών laser.

2.2.2 Ολίσθηση συχνότητας με ηλεκτροοπτικό διαμορφωτή

Έχει παρουσιαστεί ενσωματωμένο οπτικό φίλτρο βασισμένο σε εμπρόσθια σύζευξη σχάρας στενής ζώνης μεταξύ TE και TM τρόπων στο LiNbO_3 . Με την πρόσθεση ηλεκτροοπτικών μετατοπιστών φάσης, αυτές οι συσκευές έχουν την δυνατότητα να παρέχουν και επιλογή τρόπου και ολίσθηση τρόπου για συντονισμό συνεχούς πρόσβασης. Περιοχές συντονισμού στα 700nm και ευρος ζώνης $\leq 60\text{KHz}$ έχουν παραληφθεί με τέτοιες συσκευές. Τα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας έχουν αποδειχθεί ως πανίσχυρο εργαλείο σε μία ποικιλία εφαρμογών. Η ικανότητα των ECDL να συντονίζονται σε συγκεκριμένες διαβάσεις τα κάνει ανεκτίμητα για μελέτες στην ατομική φυσική. Πάντως, νέες εφαρμογές εμφανίζονται οι οποίες απαιτούν ECDL τα οποία να παράγουν γραμμικές ολισθήσεις συχνότητας. Τα laser με συχνότητα ολισθήσεως έχουν αποδειχθεί πολύ χρήσιμα για την επεξεργασία σύμφωνων οπτικών μεταβατικών φαινομένων, για εφαρμογές μνήμης, για καθυστερήσεις πραγματικού χρόνου και για radar σύμφωνου laser. Πρόσφατα παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι παραγωγής ολισθήσεως συχνότητας για radar με laser.

Η πρώτη μέθοδος περιέχει την διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης ενός διοδικού laser κατανεμημένης ανάδρασης για την παραγωγή της συχνότητας ολισθήσεως. Η απόκριση του laser σε μία αλλαγή του ρεύματος δεν είναι γραμμική συνάρτηση έτσι ώστε μία πολύπλοκη συνάρτηση διαμόρφωσης χρειάζεται για την παραγωγή της συχνότητας ολισθήσεως. Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή συχνότητας διοδικού laser είναι το να παρέχουμε ανάδραση μετατοπισμένης συχνότητας στην δίοδο laser χρησιμοποιώντας έναν ενδοκοιλοτικό ακουστοοπτικό διαμορφωτή. Η έξοδος μίας διόδου laser ευθυγραμμίζεται και στέλνεται διαμέσου του AOM, η δέσμη πρώτης τάξεως παρέχει την ανάδραση μετατοπισμένης συχνότητας. Η κλίση του ολισθήσεως συχνότητας είναι $\gamma = \nu_f / \tau_r$, όπου ν_f είναι η μετόπιση συχνότητας ανα γύρο χρόνου κυκλικής διαδρομής ενώ η διάρκεια της ολισθήσεως συχνότητας είναι $1/\nu_f$, τ_r είναι ο χρόνος κυκλικής διαδρομής.

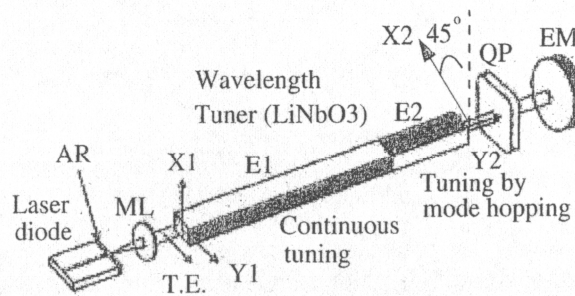
Η τρίτη μέθοδος έχει αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας έναν ενδοκοιλοτικό ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο για την ολίσθηση ενός laser εξωτερικής κοιλότητας. Η συνθήκη συντονισμού ορίζεται από την $l_{cav} = q\lambda/2$ ώστε ένας ακέραιος αριθμός ημιμηκών κύματος να ταιριάζει με το μήκος της οπτικής διαδρομής l ανάμεσα ανάμεσα από την πίσω επιφάνεια της διόδου laser και την σχάρα η οποία σχηματίζει την εξωτερική κοιλότητα. Εφαρμόζοντας μία τάση στον ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο, ο δείκτης διάθλασης αλλάζει και επομένως αλλάζει το οπτικό μήκος και $\Delta l = \Delta n_e(V)l$, όπου $\Delta n_e(V) = -(n_e^3/2)r_{33}(V/d)$ είναι η αλλαγή στον δείκτη διάθλασης το ΕΟ κρυστάλλου χωρίς εφαρμοζόμενη τάση, r_{33} είναι ο ηλεκτροοπτικός συντελεστής του ΕΟ κρυστάλλου, V είναι η εφαρμοζόμενη τάση, και d είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Επομένως το μήκος κύματος του ECDL με το φαινόμενο ολίσθησης αλλάζει για να ταιριάζει με την νέα αυτή συνθήκη συντονισμού κατά $l_{cav} = q\lambda/2$.

Μπορούμε να γράψουμε μία έκφραση για την αλλαγή της συχνότητας ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης

$$\Delta \nu = \frac{\nu n_e^3 r_{33}}{2l_{cav} d} V = R_{eo} V, \quad (2.3)$$

Όπου l είναι το μήκος του ΕΟ κρυστάλλου, R_{e0} είναι μία σταθερά η οποία περιγράφει την απόκριση του ΕΟ κρυστάλλου στην εφαρμοζόμενη τάση. Η αλλαγή στην συχνότητα του laser είναι γραμμικά ανάλογη προς την εφαρμοζόμενη τάση. Ο χρόνος της ολίσθησης συχνότητας ενός ECDL ολίσθησης με ενδοκοιλιακό ΕΟ κρύσταλλο μπορεί να προγραμματιστεί ελέγχοντας την τάση του ηλεκτροοπτικού κρυστάλλου. Επομένως η ευελιξία στον προγραμματισμό του χρονισμού της ολίσθησης της συχνότητας είναι βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με το laser ανάδρασης μετατοπισμένης συχνότητας.

Μία δίοδος laser με 1540nm εξωτερική κοιλότητα με έναν ενδοκοιλιακό ηλεκτροοπτικό συντονιστή μήκους κύματος έχει παρουσιαστεί, έχει επιτευχθεί ένα φίλτρο μήκους κύματος με χονδρική αλλά και ακριβείας ρύθμιση με έναν συντονιστή μήκους-κύματος νιοβίου-λιθίου. Ένα τμήμα του κρυστάλλου χρησιμοποιείται ως φίλτρο συντονιζόμενου μήκους κύματος για τον συντονισμό του μήκους κύματος με αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης. Το άλλο λειτουργεί ως διαμορφωτής φάσης για την αλλαγή του οπτικού μήκους της κοιλότητας και για τον συνεχόμενο συντονισμό του μήκους κύματος.



Σχ.2.16 Δίοδος laser με συντονισμό μήκους κύματος: ML, μικροφακός. QP, πλάκα χαλαζία, EM, εξωτερικό κάτοπτρο.

Η πειραματική διάταξη φαίνεται σχηματικά στο Σχ.2.16, αποτελείται από μία δίοδο laser, έναν μικροφακό ευθυγράμμισης, έναν ηλεκτροοπτικό συντονιστή μήκους-κύματος, μία πλάκα δισπεριθλαστικού χαλαζία, και ένα εξωτερικό κάτοπτρο. Ένα διοδικό laser GaAsInP /InP 1540nm με μία τη μία εσωτερική πλευρά με επικάλυψη AR. Ο συντονιστής μήκους-κύματος είναι ένας συμπαγής κρύσταλλος νιοβίου-λιθίου με z-διάδοση με δύο ζευγάρια ηλεκτροδίων προσανατολισμένα στις 90° το ένα με το άλλο. Το μήκος του κρυστάλλου είναι 45mm κατά μήκος της z διεύθυνσης και η διατομή του είναι 2mm x 2mm. Το μήκος των μεγάλων ηλεκτροδίων είναι $d_1=35\text{mm}$. Αυτά τα ηλεκτρόδια προκαλούν ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του y_1 άξονα το οποίο είναι παράλληλο προς την TE πόλωση του laser τσιπ. Το μήκος των μικρών ακροδεκτών ($d_2=10\text{mm}$) προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του x_1 άξονα του κρυστάλλου. Ο γρήγορος άξονας x_2 και ο αργός y_2 της πλάκας χαλαζία είναι προσανατολισμένοι κατά 45° προς το TE. Η διαφορά της οπτικής διαδρομής που παράγεται από φυσική δισδιάθλαστικότητα της πλάκας που βρίσκεται ανάμεσα στους αργούς και τους γρήγορους άξονες είναι $D_0=57\mu\text{m}$, το οπτικό μήκος της κοιλότητας είναι $L=16\text{cm}$.

Έχουμε συντονισμό με αναπήδηση τρόπου με το τμήμα των μικρών ηλεκτροδίων του κρυστάλλου, το οποίο είναι σε σειρά με την δισπεριθλαστική πλάκα χαλαζία. Όταν εφαρμόζεται τάση σε αυτό το τμήμα των μικρών ηλεκτροδίων, η συνεπαγόμενη διαφορά της εξαρτώμενης από την τάση οπτικής διαδρομής μεταξύ των αξόνων x_2 και y_2 είναι

$$D(V_2) = d_2 n_0^3 r_{12} (V_2 / w) , \quad (2.4)$$

όπου $n_0=2.2116$ είναι ο κανονικός δείκτης διάθλασης του νιοβίου-λιθίου στα 1540nm μήκος κύματος, $r_{12}=3.4 \times 10^{-12} \text{m/V}$ είναι ο ηλεκτροοπτικός συντελεστής και $w=2\text{mm}$ είναι

το πλάτος διατομής του κρυστάλλου. Για μία κυκλική διαδρομή του laser μέσα στην κοιλότητα laser, η φασματική εκπομπή ενός τέτοιου φίλτρου δίδεται από

$$T(\nu) = \cos^2\left[\frac{2\pi\nu}{c}(D_0 + D(V_2))\right], \quad (2.5)$$

Μέγιστο εκπομπής εμφανίζεται στις συχνότητες $\nu = qc / 2[D_0 + D(V_2)]$, όπου q ακέραιος.

Έχουμε εκπομπή laser στο μήκος κύματος της μέγιστης απολαβής. Επιτυγχάνουμε λειτουργία μονού τρόπου αφού υπάρχει μόνο ένα μέγιστο στην καμπύλη απολαβής και δεν υπάρχουν άλλοι ανταγωνιστικοί τρόποι. Έχουμε λοιπόν συντονισμό μήκους κύματος με αναπήδηση τρόπου μεταβάλλοντας την θέση μεγίστου στην καμπύλη απολαβής δια μέσου της τάσεως V_2 , και άρα το ποσοστό συντονισμού με αναπήδηση τρόπου δίδεται από

$$d\nu / d\nu_2 = 2d_2cn_0^3r_{12} / qw\lambda_0^2 = 630 \text{ MHz/V}, \quad (2.6)$$

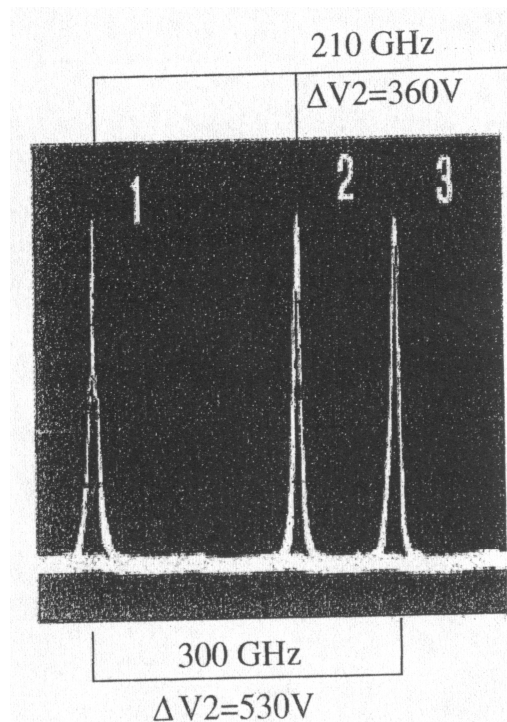
όπου $q=74$ είναι η τάξη μέγιστης εκπομπής για $d_2=10\text{mm}$ σε $\lambda_0=1540\text{nm}$. Έχουμε συνεχή συντονισμό μήκους-κύματος με διαμόρφωση φάσης του ενδοκοιλοτικού κύματος με τη χρήση του τμήματος των μεγάλων ηλεκτροδίων. Όταν μία τάση V_1 εφαρμόζεται στον κρύσταλλο, του οποίου οι άξονες δεν περιστρέφονται όπως περιγράφηκε προηγουμένως, αλλά ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται ηλεκτρικά με το φαινόμενο Pockels :

$$n_{y1} = n_0 + \frac{1}{2}n_0^3r_{12}V_1 / w, \quad (2.7)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την μεταβολή του δείκτη διάθλασης n_{y1} με την εφαρμοζόμενη τάση V_1 , η αναλογία συντονισμού ακριβείας μπορεί εύκολα να γραφτεί ως

$$d\nu / dV_1 = cn_0^3r_{12}d_1 / (2w\lambda L) = 400\text{kHz/V}, \quad (2.8)$$

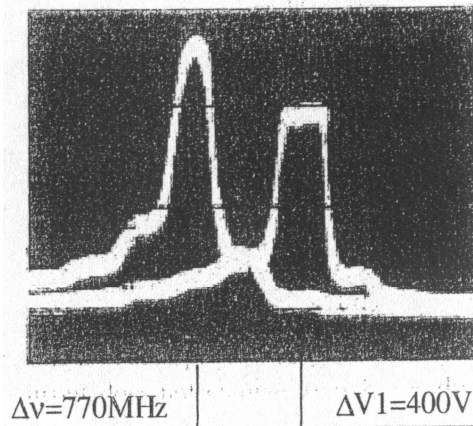
όπου $d_1=35\text{mm}$.



Σχ.2.17 Συντονισμός μήκους-κύματος με αναπήδηση τρόπου (πολλαπλής έκθεσης)

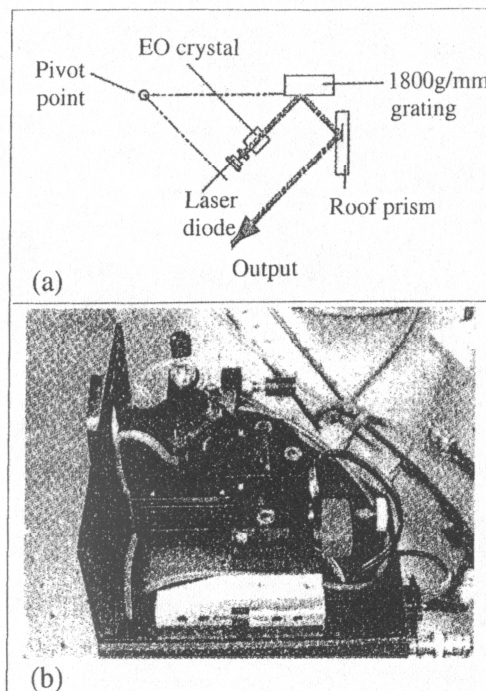
Το Σχ.2.17 είναι φωτογραφία πολλαπλής έκθεσης του συντονισμού μήκους-κύματος με αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης με τη χρήση ενός αναλυτή φάσματος Fabry-Perot όταν η τάση V_2 εφαρμόζεται στο τμήμα των μικρών ηλεκτροδίων. Η μετρούμενη αναλογία συντονισμού είναι 580 MHz. Η μεγαλύτερη περιοχή συντονισμού είναι 700 GHz. Το Σχ.2.18 δείχνει ένα παράδειγμα συνεχούς συντονισμού ο οποίος παρέχεται εφαρμόζοντας τάση V_1 στο τμήμα των μεγαλύτερων ηλεκτροδίων. Η μέγιστη περιοχή συντονισμού ήταν 770 MHz. Η αντίστοιχη τάση οδήγησης είναι 400V, η οποία δίνει αναλογία συνεχόμενου συντονισμού 480kHz/V.

Έχει μελετηθεί η αποδοτικότητα ενός chirp ECDL (ολίσθησης) κατασκευασμένο σε διάταξη Littrow με έναν ενδοκοιλοτικό ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο. Το chirped ECDL έχει κεντρικό μήκος κύματος 793nm με 20nm περιοχή συντονισμού με μηχανική περιστροφή της σχάρας ανάδρασης και ταχύς συντονισμού επιτυγχάνεται ηλεκτρονικά με τάση ελέγχου του ηλεκτροοπτικού κρυστάλλου. Η απόκριση του laser στον EO συντονισμό είναι 2.01MHz/V, και έχει παρουσιαστεί γραμμικό chirp συχνότητας 800MHz κυμαινόμενο σε διάρκεια από 3μs έως 337μs. Ο μέγιστος ηλεκτροοπτικός συντονισμός ορίζεται από την διεύθυνση στον χώρο του τρόπου ταλάντωσης των 2.4GHz στην εξωτερική κοιλότητα.



Σχ.2.18 Συνεχόμενος συντονισμός πάνω από τα 770 MHz, δηλ. 82% της FSR της κοιλότητας laser (πολλαπλή έκθεση)

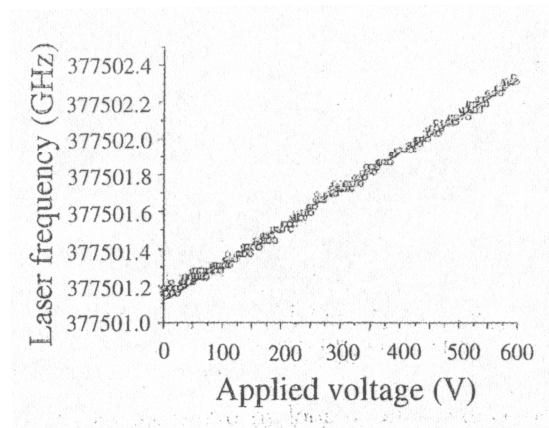
Ένα σχηματικό διάγραμμα του chirped ECDL φαίνεται στο Σχ.2.19(a) και το πραγματικό laser φαίνεται στο Σχ.2.19(b). Το φως από μία δίοδο laser με ονομαστικό μήκος κύματος $\lambda=795\text{nm}$ ευθυγραμμίζεται με έναν φακό εστιακού μήκους $f=4.50\text{ mm}$ και με άνοιγμα διαφράγματος $\text{NA}=0.55$, ο φακός έχει επικάλυψη αντανάκλαστικότητας ευρείας ζώνης. Μετά από τον φακό ευθυγράμμισης, το φως προσπίπτει στον ΕΟ κρύσταλλο. Ο κρύσταλλος είναι ένας χ-τομής λιθίου-τανταλίου κρύσταλλος ο οποίος έχει όγκο $5\times 5\times 10\text{mm}^3$. Οι δύο αντιθέμενες πλευρές $5\times 10\text{mm}^2$ είναι επικαλυμμένες με χρυσή επίστρωση και χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική σύνδεση υψηλής τάσης. Μετά από τον ΕΟ κρύσταλλο, το φως προσπίπτει σε μία ολογραφική σχάρα των 1800 γραμμών/mm υπο γωνία 45° . Η αντανάκλαση πρώτης τάξεως από την σχάρα προσπίπτει πάνω σε ένα πρίσμα οροφής. Η σχάρα και το πρίσμα οροφής δημιουργούν έναν επανανακλαστή (retroreflector).



Σχ.2.19 (a) Σχηματικό διάγραμμα ενός τύπου CECDL. Ο ΕΟ κρύσταλλος παρέχει μία μέθοδο για την ολίσθηση του laser, η κατεύθυνση στόχευσης της εξόδου του laser είναι

σταθερή ενώ το laser συντονίζεται εξαιτίας του επανανακλαστή που σχηματίζεται από την σχάρα και το πρίσμα οροφής. (b) Φωτογραφία του πλήρη chirped ECDL.

Ένας εμπορικός ελεγκτής διόδου laser χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του ρεύματος και τον έλεγχο της θερμοκρασίας του chirped ECDL. Η τάση που εφαρμόζεται στον ΕΟ κρύσταλλο μπορεί να είναι από τροφοδοτικό υψηλής τάσης η από ενισχυμένο σήμα από έναν προγραμματιζόμενο οδηγό κλιμακοσήματος. Ο μηχανικός συντονισμός του chirped ECDL ελέγχεται από έναν πιεζοδηγό μονού καναλιού. Το Σχ.2.20 είναι ένα σχεδιάγραμμα της συχνότητας laser σε GHz ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης στον ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο. Ο ηλεκτροοπτικός συντονισμός του laser μέσω του ηλεκτροοπτικού κρυστάλλου μας δείχνει μία περιοχή συντονισμού 1.2GHz χωρίς αναπήδηση τρόπου, η οποία είναι μικρότερη από τα 2.4GHz της χωρικής διευθέτησης του τρόπου ταλάντωσης της κοιλότητας. Ο ανοιχτός κύκλος αναπαριστά τις μετρούμενες τιμές της συχνότητας laser ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης ενώ η συμπαγής γραμμή είναι μία γραμμική σύνοψη των δεδομένων. Η κλίση της γραμμικής σύνοψης του $R_{eo}=2.01 \pm 0.02 \text{MHz/V}$, συγκρινόμενη με τον θεωρητικό υπολογισμό $R_{eo}=1.99 \text{MHz/V}$, συμφωνεί αρκετά καλά με την θεωρία.



Σχ.2.20 Διάγραμμα της συχνότητας laser ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης στον ΕΟ κρύσταλλο. Αυτές οι μετρήσεις γίνανε με SRS τροφοδοτικό τάσης και κυματομετρητή και επομένως αναπαριστούν τον αποσυντονισμό dc εξαιτίας του ΕΟ κρυστάλλου. Η συμπαγής γραμμή είναι μία γραμμική σύνοψη των δεδομένων και έχει κλίση $\pm 0.02 \text{MHz/V}$.

Η αναμενόμενη απόκριση $\Delta\nu(t)$ του chirped ECDL μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με την μετρούμενη απόκριση του ηλεκτροοπτικού κρυστάλλου R_{eo} όπως ακολούθως

$$\Delta\nu(t) = V(t)G_{HV}R_{EO}, \tag{2.9}$$

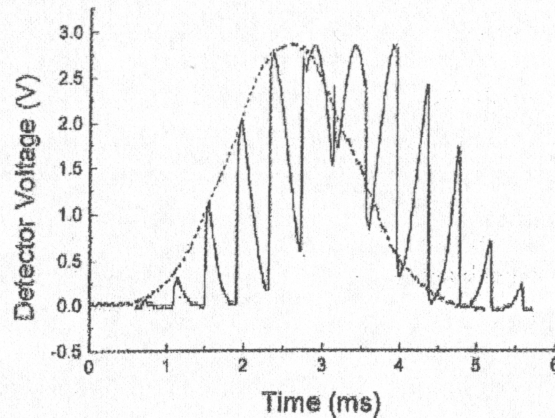
όπου $V(t)$ είναι η μετρούμενη έξοδος τάσης από τη γεννήτρια κλιμακοσήματος, $G_{HV}=200$ είναι το κέρδος του ενισχυτή υψηλής τάσης. Η απόκριση της chirped συχνότητας απόκρισης του chirped ECDL μετριέται χρησιμοποιώντας το συμβολόμετρο σάρωσης FP. Όταν το chirped ECDL δεν ολισθαίνει, η εκπεμπόμενη ένταση του συμβολόμετρου σάρωσης έχει ένα Lorentz σχήμα καμπύλης ως συνάρτηση του χρόνου.

Η εκπεμπόμενη ένταση ως συνάρτηση του χρόνου θα αποκλίνει από το σχήμα καμπύλης Lorentz και αυτή η αυτή η απόκλιση συσχετίζεται απευθείας με την αποκριση ολίσθησης της συχνότητας. Η απόκλιση από το σχήμα καμπύλης Lorentz μπορεί μετά να χρησιμοποιηθεί για να βρούμε την απόκριση ολίσθησης της συχνότητας του chirped

ECDL. Η συμπαγής γραμμή στο Σχ.2.21 δείχνει την εκπεμπόμενη ένταση ως συνάρτηση του χρόνου για το chirped ECDL με γραμμική τάση μορφής κλίμακας των 400V επαναλαμβανόμενα εφαρμοζόμενη στον ΕΟ κρύσταλλο ανα 337μs ενώ η διακεκομμένη γραμμή είναι ο φάκελος Lorentz. Η αποκλίσεις από την καμπύλη Lorentz είναι προφανής σε αυτό το σχήμα.

Το Σχ.22 είναι ένα διάγραμμα της απόκρισης chirp της συχνότητας του chirped ECDL ως συνάρτηση του χρόνου. Οι κύκλοι αναπαριστούν τις μετρούμενες τιμές της απόκρισης συχνότητας οι οποίες μετρούνται λαμβάνοντας υπόψιν τις αποκλίσεις από το σχήμα καμπύλης Lorentz όπως φαίνεται στο Σχ.2.21. Η συμπαγής γραμμή είναι η αναμενόμενη απόκριση συχνότητας όπως υπολογίζεται από την Εξ.(2.9). Βλέπουμε ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και των αναμενόμενων αποκρίσεων.

Το Σχ.2.23 είναι ένα διάγραμμα της απόκρισης chirp της συχνότητας του chirped ECDL ως συνάρτηση του χρόνου για γραμμικά σήματα κλίμακας εφαρμοζόμενα στον ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο. Για αυτό το διάγραμμα χρησιμοποιήθηκαν κλιμακωτά σήματα διάρκειας 3, 13, 28, 93, 195 και 337 μs. Η καλή συμφωνία της μετρούμενης και της αναμενόμενης απόκρισης συχνότητας μας δείχνει ότι ένας ενδοκοιλοτικός ηλεκτροοπτικός κρύσταλλος είναι ένας καλός τρόπος για την παραγωγή γραμμικών ολισθήσεων συχνότητας σε κλίμακα χρόνου του μικροδευτερολέπτου.



Σχ.2.21 Διάγραμμα της εκπεμπόμενης ισχύος του συμβολόμετρου σάρωσης FP ως συνάρτηση του χρόνου. Η συμπαγής γραμμή μετριέται όταν το CECDL δεν ολισθαίνει και επομένως έχει καμπύλη απόκρισης Lorentz. Η απόκλιση από την καμπύλη Lorentz είναι προφανής όταν το ECDL ολισθαίνει και αυτή η απόκλιση χρησιμοποιείται για να βρούμε την απόκριση ολισθήσεως της συχνότητας ως συνάρτηση του χρόνου.

Μία νέα αντίληψη όσον αφορά τον συντονισμό έχει προταθεί και παρουσιαστεί, όπου η περιοχή συντονισμού συχνότητας αυξάνεται κάνοντας τον ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο στενότερο. Το laser έχει την αναλογία ολίσθησης των 1.5GHz/μs και καλή σταθερότητα συχνότητας. Η αλλαγή στο μήκος της κοιλότητας η οποία επιβάλλεται από τον ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον όγκο του κρυστάλλου. Εάν ο όγκος του κρυστάλλου αλλάζει απέναντι από την δέσμη κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσης, μπορούμε να επιτύχουμε την διαφορά στην επιμήκυνση της κοιλότητας η οποία χρειάζεται για συντονισμό ελεύθερο από αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης. Το σωστό σχήμα του κρυστάλλου μπορεί να αποδοθεί ως εξής: εάν θ είναι η γωνία πρόσπτωσης στην σχάρα, γ είναι μία συντεταγμένη όπως ορίζεται στο Σχ.(2.24), τότε το οπτικό μήκος $L(y)$ δίδεται από $L(y)=L(0)+y\tan\theta$. Εάν το ύψος του κρυστάλλου $h(y)$ μεταβάλλεται αργά, τότε η αλλαγή στο μήκος της κοιλότητας με την εφαρμοζόμενη τάση ως συνάρτηση του γ δίδεται από

$$\Delta L(y) = -\frac{\alpha}{2} n_z^3 r_{33} \frac{V}{h(y)}, \quad (2.10)$$

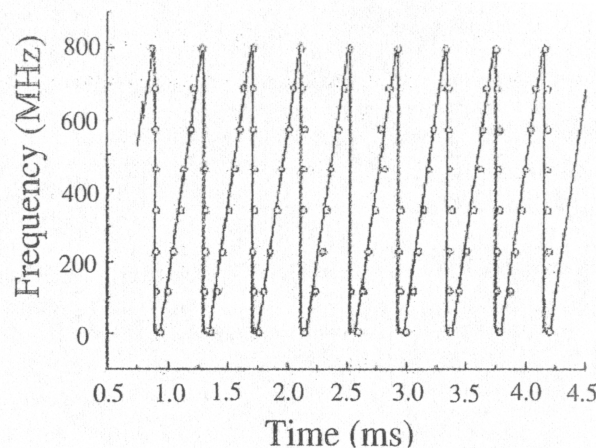
όπου α είναι το μήκος του κρυστάλλου, $n_z = n_e$ είναι ο ιδιόμορφος δείκτης διάθλασης, r_{33} είναι το σχετικό στοιχείο του ηλεκτροοπτικού επιμηκυντή, και V είναι η εφαρμοζόμενη τάση.

Το συμπέρασμα για τον συντονισμό ελεύθερο από αναπήδηση τρόπου είναι ότι η επιμήκυνση της κοιλότητας θα πρέπει να είναι ανάλογη με το μήκος της κοιλότητας για όλα τα y . Επομένως απαιτείται $\Delta L(y) = CL(y)$, όπου C είναι σταθερά. Αυτό σημαίνει

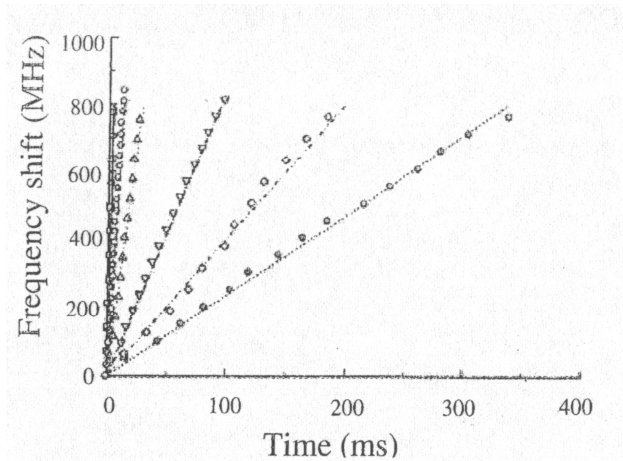
$$h(y) = -\frac{\frac{\alpha}{2} n_z^3 r_{33} V}{[L(0) + y \tan \theta] C} = h(0) \frac{1}{1 + \frac{\tan \theta}{L(0)} y}, \quad (2.11)$$

είναι ευκολότερο να σχεδιάσουμε έναν κρύσταλλο με επίπεδες επιφάνειες. Εάν το πλάτος της δέσμης είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος της κοιλότητας, μπορούμε να έχουμε

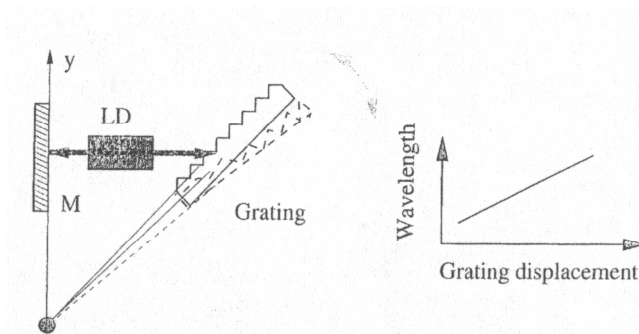
$$h(y) \approx h(0) \left[1 - \frac{\tan \theta}{L(0)} y \right]. \quad (2.12)$$



Σχ.2.22 Διάγραμμα της ολίσθησης συχνότητας του laser ως συνάρτηση του χρόνου. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες τιμές της ολίσθησης (chirp) συχνότητας χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του Σχ.2.21 ενώ η συμπαγής γραμμή είναι η αναμενόμενη απόκριση ολίσθησης συχνότητας υπολογιζόμενη με την Εξ.(2.9).

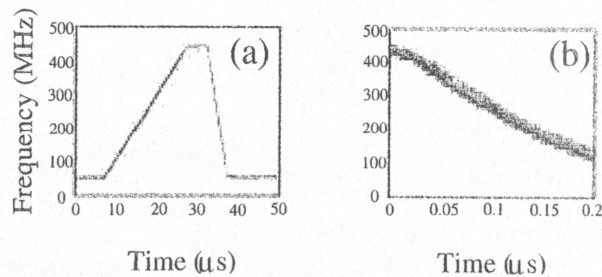


Σχ.2.23 Η απόκριση ολίσθησης συχνότητας του CECDL για διάρκεια ολίσθησης κυμαινόμενη από 3 έως 3.337 μ s. Η συμπαγής γραμμή αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη ολίσθηση συχνότητας ενώ τα σύμβολα αντιπροσωπεύουν τις μετρούμενες; Τιμές.



Σχ.2.24 Σχηματικό διάγραμμα της κίνησης της σχάρας και επομένως του συντονισμού μήκους-κύματος.

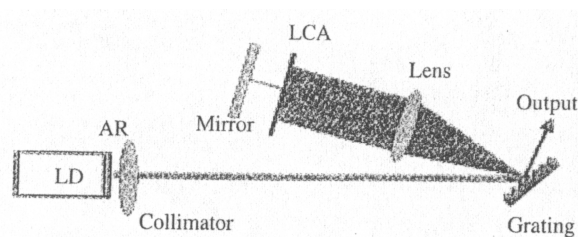
Για να πάρουμε όσο το δυνατόν την υψηλότερη αναλογία συχνότητας-τάσης συντονισμού, είναι επιθυμητό να έχουμε λεπτό κρύσταλλο. Η σταθερή μονού τρόπου λειτουργία διασφαλίζεται με τη χρήση μεγάλης τιμής της θ . Το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης φαίνεται στο Σχ.2.25(a). Η συνεχόμενη μονού τρόπου περιοχή σάρωσης των 50 GHz φαίνεται στο Σχ.2.25(b). Οι κουκίδες επάνω στην γραμμή είναι τα σημεία καταγεγραμμένων μετρήσεων, αλλά η αλλαγή παρακολουθείται συνεχόμενα. Η λειτουργία χωρίς αναπήδηση τρόπου παρακολουθείται παρατηρώντας την ομαλή κίνηση των κροσσών από ένα συμβολόμετρο σάρωσης Fabry-Perot. Το Σχ.2.26(a) δείχνει μία καταγραφή μίας σάρωσης των 400 MHz εφαρμόζοντας μία υψηλή τάση στον κρύσταλλο. Μία σάρωση με την μέγιστη ταχύτητα σάρωσης του 1.5 GHz/ μ s φαίνεται επίσης στο Σχ.2.26(b). Η ικανότητα γρήγορης σάρωσης και της σταθερότητας σε μικρή χρονική διάρκεια του laser αναλύεται με ετερόδυνη μίξη του laser με άλλο laser με εύρος ζώνης 100 kHz.



Σχ.2.26 Καταγραφή μίας ολίσθησης των 400 MHz (a) και μίας γρήγορης σάρωσης (b).

2.2.3 Ικανότητα συντονισμού μήκους κύματος με οθόνη υγρού κρυστάλλου

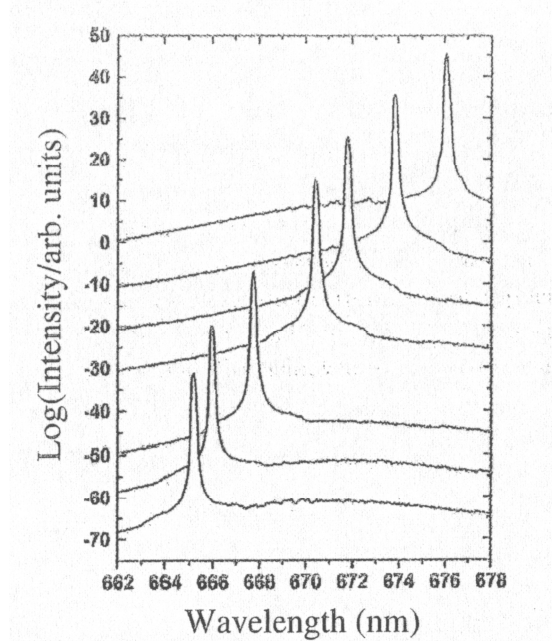
Μία νέα αντίληψη ενός ηλεκτρονικά συντονιζόμενου διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας με ταυτόχρονη ανάδραση και ενδοκοιλωτικό χωρικό διαχωρισμό των φασματικών συστατικών του laser έχει παρουσιαστεί με χρήση ενός διαμορφωτή υγρού κρυστάλλου χωρικού φωτός. Όπως φαίνεται στο Σχ.2.27, η εξωτερική κοιλότητα αποτελείται από μία εμπορική δίοδο laser των 670 nm με επικάλυψη AR, έναν εστιαστή, μία σχάρα περίθλασης, μία συστοιχία υγρού κρυστάλλου (liquid-crystal array=LCA), και ένα κάτοπτρο τερματισμού υψηλής ανακλαστικότητας. Η δέσμη εξόδου της δίοδου laser εστιάζεται και στέλνεται μέσα στην σχάρα περίθλασης. Η σχάρα είναι τοποθετημένη έτσι ώστε η πρώτη τάξη περίθλασης να κατευθύνεται προς τον φακό και η απόσταση μεταξύ της σχάρας και του φακού να ισούται με το εστιακό μήκος του φακού. Το κάτοπτρο υψηλής ανακλαστικότητας τοποθετείται στο άλλο εστιακό επίπεδο του φακού, και η LCA βρίσκεται απευθείας μπροστά από το κάτοπτρο. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της γεωμετρίας κοιλότητας είναι ότι χωρίς την LCA παρέχει ταυτόχρονη ανάδραση για όλα τα φασματικά συστατικά της δίοδου laser ενώ τα φασματικά συστατικά είναι χωρικά διαχωρισμένα μέσα στην κοιλότητα. Αυτός ο διαχωρισμός μας επιτρέπει να εισάγουμε την LCA ως ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο άνοιγμα για την επιλογή ανάδρασης για τα διάφορα φασματικά συστατικά, τα οποία μπορούν ανεξάρτητα να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν. Αυτή η διάταξη επιτρέπει και τον συντονισμό της εκπομπής μήκους κύματος και την λειτουργία του laser σε διάφορα μήκη κύματος ταυτόχρονα.



Σχ.2.27 Σχηματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικά συντονιζόμενου διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας.

Η ικανότητα συντονισμού χωρίς μηχανική κίνηση σε περιοχή 10nm από 665nm έως 676nm φαίνεται στο Σχ.2.28. Το εύρος ζώνης του laser μετρήθηκε με συμβολόμετρο Fabry-Perot και είναι μικρότερο από 30MHz με καταστολή μονού-τρόπου καλύτερα και από 10dB. Η πιθανότητα πολυχρωματικής σύγχρονης λειτουργίας είναι ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα του ηλεκτρονικά συντονιζόμενου διοδικού laser με εξωτερική κοιλότητα. Η λειτουργία δύο χρωμάτων επιδεικνύεται με μία δίοδο laser των 670nm όπως φαίνεται στο Σχ.2.29. Η διπλή εκπομπή παρέχεται σε διάφορες

φασματικές θέσεις και με διάφορες αποστάσεις μεταξύ των τρόπων εκπομπής. Χρησιμοποιώντας έναν ενδοκοιλοτικό μετασχηματισμό Fourier μπορούμε να επιδείξουμε την πολυχρωματική λειτουργία, την επέκταση απολαβής και την δημιουργία ενδοκοιλοτικής δεύτερης αρμονικής στην θέση της LCA με LCD ή συσκευές ψηφιακών κατόπτρων όπως φαίνεται στο παρόμοιο σχήμα με το Σχ.2.27. Ο νέος σχεδιασμός μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά laser όπως φαίνεται στα παραδείγματα διόδων laser και ενός laser οπτικής ίνας με πρόσμιξη Θουλίου στις ενδιάμεσες υπέρυθρες σε μήκος κύματος 2300nm. Επιπροσθέτως, έχουμε συντονιζόμενη εκπομπή στην περιοχή των 490nm με χρήση ενός ενδοκοιλοτικού SHG με μία και μόνο παράμετρο ελέγχου.



Σχ.2.28 Φάσματα εκπομπής ηλεκτρονικά συντονιζόμενου διοδικού laser με εξωτερική κοιλότητα για διάφορες ρυθμίσεις της LCA . Οι καμπύλες έχουν μετατοπιστεί κάθετα.

2.3 Διάφορα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας

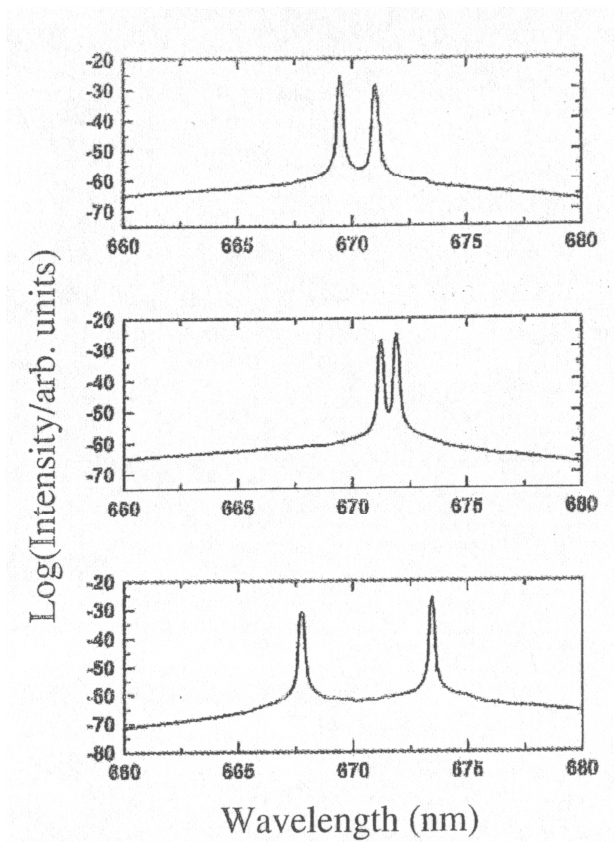
Σε αυτήν την ενότητα, διάφορα διάφορα διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας περιγράφονται, συμπεριλαμβανομένων των μπλέ-ιώδων laser διόδου ως μία σημαντική τάξη εφαρμογών που απαιτούν υψηλή ισχύ είτε σε παλμική ή συνεχούς κύματος λειτουργία σε κατάσταση λειτουργίας μονής συχνότητας, και με ευρύ συντονισμό ο οποίος είναι δυνατός από τα τελευταία laser κβαντικών κουκίδων μέσα σε μία εξωτερική κοιλότητα.

2.3.1 Μπλέ-ιώδη διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας

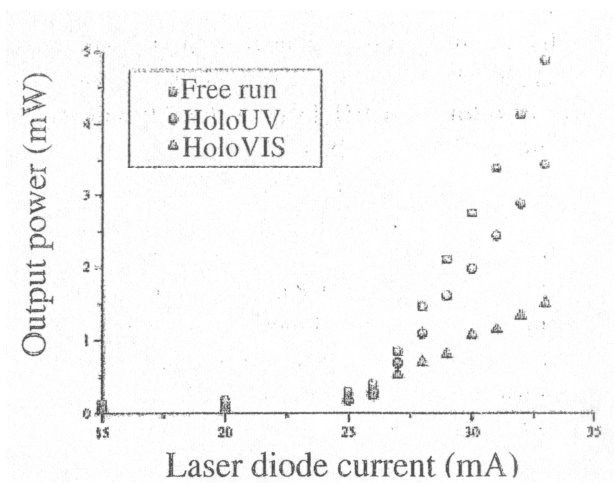
Η γρήγορη ανάπτυξη του διοδικού laser γαλλίου-αζώτου έφερε την πρόσφατη εμπορική διαθεσιμότητα των μπλέ-ιώδων CW διοδικών laser με περιοχή μήκων-κύματος από 370nm~430nm. Η κύρια αγορά αυτών των laser δεν είναι μόνο για οπτική αποθήκευση δεδομένων, αλλά επίσης και για επιστημονικές εφαρμογές. Είναι μία καλή εναλλακτική λύση αντί για τα dye ή Ti laser ζαφειριού διπλασιασμού συχνότητας.

Ο Conroy ανέφερε τα λεπτομερή χαρακτηριστικά ενός GaN διοδικού laser σε λειτουργία Littrow σε μία εξωτερική κοιλότητα γύρω στα 392nm, δίνοντας μία συντονιζόμενη, μονής συχνότητας έξοδο ισχύος σε πάνω από 3.5mW. Το laser μπορεί

να συντονιστεί ομαλά σε πάνω από 6 GHz και 2.7nm με ασυνέχειες με μέγιστο όριο εύρους ζώνης στα 5 MHz.



Σχ.2.29 Τρία φάσματα εκπομπής ηλεκτρονικά συντονιζόμενου διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας σε διχρωματική λειτουργία.

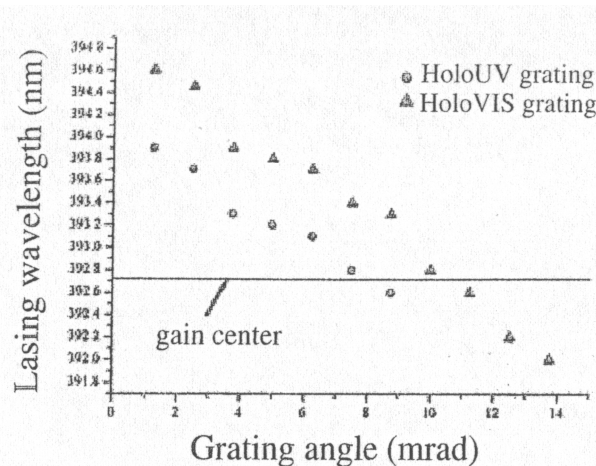


Σχ.2.30 Ισχύς εξόδου laser ελεύθερης λειτουργίας και laser εξωτερικής κοιλότητας ως συνάρτηση του ρεύματος laser.

Το Σχ.2.30 δείχνει τα πρότυπα χαρακτηριστικά εξόδου της διόδου της επιχείρησης Nichia NLHV500 με ονομαστική cw ισχύ εξόδου στα 5 mW στα 393nm στην περίπτωση ελεύθερης λειτουργίας και στην περίπτωση εξωτερικής κοιλότητας σε διάταξη Littrow. Όπως φαίνεται στο Σχ.2.30, μπορούμε να δούμε ότι η ολογραφική UV (holo UV) σχάρα με ελάχιστη αποδοτικότητα περίθλασης 30% μας δίνει μία μεγαλύτερη κλίση

αποδοτικότητας 46%, με μέγιστο 3.5mW ισχύος εξόδου μονής συχνότητας. Η πιο αποδοτική ολογραφική ορατού (holoVIS) σχάρα (50%) μας δείχνει μία μετρήσιμα μειωμένο κατώφλι 26.4 mA αλλά με χαμηλότερη κλίση αποδοτικότητας κατά 17%, επομένως περιορίζοντας την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ μονής συχνότητας στο 1.5mW.

Η περιοχή συντονισμού της εξωτερικής κοιλότητας παρουσιάζεται στο Σχ.2.31 όπως η γωνία και θέση της σχάρας αλλάζει χειροκίνητα. Η περιοχή συντονισμού είναι 1.3nm και 2.7nm για HoloUV και HoloVIS αντίστοιχα. Για να συγκρίνουμε αυτήν τη συμπεριφορά συντονισμού, το Σχ.2.32 δείχνει την συμπεριφορά συντονισμού των διόδων 635nm και 670nm με ίδια διάταξη. Και τα δύο laser είναι με επικάλυψη AR με ανακλαστικότητα λιγότερο από 10^{-5} , και βρίσκουμε μία περιοχή συντονισμού με ασυνέχειες πάνω από 10nm για αυτά τα δύο διοδικά laser. Η περιορισμένη ασυνεχής περιοχή συντονισμού των GaN διόδων laser σε μία εξωτερική κοιλότητα είναι επομένως ένα μειονέκτημα. Η έξοδος θα μπορούσε να είναι συνεχόμενα συντονιζόμενη με τη χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα χαμηλής τάσης ώστε να αλλάξει η γωνία της σχάρας και η απόσταση της από το laser διόδου. Ο συντονισμός των 6GHz χωρίς αναπήδηση τρόπου έχει επιτευχθεί με τάση 10V peak to peak. Ένα εύρος ζώνης 5MHz μονού τρόπου από etalon σάρωσης φαίνεται στο Σχ.2.33. Η εφαρμογή αυτού του τύπου laser στη φασματοσκόπηση υψηλής ευκρίνειας και στην παγίδευση ατόμων/ιόντων θα δοθεί στο κεφάλαιο 8.

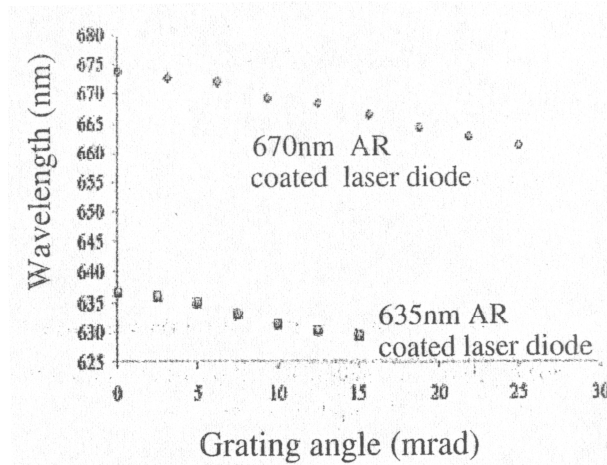


Σχ.2.31 Ασυνεχής συντονισμός μήκους-κύματος του ιώδους διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας χρησιμοποιώντας σχάρες HoloUV και HoloVIS. Το κέντρο απολαβής της διόδου που βρίσκεται σε ελεύθερη λειτουργία ήταν 392.7nm.

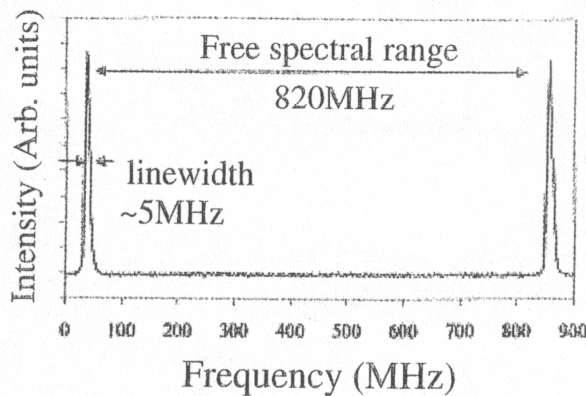
Ένα νέο σύστημα ECDL με κοιλότητα φίλτρου έχει αναπτυχθεί πρόσφατα [(Hayasaka (2002))] το οποίο αντανάκλα το περισσότερο μέρος της ιστορίας. Η πειραματική διάταξη με ένα ιώδες διοδικό laser στα 397nm φαίνεται στο Σχ.2.34. Μία ισχύς εξόδου των 13.2mW από ECDL κατευθύνεται σε μία κοιλότητα δακτυλίου με μετρούμενη finesse 400, κατά προσέγγιση 74% της δέσμης εισόδου συζευγνύεται μέσα στην κοιλότητα, και μία ισχύς εξόδου 4.1mW εκπέμπεται από το κάτοπτρο εξόδου. Το κλείδωμα της συχνότητας ECDL στην κοιλότητα γίνεται με οπτική ανάδραση σε συντονισμό. Τα φάσματα του ιώδους laser τα οποία παρατηρούνται με έναν αναλυτή οπτικού φάσματος φαίνονται στο Σχ.2.35(a). Παρά το γεγονός ότι πολλοί μικροί διαμήκους τρόποι παρατηρήθηκαν στο ECDL αναιρέθηκαν πλήρως από την κοιλότητα-φίλτρο (Σχ.2.35(c)).

Οι φασματοσκοπικές ιδιότητες από ένα από τα πρώτα δείγματα διόδου μπλε εκπομπής βασιζόμενη στο GaN χαρακτηρίστηκαν από τον Leinen (2000). Με μία τέτοια δίοδο laser να λειτουργεί μέσα σε μία πρότυπη διάταξη εξωτερικής κοιλότητας, βρέθηκε μία περιοχή

συντονισμού χωρίς αναπήδηση τρόπου περισσότερο από 20GHz και ένα εύρος φάσματος 10MHz. Η εφαρμογή αυτών των ιώδων laser στην φασματοσκόπηση υψηλής ευκρίνειας θα εισαχθεί στο κεφάλαιο 8 επίσης.



Σχ.2.32 Ασυνεχής συντονισμός μήκους-κύματος δύο διόδων 670nm και 635nm σε συμπαγή γεωμετρία εξωτερικής κοιλότητας. Η περιοχή συντονισμού είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές για το ιώδες ECDL.



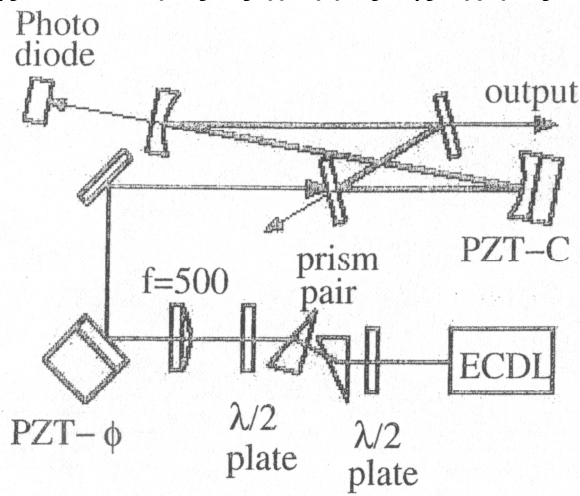
Σχ.2.33 Μέτρηση του εύρους ζώνης του ιώδους ECDL χρησιμοποιώντας ένα etalon Fabry-Perot με FSR 820MHz και finesse 200

2.3.2 Διοδικά laser εξωτερικής κοιλότητας υψηλής ισχύος

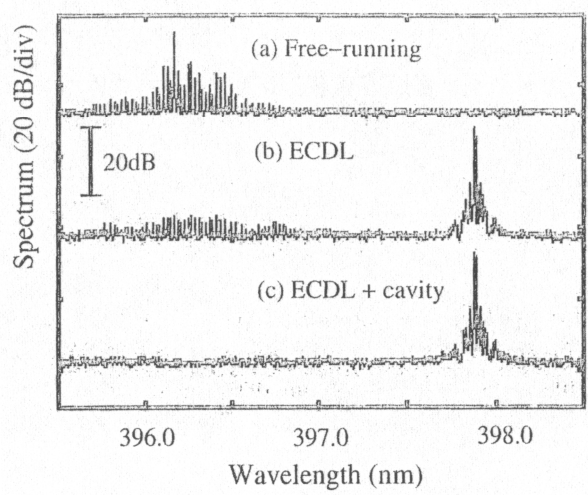
Η προφανής διαφορά μεταξύ των χαμηλής και υψηλής ισχύος laser ημιαγωγού δεν ορίζεται καθαρά. Μπορεί να εξαρτάται από τον τύπο του laser και από την εφαρμογή του. Γενικά η ισχύς πάνω από 50 mW για μονό τρόπο, μονή συχνότητα και πάνω από 500mW για πολυτροπικά διοδικά laser ευρείας περιοχής, μπορεί να αποκαλεστεί υψηλή ισχύς. Για να έχουμε υψηλή οπτική ισχύ με υψηλή ποιότητα δέσμης, laser και ενισχυτές με κωνική περιοχή απολαβής έχουν αναπτυχθεί, και με ικανότητα συντονισμού μήκους κύματος. Μία σχάρα περίθλασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έχουμε ένα σύστημα εξωτερικής κοιλότητας συμπεριλαμβανομένου του κωνικού οπτικού ενισχυτή ως στοιχείο απολαβής. Έχει παραχθεί ισχύς εξόδου μεγαλύτερη από 1W cw με τέτοιες συσκευές σε μήκη κύματος 850nm και 970nm. Έχει αναφερθεί ένα συντονιζόμενο με σχάρα κωνικό laser εξωτερικής κοιλότητας στην περιοχή των 1055nm . Το Σχ.2.36

δείχνει την πειραματική διάταξη, το φως που εκπέμπεται από την στενή πλευρά του κωνικού ενισχυτή εστιάζεται από έναν ασφαιρικό φακό ($f=6.5\text{mm}$ $NA=0.62$) επάνω σε μία σχάρα περίθλασης με 1200 γραμμές/mm, η οποία είναι στερεωμένη σε διάταξη Littrow. Η σχάρα είναι προσανατολισμένη έτσι ώστε οι γραμμές της σχάρας να είναι παράλληλες προς την ενεργή περιοχή για να σκεδάσει το φάσμα κάθετα στα επιστρώματα.

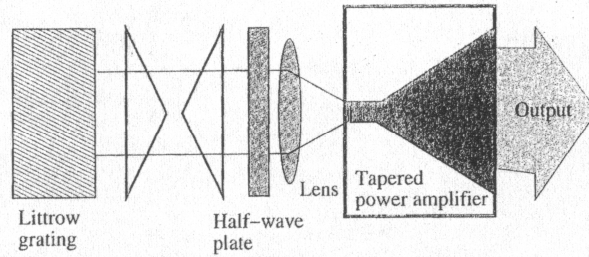
Η διάταξη έχει δύο πλεονεκτήματα: πρώτον, η διάμετρος της εστιαζόμενης δέσμης είναι μεγαλύτερη στην κάθετη διεύθυνση και επομένως περισσότερες γραμμές της σχάρας φωτίζονται, το οποίο οδηγεί σε σκέδαση μεγαλύτερου μήκους κύματος. Δεύτερον, ο μόνος $1\mu\text{m}$ σε πάχος κάθετος κυματοδηγός του ενισχυτή ενεργεί ως σπή εισόδου ενός μονοχρωματιστή για να συλλάβει το μήκος κύματος λειτουργίας. Για να αυξήσουμε την ανακλαστικότητα της σχάρας στην πρώτη τάξη κατά 13%, μία πλάκα μισού κύματος εισάγεται μέσα στην εξωτερική κοιλότητα η οποία περιστρέφει την διεύθυνση της πόλωσης κάθετα προς τις γραμμές της σχάρας.



Σχ.2.34 Σχηματικό πειραματικής διάταξης.

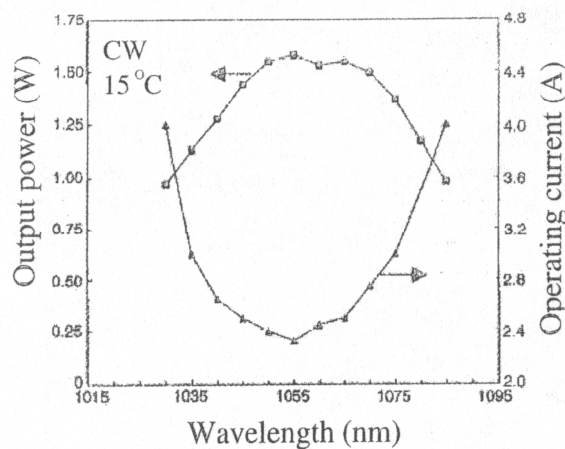


Σχ.2.35 Φάσμα του ιώδους διοδικού laser.



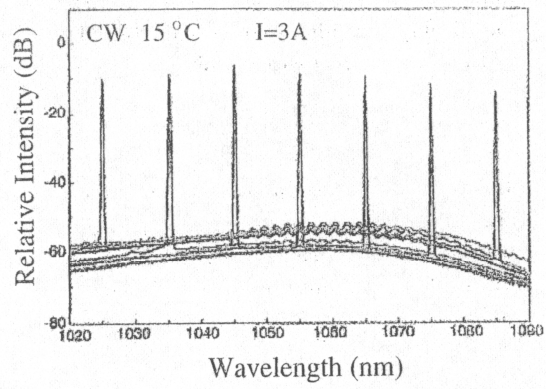
Σχ.2.36 Σχηματικό πειραματικής διάταξης laser εξωτερικής κοιλότητας συντονιζόμενου με σχάρα.

Η καμπύλη συντονισμού του laser εξωτερικής κοιλότητας για cw λειτουργία φαίνεται στο Σχ.2.37. Μία ισχύς εξόδου πάνω από 1W παρέχεται στην ευρεία περιοχή συντονισμού των 55nm, από 1030nm έως 1085nm με ρεύμα 4A.



Σχ.2.37 Καμπύλες συντονισμού για laser με εξωτερική κοιλότητα.

Επίσης φαίνεται στο σχήμα το ρεύμα λειτουργίας που χρειάζεται για να πάρουμε 1.0W ισχύος εξόδου με ελάχιστο 2.3A στα 1055nm. Το φάσμα εκπομπής για διάφορες θέσεις της σχάρας φαίνεται στο Σχ.2.38. Η καταστολή των πλευρικών τρόπων κατά μήκος της όλης περιοχής συντονισμού ποικίλει από 40 έως 50dB, το μετρούμενο εύρος ζώνης (FWHM) είναι ~0.1 nm, το οποίο περιορίζεται από την ευκρίνεια του αναλυτή οπτικού φάσματος. Μία τεχνική κλειδώματος-εισοχής έχει υιοθετηθεί για την παραγωγή συντονιζόμενης εξόδου μονής συχνότητας από υψηλής ισχύος AlGaAs συστοιχία διόδων laser. Ένα laser εξωτερικής κοιλότητας στενού εύρους ζώνης χρησιμοποιείται ως κύριος ταλαντωτής. Με ισχύ εισροής 15mW, μία συνολική ισχύς εξόδου 1.0W παρέχεται από την συστοιχία των διόδων laser με φασματικό εύρος ζώνης λιγότερο από 38kHz, μία περιοχή συντονισμού μήκους κύματος των 13nm, και μία δέσμη απομακρυσμένου πεδίου μονού λοβού εύρους 0.67°. Πιο πρόσφατα, ο Bayram και Churrp (2002) έχουν αναπτύξει την εμπορική συστοιχία διόδων laser των 2W σε πρότυπη Littman-Metcalf διάταξη. Αυτή η συστοιχία διόδων laser εξωτερικής κοιλότητας λειτουργεί σε έναν κυρίαρχο μονό διαμήκη τρόπο στενού εύρους φάσματος των 120 MHz και με ισχύ 1W ή και περισσότερο. Αυτή η βελτίωση μας δίνει την δυνατότητα για εφαρμογές όπως η φασματοσκόπηση, τη ψύξη και παγίδευση του laser με σχετικά ανέξοδες συστοιχίες διόδων laser.



Σχ.2.38 Φάσματα εκπομπής συντονισμού για laser εξωτερικής κοιλότητας μεταξύ 1025 και 1085nm με ρεύμα οδήγησης 3A.

B) Συντονισμός με κλειδωμένο τρόπο ταλάντωσης πάνω από τα 80 GHz ενός laser ημιαγωγού εκτεταμένης κοιλότητας χωρίς επίστρωση αποφυγής αντανάκλασεων.

Ανακοινώνουμε το συντονισμό με κλειδωμένο τρόπο ταλάντωσης στα 80GHz ενός laser ημιαγωγού εκτεταμένης κοιλότητας ECDL (extended cavity diode laser) χωρίς να υπάρχει ανάγκη για επίστρωση αποφυγής αντανάκλασεων στην έδρα του ημιαγωγού. Μία μεγάλη περιοχή συνεχούς συντονισμού επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ένα απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο ακαριαία τροποποιεί το ρεύμα του laser ημιαγωγού και το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας ώστε να βρίσκονται στη κατάλληλη αναλογία. Το ECDL χρησιμοποιεί ένα εμπορικού τύπου laser ημιαγωγού AlGaAs μοναδικού τρόπου (single mode) το οποίο λειτουργεί στα 814 nm τοποθετημένο σε διάταξη εξωτερικής κοιλότητας Littrow. Η ευκολία εφαρμογής αυτής της τεχνικής στα πιο ευρέως διαθέσιμα laser ημιαγωγού μοναδικού τρόπου χωρίς την απαίτηση επίστρωσης αποφυγής αντανάκλασεων, δημιουργεί μία ελκυστική προσέγγιση για την πραγματοποίηση συντονισμού κλειδωμένου τρόπου κατά μήκος εκτεταμένων περιοχών συχνοτήτων. ©2001 Αμερικανικό Ινστιτούτο Φυσικής. [DO1:10.1063.1.1405783]

I.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συντονιζόμενες πηγές laser συνεχούς κύματος cw (cw = continuous wave) οι οποίες επιδεικνύουν ικανότητα συνεχούς συντονισμού ευρείας περιοχής συχνοτήτων και μήκους κύματος έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μία ποικιλία εφαρμογών όπως η φασματοσκοπία υψηλής ευκρίνειας¹, τα επικοινωνιακά δίκτυα ευρέους φάσματος² και ως πηγές άντλησης για πειράματα στην μη γραμμική οπτική.

Τα laser ημιαγωγού συνεχούς παλμού και ενός διαμήκη ρυθμού είναι ελκυστικά για πολλές τέτοιες εφαρμογές εξαιτίας της ικανότητας τους για συντονισμό σε μία σχετικά μεγάλη περιοχή, ο οποίος συντονισμός είναι επιτεύξιμος μέσω μεταβολής της θερμοκρασίας ή του ρεύματος έκχυσης της διόδου, για τις μικρές διαστάσεις τους και για το χαμηλό κόστος τους. Τα διοδικά laser κατανεμημένου ανακλαστήρα Bragg DBR⁵ (DBR=Distributed Bragg Reflector)επιδεικνύουν υψηλή σταθερότητα φάσματος και ισχύος, χαμηλή ευαισθησία σε οπτική ανάδραση, και στενή φασματική γραμμή. Όμως το σχετικά υψηλό κόστος τους και η διαθεσιμότητα σε περιορισμένη μόνο περιοχή μηκών κύματος περιορίζει την ευρεία χρήση τους σε πολλές εφαρμογές. Αντίθετα, τα διοδικά laser Fabry-Perot είναι διαθέσιμα σε μεγάλο αριθμό μηκών κύματος. Στην περίπτωση όμως των απλών συσκευών Fabry-Perot η ευαισθησία του διαμήκη τρόπου ταλάντωσης και η μεγάλη ευαισθησία στην οπτική ανάδραση, στις μεταβολές της θερμοκρασίας και του ρεύματος έκχυσης μπορούν να περιορίσουν σοβαρά τη φασματική σταθερότητα και τη περιοχή μη αναπήδησης τρόπου ταλάντωσης. Η ανάδραση ενός μέρους της οπτικής ακτινοβολίας πίσω στην δίοδο, είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη διατήρηση σταθερού και ενός διαμήκη τρόπου λειτουργίας παρουσία ακόμα και τέτοιων περιπλοκών⁶. Ακόμη έχει ως αποτέλεσμα την ουσιαστική μείωση του πάχους φασματικής γραμμής εκπομπής και κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας μπορεί να επιτρέψει τη συνεχόμενη σάρωση για

κάποιες δεκάδες GHz. Αυτή η τεχνική έχει ήδη χρησιμοποιηθεί σε μια ποικιλία οπτικών διατάξεων ώστε να βελτιώσει τη φασματική ποιότητα και την ικανότητα συνεχούς σάρωσης των διοδικών laser.

Μία οπτική διάταξη η οποία κάνει χρήση οπτικής ανάδρασης είναι η χρήση ενός διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας ECDL. Σ' αυτή τη διάταξη το διοδικο laser τοποθετείται σε μια εξωτερική κοιλότητα σχηματισμένη από ένα φράγμα περίθλασης, όπου η οπτική ανάδραση από φράγμα περίθλασης έχει σαν αποτέλεσμα τη λειτουργία του laser σε ένα μόνο μέσω διαμήκη τρόπο λειτουργίας. Αυτή η διάταξη ουσιαστικά μειώνει την εξάρτηση της συχνότητας εξόδου από το ρεύμα και τη θερμοκρασία του laser, μειώνει την ευαισθησία στην οπτική ανάδραση και επιτρέπει τον συντονισμό του μήκους κύματος στην πλειοψηφία των συχνοτήτων που βρίσκονται κάτω από την καμπύλη κέρδους του ημιαγωγού στοιχείου με περιστροφή του φράγματος περίθλασης. Η διάταξη της εξωτερικής κοιλότητας έχει φανεί να αποδίδει ουσιαστικές βελτιώσεις στη φασματική ποιότητα διόδων laser μέσω της ελάττωσης του εύρους της εξόδου της φασματικής γραμμής δεκάδες MHz σε εκατοντάδες KHz. Ένα μειονέκτημα της διάταξης αυτής, είναι ότι η συνεχής σάρωση μήκους κύματος με ρύθμιση του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας περιορίζεται από την αυστηρή προϋπόθεση ότι τα δύο ταλαντώμενα οπτικά πεδία, το ένα που ταλαντώνεται μέσα στο τσιπ της διόδου μεταξύ της εμπρόσθιας και της οπίσθιας έδρας του, και το άλλο μεταξύ της οπίσθιας έδρας διόδου και του φράγματος περίθλασης, πρέπει να παραμείνουν συμφασικά. Εάν αυτή η προϋπόθεση ικανοποιείται, ένα μοναδικό στάσιμο κύμα θα ταλαντώνεται και στην εξωτερική κοιλότητα και στη δίοδο laser.

Για να διατηρήσουμε τα δύο συντονισμένα πεδία σε φάση, μία προσέγγιση είναι η απευθείας απόσβεση του ταλαντούμενου πεδίου μέσα στο τσιπ της διόδου χρησιμοποιώντας μια μη ανακλαστική επίστρωση στην έδρα εξόδου της διόδου. Αυτή η μέθοδος όμως απαιτεί εξειδικευμένη σχεδίαση της επίστρωσης με αποτέλεσμα το αυξανόμενο κόστος και ορισμένες φορές περιορίζεται από πλευράς εμπορικής διαθεσιμότητας.

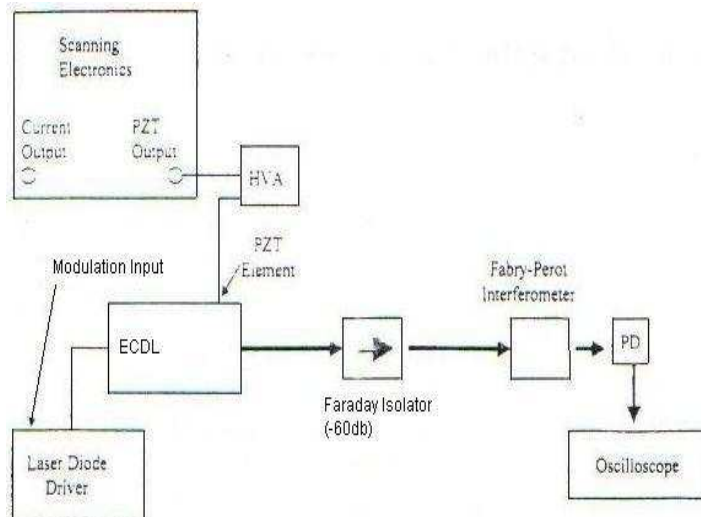
Μία εναλλακτική τεχνική για την συνεχή σάρωση του διαμήκη ρυθμού ταλάντωσης ενός ECDL βασίζεται στην ταυτόχρονη μεταβολή του ρεύματος έκχυσης της διόδου και της γωνίας που είναι τοποθετημένο το φράγμα της περίθλασης με ένα προκαθορισμένο λόγο ο οποίος ελέγχεται ηλεκτρονικά. Αυτό επιτρέπει στο μήκος της εσωτερικής κοιλότητας που σχηματίζεται μεταξύ των εδρών του τσιπ της διόδου, και σ' αυτό της εξωτερικής κοιλότητας που δημιουργείται μεταξύ της έδρας εξόδου της διόδου και του φράγματος περίθλασης, να μεταβάλλονται με ένα καθορισμένο λόγο ώστε να διατηρείται η λειτουργία μοναδικού διαμήκη τρόπου ταλάντωσης του ECDL ενώ αυτό συντονίζεται. Αυτή η προσέγγιση είναι ελκυστική διότι μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς τη χρήση ειδικής μη ανακλαστικής επίστρωσης στην δίοδο.

Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί προηγουμένως ώστε να επιδείξει συνεχόμενη σάρωση ενός ECDL για 22 GHz χρησιμοποιώντας έλεγχο μέσω υπολογιστή. Σε αυτό το άρθρο περιγράφουμε την συνεχόμενη μοναδικού τρόπου ταλάντωσης ενός ECDL πάνω από 80 GHz βασισμένη στη μέθοδο με χρήση ενός απλού και χαμηλού κόστους ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο ελέγχει το λόγο μεταβολής του ρεύματος διόδου και του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας. Αυτή η λειτουργία έχει επιτευχθεί χωρίς τη χρήση

ειδικής επίστρωσης μη ανακλαστικής επιφάνειας στην έδρα εξόδου της διόδου και χωρίς τον έλεγχο μέσω υπολογιστή.

II ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Το σύστημα ECDL που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία είναι τύπου διατάξεως Littrow με εξωτερική κοιλότητα. Η δίοδος laser είναι μία συσκευή AlGaAs (SDL-5410) μονής λωρίδας, μοναδικού διαμήκη και εγκάρσιου τρόπου ταλάντωσης με λειτουργία στα 814 nm ,με μέγιστη ισχύ εξόδου στα 100 mW. Η δίοδος έχει μία τυπική επικάλυψη μείωσης ανακλάσεων (~4%) στην έδρα εξόδου, η οποία δεν είναι αρκετή ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα σύζευξης μεταξύ των δυο κοιλοτήτων. Η δέσμη εξόδου του laser ευθυγραμμίζεται χρησιμοποιώντας φακό με $NA=0.65$ και κατευθύνεται σε ένα φράγμα περίθλασης με 1800 γραμμές/mm συμπληρώνοντας την εξωτερική κοιλότητα. Η διάταξη Littrow είχε ως αποτέλεσμα την ανάκλαση της δέσμης περίθλασης πρώτης τάξεως (~20%) προς την κοιλότητα και την εξαγωγή της δέσμης περίθλασης μηδενικής τάξεως ως δέσμης εξόδου. Η μέγιστη ισχύς εξόδου στην μηδενική τάξη μετρήθηκε στα περίπου 80 mW. Η όλη διάταξη σταθεροποιήθηκε θερμοκρασιακά χρησιμοποιώντας ψύκτη Peltier. Το σύστημα ECDL επιδεικνύει μία αξιοσημείωτη σταθερότητα ισχύος (~1% από κορυφή σε κορυφή ένταση θορύβου) και αποδεκτή φασματική σταθερότητα σε μεγάλη διάρκεια χρόνου (ολίσθηση < 3MHz/min). Το πάχος φασματικής γραμμής μετρήθηκε με ένα ορεσσιακό συμβολόμετρο Fabry-Perot (finesse~200. FSR~300MHz) και βρέθηκε να είναι μικρότερο από 1MHz. Το φράγμα περίθλασης τοποθετήθηκε σε βάση κατόπτρου και η μικρομετρική ρύθμιση της θέσης του κατόπτρου επιτεύχθηκε με τη χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου τοποθετημένου μεταξύ της βίδας οριζόντιας ρύθμισης και της επιφάνειας στήριξης της βάσης του κατόπτρου. Επειδή το σημείο περιστροφής της βάσης ήταν εκτός άξονα σε σχέση με την κοιλότητα οι αλλαγές στο μήκος PZT επιφέρουν αλλαγές και στο μήκος της εξωτερικής κοιλότητας και σε μικρότερο ποσοστό στη γωνία του φράγματος περίθλασης. Η εναλλαγή του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας με αυτόν τον τρόπο έδωσε τη δυνατότητα για συνεχόμενο συντονισμό ελεύθερο από αναπηδήσεις τρόπου ταλάντωσης από 4 έως 6 GHz και με περιορισμό από το βαθμό ανακλάσεως στην έδρα της διόδου. Επιτεύχθηκε συντονισμός ευρείας κλίμακας πάνω από 14 nm περιστρέφοντας την βίδα οριζόντιας ρύθμισης της κατοπτρικής βάσης για να αλλάξουμε τη γωνία της εσχάρας.



Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη για συντονιζόμενο διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας (HVA: high voltage amplifier ~ ενισχυτής υψηλής τάσεως. ECDL: external cavity diode laser ~ διοδικό laser εξωτερικής κοιλότητας. PD: photodiode ~ φωτοδίοδος)

Για συνεχή συντονισμό σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων του ECDL, το μήκος εξωτερικής κοιλότητας και το ρεύμα οδήγησης της διόδου laser ελέγχονται από ένα απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο φαίνεται στο σχήμα 1. Απλά, το κύκλωμα αποτελείται από τέσσερις τελεστικούς ενισχυτές και έναν αριθμό αντιστάσεων. Έχει δύο ακροδέκτες εξόδου, που μεταφέρουν σήματα στον έλεγχο PZT και στην πηγή ρεύματος της διόδου laser. Ο λόγος των δύο σημάτων τάσης εξόδου στους δύο ακροδέκτες καθορίζεται από ένα απλό αναλυτικό μοντέλο.⁷ Το μοντέλο σηματοδοτεί πώς πρέπει να αλλάζει το ρεύμα έκχυσης της διόδου σε σχέση με την τάση που αναπτύσσεται στο στοιχείο PZT έτσι ώστε το φάσμα της περιθλώμενης δέσμης πρώτης τάξεως από το φράγμα περίθλασης (εξαρτάται από τη γωνία του φράγματος περίθλασης), και το φάσμα διαμήκη τρόπου ταλάντωσης της διόδου laser (εξαρτάται από το μήκος της κοιλότητας του της διόδου laser) να συντονίζονται ταυτόχρονα.

Αναλυτικά, το μοντέλο συμπεριλαμβάνει δύο ανεξάρτητες κοιλότητες: μία μικρή κοιλότητα που σχηματίζεται από τις δύο έδρες της διόδου laser έχοντας μήκος οπτικού δρόμου L_1 και μια μεγαλύτερη σε μήκος κοιλότητα η οποία καθορίζεται από την έδρα εξόδου της διόδου laser και το φράγμα περίθλασης η οποία έχει μήκος L_2 . Προκειμένου να αλλάξουμε το μήκος κύματος κατά $\Delta\lambda$ χωρίς αλλαγή τρόπου ταλάντωσης, ο αριθμός των διαμηκών τρόπων μέσα στην μικρή κοιλότητα N_1 και αυτών στη μεγάλη κοιλότητα N_2 πρέπει να παραμείνει σταθερός. Ο αριθμός των διαμηκών τρόπων ταλάντωσης στις δύο κοιλότητες έχουν σχέση τα αντίστοιχα μήκη των κοιλοτήτων με τον εξής τρόπο

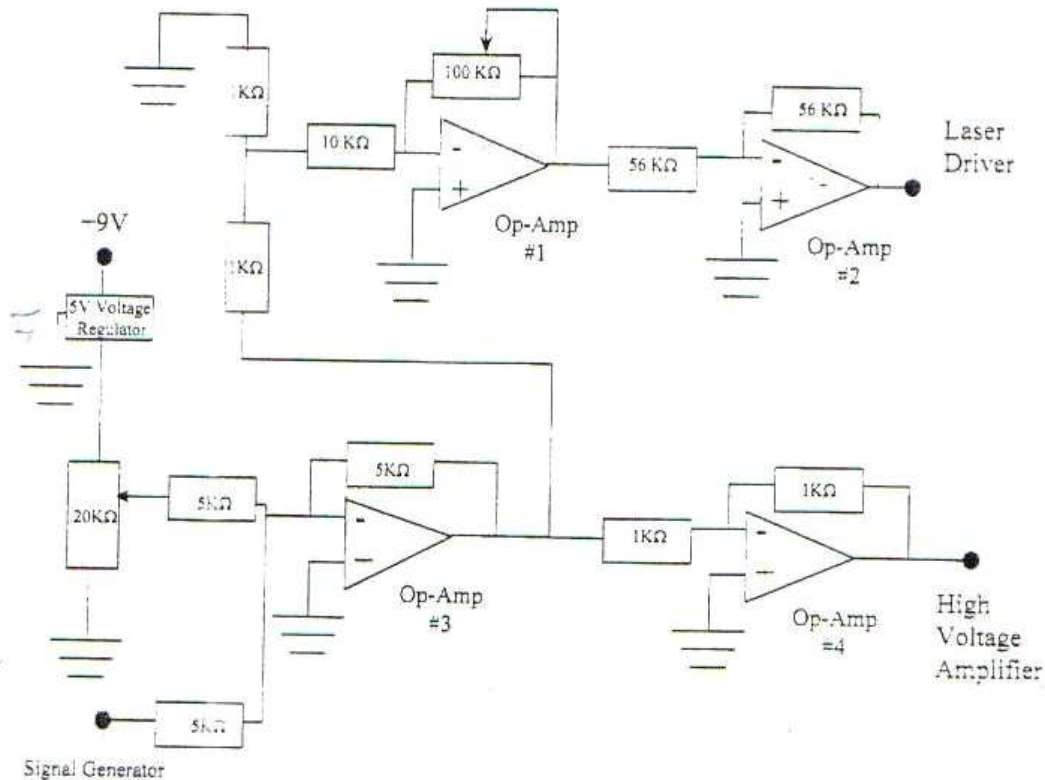
$$L_1 = N_1 \lambda / 2 \quad (1 \alpha)$$

$$L_2 = N_2 \lambda / 2 \quad (1 \beta)$$

Όπου λ είναι το μήκος κύματος στο κενό.

Αυτό δείχνει ότι οι ελάχιστες μεταβολές στα μήκη των κοιλοτήτων που χρειάζονται για να διατηρηθεί η λειτουργία σάρωσης μοναδικού διαμήκη τρόπου ταλάντωσης, δίδονται από

$$\frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{\Delta L_2}{L_2} \quad (2)$$



Σχήμα 2. Ηλεκτρονικό κύκλωμα που επιτρέπει σύγχρονη μεταβολή του ρεύματος της διόδου laser και του μήκους της εξωτερικής κοιλοτήτας υπό καθορισμένο λόγο. Όλοι οι τελεστικοί ενισχυτές είναι ίδιοι (OP27).

Όπου ΔL_1 και ΔL_2 είναι οι μεταβολές που θα έπρεπε να εφαρμοστούν στη κοιλοότητα του κελύφους της διόδου laser και στην εκτεταμένη κοιλοότητα αντίστοιχα, ώστε να επιτύχουμε συντονισμό ελεύθερο αναπήδησης τρόπου. Επομένως για να σαρώσουμε με συνεχή τρόπο το ECDL πρέπει να τηρείται η εξίσωση 2.

Για τη διάταξη Littrow η πρώτης τάξεως περιθλώμενης δέσμης από το φράγμα περίθλασης θα ακολουθήσει το ίδιο οπτικό δρόμο με την δέσμη πρόσπτωσης. Επομένως η επόμενη συνθήκη πρέπει να τηρείται:⁸

$$2d \sin\theta = \lambda \quad (3)$$

Όπου d είναι το διάστημα μεταξύ των δυο αυλακώσεων και θ είναι η γωνία πρόσπτωσης πάνω στο φράγμα περίθλασης. Συνδιάζοντας τις εξισώσεις 1 έως 3 το πόσο θα πρέπει να αλλάξει το μήκος της εξωτερικής κοιλοτήτας μαζί

με την γωνία πρόσπτωσης πάνω στο φράγμα περίθλασης εάν ο τρόπος ταλάντωσης της εξωτερικής κοιλότητας παραμείνει στο κέντρο του εύρους συχνοτήτων του φράγματος περίθλασης, αποφεύγοντας έτσι μια αναπήδηση τρόπου ταλάντωσης, βρίσκεται με

$$\Delta L_2 = L_2 \frac{\Delta \theta}{\tan \theta} \quad (4)$$

Εάν καθορίσουμε την παράμετρο β να εκφράζει την αλλαγή στο μήκος κύματος σε σχέση με το ρεύμα οδήγησης της διόδου laser, με τον ακόλουθο τρόπο

$$\beta = \frac{\Delta \lambda}{\Delta I_{LD}} \quad (5)$$

τότε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1) μπορούμε να δείξουμε ότι

$$\Delta I_{LD} = \frac{2 \Delta L_2}{\beta N_2} \quad (6)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1),(4), και (6), παίρνουμε

$$\Delta I_{LD} = \frac{\lambda}{\beta \tan \theta} \Delta \theta \quad (7)$$

Η μεταβολή στη γωνία της εσχάρας, $\Delta \theta$, μπορεί επίσης να εκφραστεί σε σχέση με την αλλαγή μήκους του πιεζοηλεκτρικού μετατροπέα με την εφαρμοζόμενη τάση ως:

$$\Delta \theta = -\delta \frac{\Delta V_{PZT}}{l} \quad (8)$$

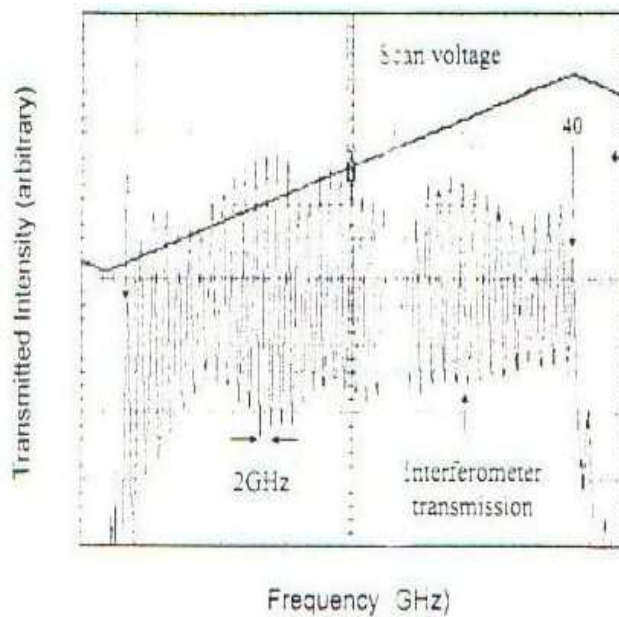
όπου ΔV_{PZT} είναι η μεταβολή στην τάση που εφαρμόζεται στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, l είναι η απόσταση μεταξύ της επαφής PZT και του σημείου περιστροφής πάνω στην εσχάρα, και δ είναι η αλλαγή στο μήκος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου με την εφαρμογή τάσης. Το πρόσημο μπροστά στο δεξιό μέρος της εξίσωσης (8) εξαρτάται από τη γεωμετρία του ECDL. Ποιο αναλυτικά το πρόσημο της εξ. (8) είναι μείον όταν η γωνία περίθλασης μειώνεται ενώ η τάση στο PZT αυξάνεται και συν όταν η γωνία περίθλασης θ αυξάνεται ενώ η τάση στο PZT αυξάνεται. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (7) και (8) παίρνουμε τη σχέση μεταξύ της αλλαγής του ρεύματος διόδου και της τάσης στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο ώστε να επιτευχθεί συνεχόμενη σάρωση χωρίς αναπήδηση τρόπου. Συγκεκριμένα:

$$\frac{\Delta I_{LD}}{\Delta V_{PZT}} = -\frac{\lambda \delta}{l \beta \tan \theta} \quad (9)$$

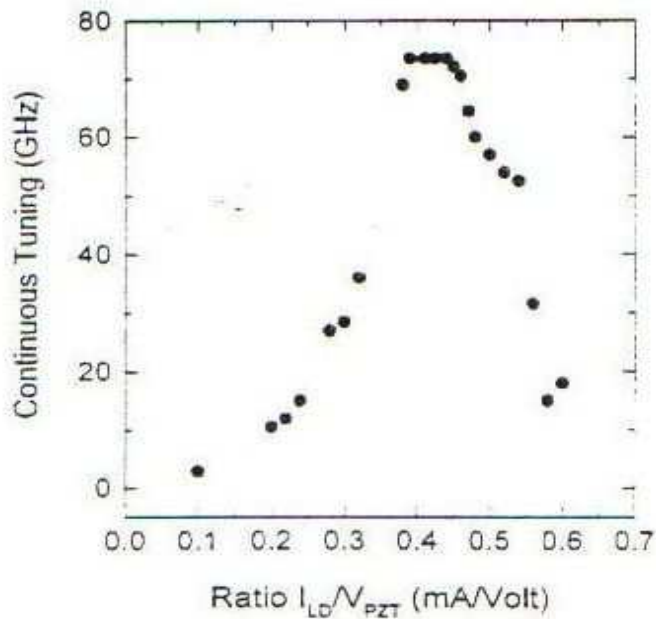
Επομένως, ξέροντας τα λ , β , δ , θ , και l , είναι δυνατόν να διατηρήσουμε σαρώσιμη λειτουργία μοναδικής συχνότητας χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες αλλαγές στο ρεύμα της διόδου laser και στην τάση του πιεζοηλεκτρικού.

Στο πείραμά μας η τιμές των λ , θ , β , δ , και l είναι αντίστοιχα 810nm, 46.8°, 5 nm/A, 0.06 μ m/V και 17mm. Η αντικατάσταση με τις τιμές δίνει

$$\Delta I_{LD}/\Delta V_{PZT} = -0.536 \text{ mA/V} \quad (10)$$



Σχήμα 3. Σχεδιάγραμμα κροσσών εκπομπής του ECDL με ένα χαμηλής ευαισθησίας παρεμβολόμετρο Fabry-Perot (FSR=2GHz) με σταθερό μήκος. Υπάρχουν 40 κροσσοί οι οποίοι ισοαπέχουν μεταξύ τους και ανταποκρίνονται στον συντονισμό του ECDL στα 80 GHz χωρίς αναπήδηση τρόπου λειτουργίας.



Σχήμα 4. Μέγεθος περιοχής συνεχόμενου συντονισμού ως εξάρτηση του λόγου ρεύματος εισροής της διόδου laser προς την τάση του στοιχείου PZT. Όπως βλέπουμε η μεγαλύτερη περιοχή συντονισμού επιτεύχθηκε όταν ο λόγος του ρεύματος εισροής της διόδου laser προς την τάση που αναπτύσσεται στο στοιχείο PZT ήταν στην περιοχή 0.36-0.48 mA/V

Στο ηλεκτρονικό μας κύκλωμα μπορεί να ρυθμίζεται ο λόγος για μία συγκεκριμένη σχεδίαση ECDL, μεταβάλλοντας το κέρδος του πρώτου Τ.Ε. (τελεστικού ενισχυτή No 1 στο σχήμα 2) στο δίαυλο της πηγής ρεύματος του διοδικού laser. Η είσοδος σήματος που παρέχεται από γεννήτρια σήματος επιτρέπει την συχνότητα του ECDL να σαρωθεί αυτόματα εφόσον ο σωστός λόγος έχει ορισθεί χρησιμοποιώντας αυτή τη διάταξη. Μία μεταβλητή τάση εισόδου στον Τ.Ε. No 3 παρεχόμενη από ένα ποτενσιόμετρο 1kΩ, επιτρέπει την πρόσθεση μίας επιπλέον τάσης στο σήμα της γεννήτριας η χωρίς την είσοδο της γεννήτριας των συχνοτήτων, παρέχει έλεγχο χειροκίνητου συντονισμού. Για να μειώσουμε το θόρυβο το κύκλωμα οδηγείται από μπαταρία. Όταν ρυθμίζουμε το κύκλωμα σύγχρονης σάρωσης να πάρει το λόγο που δίδεται από την εξίσωση (10), λαμβάνουμε υπ' όψιν τον παράγοντα ενίσχυσης 100 από τον ενισχυτή υψηλής τάσης και τα 20 mA/V από την είσοδο διαμόρφωσης του οδηγού της διόδου laser.

Χρησιμοποιώντας αυτό το κύκλωμα, μπορέσαμε να έχουμε συνεχόμενη σάρωση του ECDL σε μία εκτεταμένη περιοχή συχνοτήτων χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου η laser με δίοδο με επικάλυψη για αποφυγή ανακλάσεων.

Γ) ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

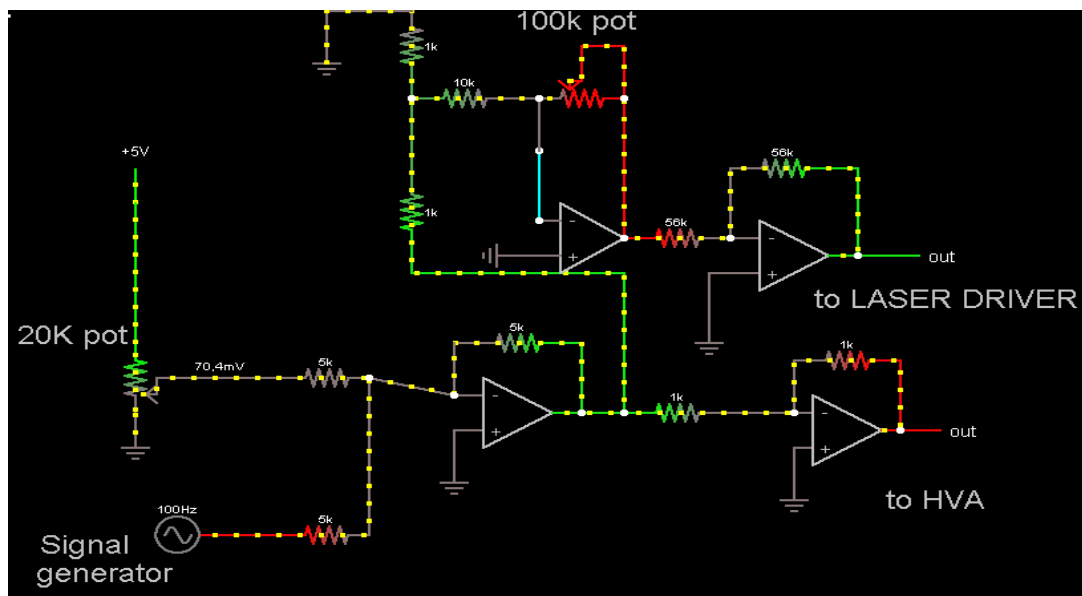
Το κύκλωμα αποτελείται από τέσσερις τελεστικούς ενισχυτές και έναν αριθμό αντιστάσεων. Έχει δύο ακροδέκτες εξόδου, που μεταφέρουν σήματα για τον έλεγχο του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (PZT) και στην πηγή ρεύματος της διόδου laser. Ο λόγος των δύο σημάτων τάσης εξόδου στους δύο ακροδέκτες καθορίζεται από ένα απλό αναλυτικό μοντέλο. Το μοντέλο σηματοδοτεί πώς πρέπει να αλλάζει το ρεύμα έκχυσης της διόδου σε σχέση με την τάση που αναπτύσσεται στο στοιχείο PZT έτσι ώστε το φάσμα της περιθλώμενης δέσμης πρώτης τάξεως από το φράγμα περίθλασης (εξαρτάται από τη γωνία του φράγματος περίθλασης), και το φάσμα διαμήκη τρόπου ταλάντωσης της διόδου laser (εξαρτάται από το μήκος της κοιλότητας του της διόδου laser) να συντονίζονται ταυτόχρονα.

Στο ηλεκτρονικό μας κύκλωμα μπορεί να ρυθμίζεται ο λόγος για μία συγκεκριμένη σχεδίαση ECDL, μεταβάλλοντας το κέρδος του T.E. στο δίαυλο της πηγής ρεύματος του διοδικού laser. Η είσοδος σήματος που παρέχεται από γεννήτρια σήματος επιτρέπει την συχνότητα του ECDL να σαρωθεί αυτόματα εφόσον ο σωστός λόγος έχει οριστεί χρησιμοποιώντας αυτή τη διάταξη. Μία μεταβλητή τάση εισόδου στον T.E. παρεχόμενη από ένα ποτενσιόμετρο 20kΩ, επιτρέπει την πρόσθεση μίας επιπλέον τάσης στο σήμα της γεννήτριας ή χωρίς την είσοδο της γεννήτριας των συχνοτήτων, παρέχει έλεγχο χειροκίνητου συντονισμού. Για να μειώσουμε το θόρυβο το κύκλωμα οδηγείται από μπαταρία. Όταν ρυθμίζουμε το κύκλωμα σύγχρονης σάρωσης να πάρει το λόγο, λαμβάνουμε υπ' όψιν τον παράγοντα ενίσχυσης 100 από τον ενισχυτή υψηλής τάσης και τα 20 mA/V από την είσοδο διαμόρφωσης του οδηγού της διόδου laser.

Χρησιμοποιώντας αυτό το κύκλωμα, μπορέσαμε να έχουμε συνεχόμενη σάρωση του ECDL σε μία εκτεταμένη περιοχή συχνοτήτων χωρίς την ανάγκη πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου η laser με δίοδο με επικάλυψη για αποφυγή ανακλάσεων.

Το κύκλωμα μας αποτελείται από 2 πηγές ενέργειας. Μια συνεχής τάσης της τάξεως των 5V τροφοδοτούμενη από μια μπαταρία των 9V με τη βοήθεια ενός σταθεροποιητή τάσης (tl 7805) και από μια εξωτερική γεννήτρια η οποία θα παρέχει συχνότητα της τάξεως των 40 HZ-5V (εναλλασσόμενο σήμα).

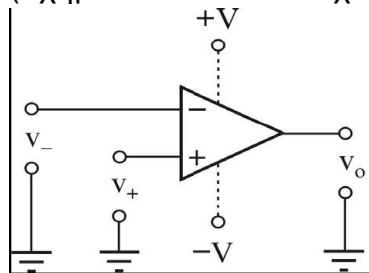
Ηλεκτρονικό κύκλωμα που επιτρέπει σύγχρονη μεταβολή του ρεύματος της διόδου laser και του μήκους της εξωτερικής κοιλότητας υπό καθορισμένο λόγο.



Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση του κυκλώματος θα αναφέρουμε κάποια γενικά που ισχύουν για τους τελεστικούς ενισχυτές.

Τελεστικός ενισχυτής (TE) είναι ένας διαφορικός ενισχυτής άμεσης ζεύξης, μεγάλης σταθερότητας και υψηλής απολαβής.

Οι επιμέρους βαθμίδες ενίσχυσης, που συνθέτουν ένα TE, είναι άμεσα συζευγμένες (όχι μέσω πυκνωτών) και έτσι είναι δυνατή η ενίσχυση σημάτων μηδενικής συχνότητας (συνεχή σήματα) έως και αρκετών εκατοντάδων kHz. Ο TE συμβολίζεται με ένα τρίγωνο με τις δύο εισόδους στη μία βάση και την έξοδο στην απέναντι κορυφή (Σχήμα τελεστικού ενισχυτή).



Κάθε TE έχει δύο εισόδους: την **αναστρέφουσα** (inverting) και τη **μη αναστρέφουσα** (non-inverting) είσοδο, που συμβολίζονται με τα σύμβολα “-” και “+” αντιστοίχως, χωρίς αυτός ο συμβολισμός να έχει σχέση με την πολικότητα (ως προς το κοινό) των τάσεων

στις εισόδους.

Στο συμβολισμό των TE δεν περιλαμβάνονται συνήθως οι ακροδέκτες τροφοδοσίας, της οποίας η παρουσία θεωρείται αυτονόητη. Η τροφοδοσία ενός TE είναι συνήθως **διπολική** (bipolar), δηλαδή απαιτούνται δύο πηγές τάσης, η μία με θετική τάση και η άλλη με αρνητική τάση ως προς το του κοινό του κυκλώματος. Τυπικές τιμές τάσεων τροφοδοσίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων TE είναι ± 15 V.

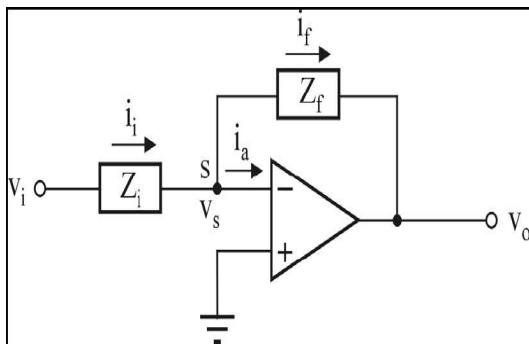
Εάν στην αναστρέφουσα είσοδο εφαρμοσθεί τάση v_- και στη μη αναστρέφουσα τάση v_+ , όπως δείχνεται στο παραπάνω σχήμα τότε η τάση στην έξοδο του TE παρέχεται από την εξίσωση: **$v_o = A(v_+ - v_-)$**

όπου A είναι η **απολαβή** (ή **συντελεστής ενίσχυσης**) **ανοικτού βρόχου** (open-loop gain) του TE. Για τους συνηθισμένους TE είναι $A = 10^4 - 10^6$.

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει εφόσον η τάση εξόδου βρίσκεται μεταξύ δύο οριακών τιμών, που συνήθως είναι κατά 1-2 V μικρότερες (απολύτως) από τις τάσεις τροφοδοσίας του TE. Για παράδειγμα, εάν ο TE τροφοδοτείται με -15 και +15 V, η εξίσωση θα ισχύει για τιμές v_o από -13 έως +13 V (περίπου). Αυτή η περιοχή ονομάζεται **περιοχή τελέσεων** ή **λειτουργίας** (operational range) του TE.

Από την εξίσωση προκύπτει ότι το σήμα εξόδου v_o μεταβάλλεται με φορά αντίθετη από εκείνη του σήματος v_- , που εισάγεται στη αναστρέφουσα είσοδο, δηλαδή το σήμα εξόδου του TE βρίσκεται σε διαφορά φάσης 180° ως προς το σήμα, που εισάγεται στην αναστρέφουσα είσοδο.

Στη διάταξη **κλειστού βρόχου** (closed loop), με τη βοήθεια του κυκλώματος **ανατροφοδότησης** ή **ανάδρασης** (feedback), ένα κλάσμα του σήματος εξόδου επανεισάγεται στην αναστρέφουσα είσοδο (αρνητική ανατροφοδότηση). Με αυτή τη σύνδεση το σήμα εξόδου θα σταθεροποιηθεί στην τιμή εκείνη, που το κλάσμα αυτό θα εξουδετερώνει το αρχικό σήμα στην αναστρέφουσα είσοδο. Η διάταξη κλειστού βρόχου με αρνητική ανατροφοδότηση “χαλιναγωγεί” την υψηλή απολαβή ανοικτού βρόχου του TE και επιβάλλει μια κατά πολύ χαμηλότερη, αλλά απόλυτα ελεγχόμενη και ρυθμιζόμενη τελική **απολαβή κλειστού βρόχου** (closed loop gain).



Στο Σχήμα απεικονίζεται το γενικό κύκλωμα TE με αρνητική ανατροφοδότηση, που πραγματοποιείται με σύνδεση της αναστρέφουσας εισόδου με την έξοδο του TE με μια αντίσταση ανατροφοδότησης Zf (ωμική,

χωρητική, επαγωγική ή σύνθετη). Το σήμα εισόδου (τάση vi) εισάγεται στο κύκλωμα μέσω της αντίστασης εισόδου Zi.

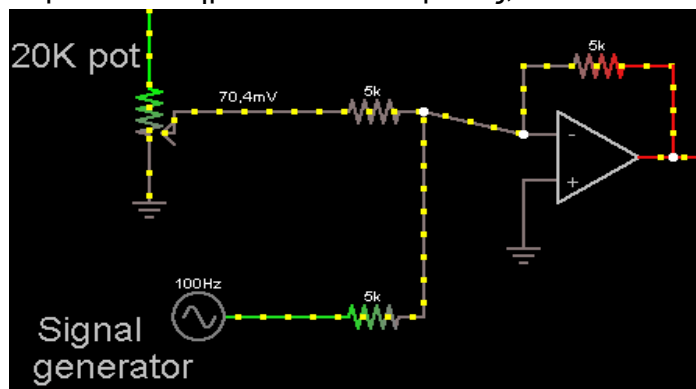
1. Το ρεύμα ia, που εισέρχεται στην είσοδο του TE, είναι πρακτικά μηδενικό: $i_a \approx 0$

2. Η απολαβή ανοικτού βρόχου είναι πρακτικά άπειρη, δηλαδή $A \approx \infty$

Άρα συμφωνά με τα παραπάνω ισχύει : $V_o = - Z_f/Z_i * V_i$.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα των τελεστικών ενισχυτών που αποτελούν το κύκλωμα μας καθώς επίσης και οι κυματομορφές που παίρνουμε στις εισόδους κ εξόδους τους.

Βλέπουμε ότι οι εισόδους μας μπαίνουν στον πρώτο τελεστικό ενισχυτή ο οποίος βρίσκεται σε διάταξη αναστρέφων ενισχυτή. Συμφωνα με τον κανονα που μας λει ότι τα ρευματα στις εισοδους ενός τελεστικού ενισχυτή θεωρούνται μηδενικά, δηλαδή πάντοτε θα είναι: $i_a = 0$ και επομένως το ρεύμα, που διαρρέει την αντίσταση εισόδου Ri 5k, θα πρέπει να διαρρέει και την αντίσταση ανατροφοδότησης Rf 5k, δηλαδή θα είναι $i_1 = i_2$. Επειδή η μη αναστρέφουσα είσοδος είναι γειωμένη (δηλ. βρίσκεται σε μηδενική τάση), η τάση εξόδου vo θα αποκτήσει την τιμή εκείνη, που θα μηδενίσει την τάση στο αθροιστικό σημείο του κυκλώματος, οπότε $v^- = 0$.



Ο λόγος Rf/Ri ισοδυναμεί προς την απολαβή κλειστού βρόχου του κυκλώματος και επίσης είναι χαρακτηριστική η αντιστροφή της πολικότητας του σήματος. Είναι αυτονόητο ότι με τον αντιστροφέα ενισχυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί και

εξασθένιση του σήματος εισόδου (σε απόλυτη τιμή), όταν είναι $R_f / R_i < 1$.

Οι κυματομορφές που θα πάρουμε από τον πρώτο τελεστικό ενισχυτή είναι οι παρακάτω:

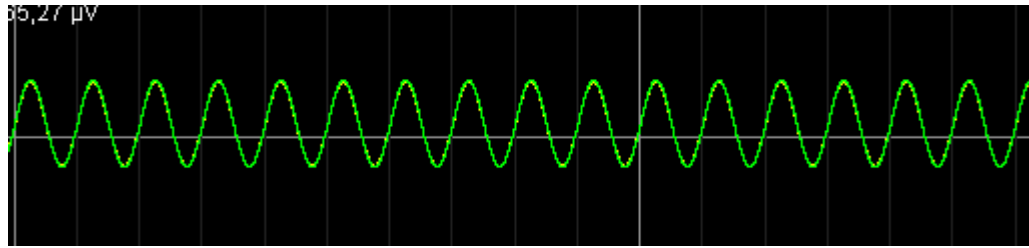
Κυματομορφή εισόδου:



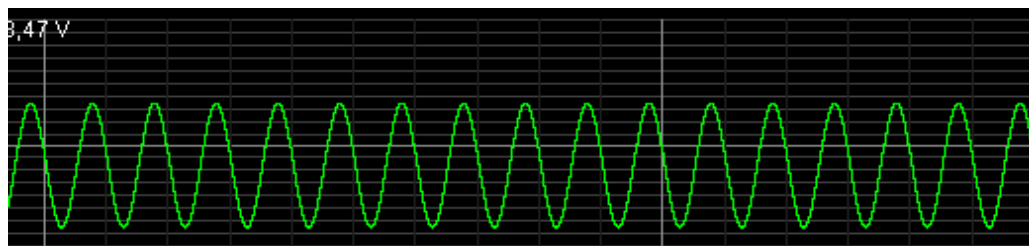
A/C source
 $I = 116,35 \mu A$
 $V = 1,62 V$
 $f = 40 Hz$
 $V_{max} = 5 V$
 $P = -188,78 \mu W$

Καθώς επίσης έχω κ μια στάθμη DC σταθερή στα 5V.

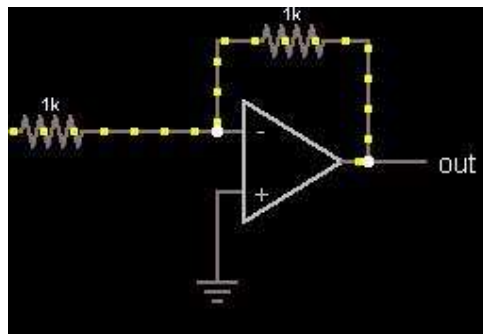
Κυματομορφή εισόδου τελεστικού ενισχυτή 1:



Κυματομορφή εξόδου τελεστικού ενισχυτή 1:



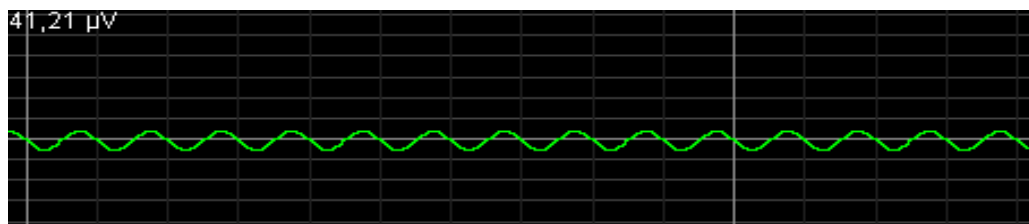
Στη συνέχεια ακολουθεί άλλος ένας αναστρέφων τελεστικός ενισχυτής:



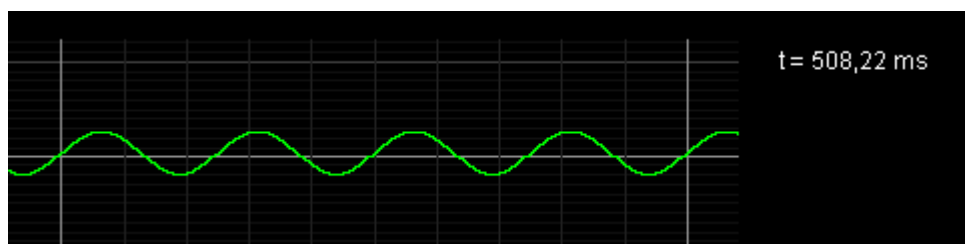
(Τελεστικός ενισχυτής 2)

Σε αυτό το κομμάτι του κυκλώματος ισχύει ότι είπαμε κ για τον παραπάνω ενισχυτή απλά θα πάρουμε ένα σήμα στην έξοδο του αναστραμμένο κατά 180 μοίρες.

Παρακάτω βλέπουμε την κυματομορφή στην είσοδο του ενισχυτή:

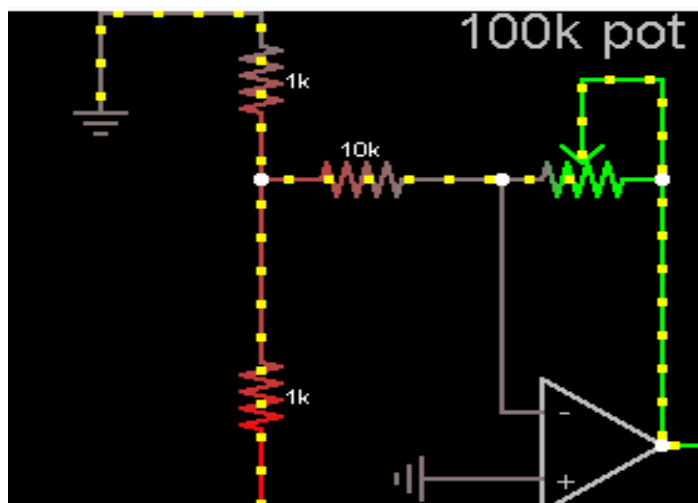


Ακολουθεί η κυματομορφή στην μια μας έξοδο η οποία είναι η είσοδος για τον high voltage amplifier:



Στη συνέχεια ακολουθεί άλλος ένας ενισχυτής ο οποίος στην έξοδο του έχει ένα ποτενσιόμετρο το οποίο ρυθμίζει την τιμή της αντίστασης κ έτσι ανάλογα μεταβάλλεται κ η τάση, ενώ στην είσοδο του υπάρχει διαιρέτης τάσης αποτελούμενος από 2 αντιστάσεις της τάξεως του 1k και έτσι η τάση κατεβαίνει στο μισό. Στην έξοδο του ενισχυτή αυτού έχω κυματομορφή ενισχυμένη σύμφωνα με την απολαβή του.

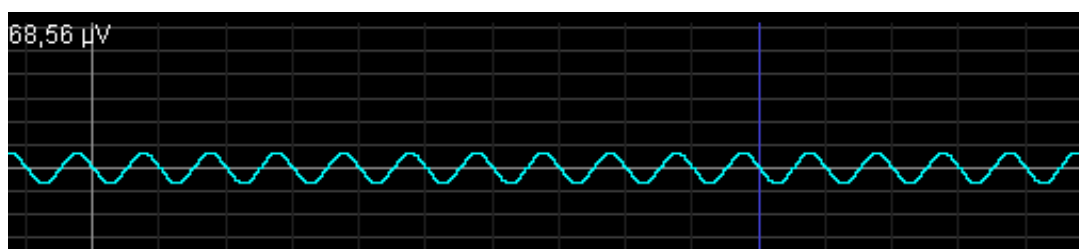
Σχεδιάγραμμα τελεστικού ενισχυτή 3:



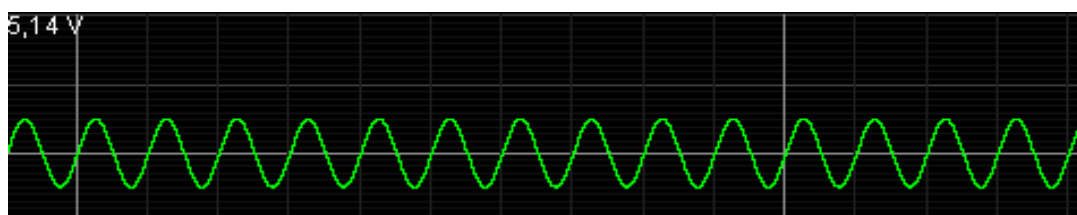
(Τελεστικός ενισχυτής 3)

Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές που παίρνουμε στην είσοδο αλλά κ στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή 3:

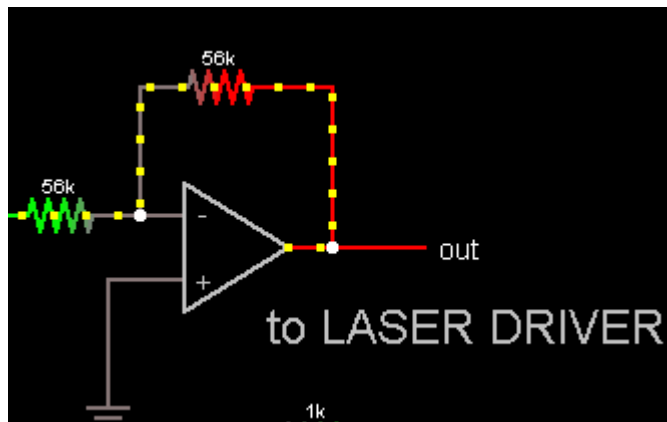
Κυματομορφή εισόδου:



Κυματομορφή εξόδου:

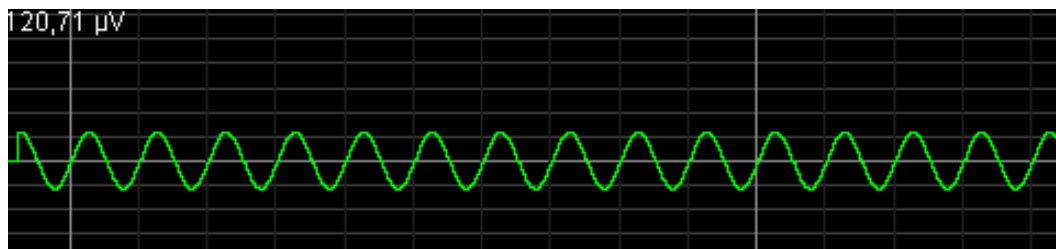


Στη συνέχεια ακολουθεί το τελευταίο κομμάτι του κυκλώματος που αποτελείται και αυτό από ένα αναστρέφων τελεστικό ενισχυτή.



(Τελεστικός ενισχυτής 4)

Κυματομορφή εισόδου ενισχυτή 4:

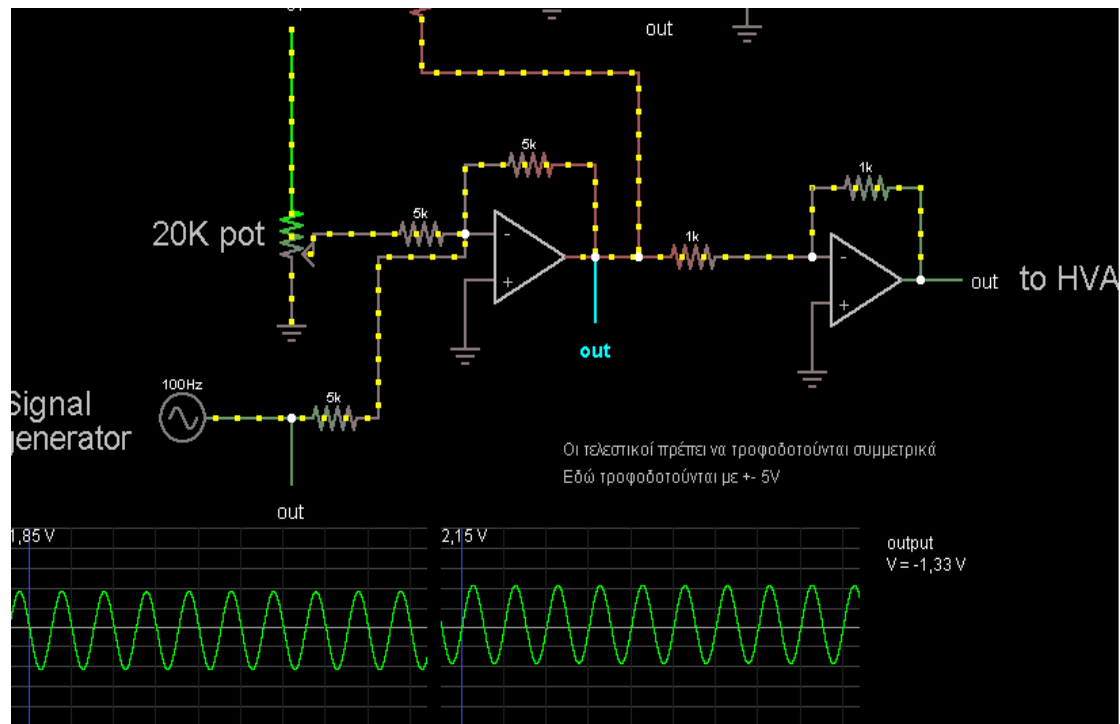


Κυματομορφή εξόδου ενισχυτή 4 η οποία είναι παρατηρούμε ότι κ αυτή είναι αναστραμμένη κατά 180 μοίρες επίσης η έξοδος του ενισχυτή αυτού είναι κ η είσοδος για τον Laser Driver:



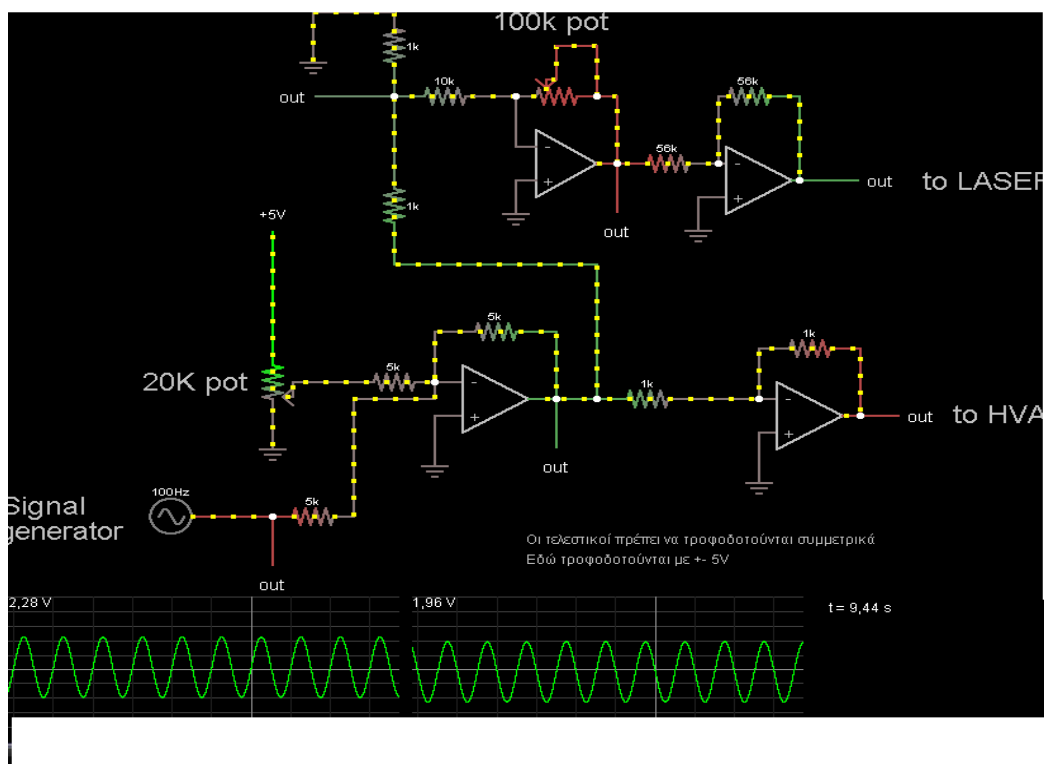
Οι δυο έξοδοι μας θα προσαρμοστούν στην διάταξη του ECDL (συντονιζόμενο laser εξωτερικής κοιλότητας) που ακολουθεί το δικό μας κύκλωμα.

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε τους τελεστικούς και τις κυματομορφές τους συγκεντρωτικά:



Παραπάνω βλέπουμε την έξοδο του πρώτου τελεστικού καθώς κ την έξοδο του δεύτερου που μας δίνει το High voltage amplifier και παρατηρούμε την διαφορά των 180 μοιρών.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι κυματομορφές των δυο πάνω τελεστικών ενισχυτών βλέπουμε την έξοδο του τρίτου ενισχυτή καθώς κ την έξοδο του τέταρτου που μας δίνει το Laser driver.



Εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή

Αντιστάσεις: 4=1ΚΩ, 2=56ΚΩ, 3=5ΚΩ, 1=10ΚΩ

Πυκνωτής: 1=100nf

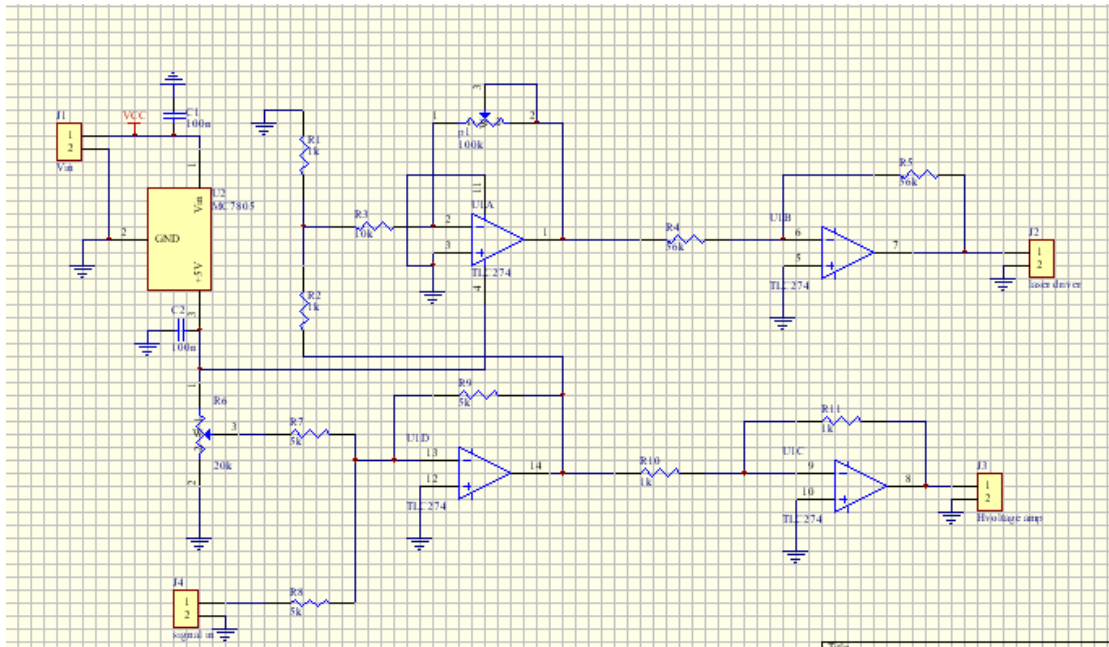
Ποτενσιόμετρα: 1=100ΚΩ, 1=20ΚΩ

Σταθεροποιητής τάσης: 1=L7805, 1=L7905

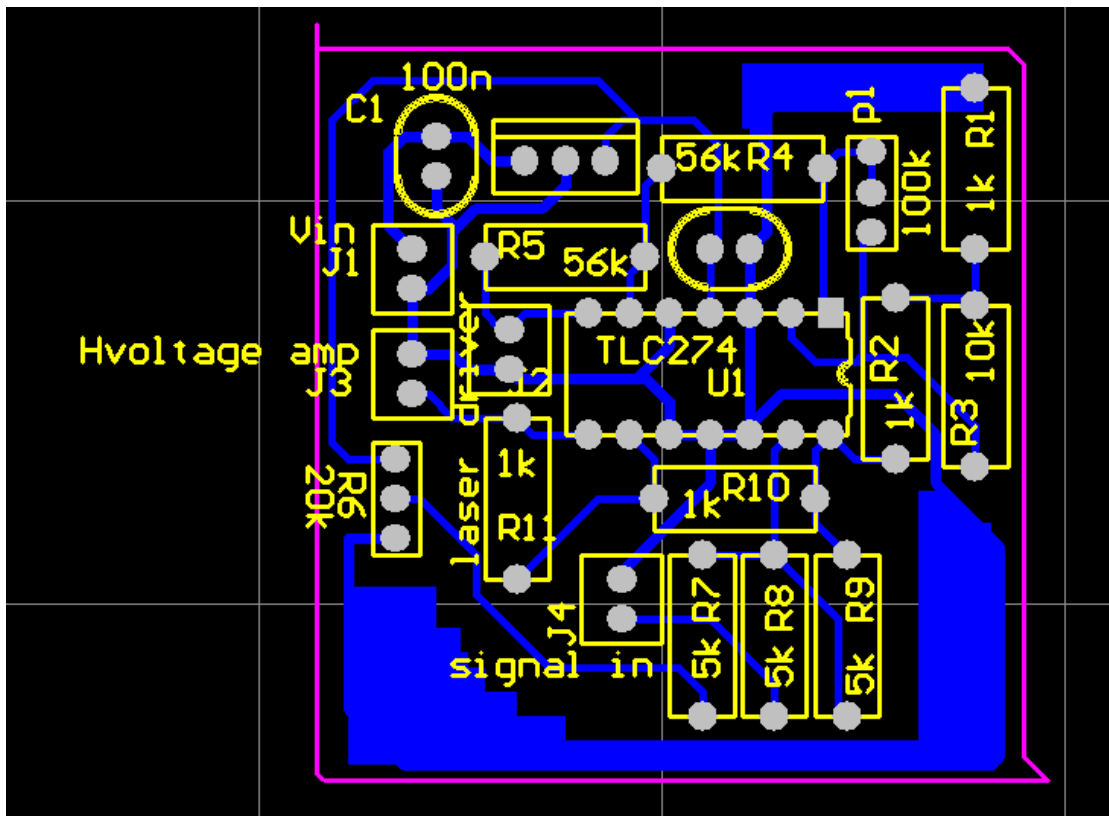
Ολοκληρωμένο: TS274

ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΟΥΜΕ ΤΑ ΒΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΝΑ ΤΥΠΩΣΟΥΜΕ ΤΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΕ ΠΛΑΚΕΤΑ

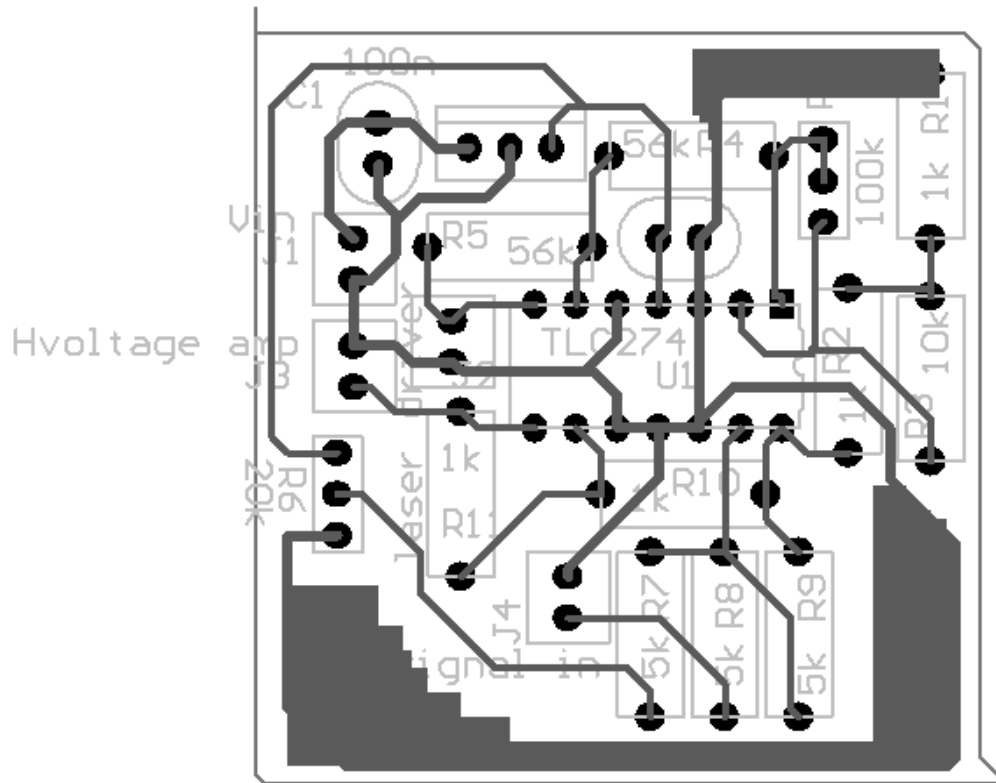
Η κατασκευή μας έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος protel 99se. Το πρώτο βήμα ήταν η σχεδίαση του κυκλώματος που ακολουθεί παρακάτω:



Ακολουθεί η δημιουργία των εξαρτημάτων από τις ανάλογες βιβλιοθήκες του προγράμματος και η αποτύπωση των εξαρτημάτων:



Ακολουθεί η τελική μορφή του τυπωμένου κυκλώματος:



Δ) Datasheets



TS274

High performance CMOS quad operational amplifier

Features

- Output voltage can swing to ground
- Excellent phase margin on capacitive loads
- Gain bandwidth product: 3.5 MHz
- Unity gain stable
- Two input offset voltage selections

Description

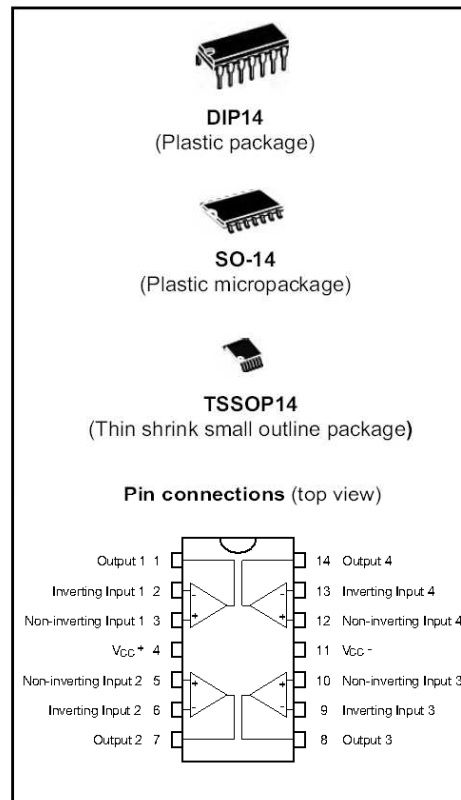
The TS274 devices are low cost, quad operational amplifiers designed to operate with single or dual supplies. These operational amplifiers use the ST silicon gate CMOS process giving an excellent consumption-speed ratio. These series are ideally suited for low consumption applications.

Three power consumptions are available thus offering the best consumption-speed ratio for your application:

- $I_{CC} = 10 \mu\text{A}/\text{amp}$: TS27L4 (very low power)
- $I_{CC} = 150 \mu\text{A}/\text{amp}$: TS27M4 (low power)
- $I_{CC} = 1 \text{mA}/\text{amp}$: TS274 (standard)

These CMOS amplifiers offer very high input impedance and extremely low input currents. The major advantage versus JFET devices is the very low input currents drift with temperature (see [Figure 5 on page 6](#)).

For enhanced features of TS274, in particular rail-to-rail capability and low offset voltage, two new



families, TSV91x and TSV99x will better suit low voltage applications.

Table 1. Enhanced related families

Part number	V _{CC} range (V)	Rail-to-rail I/O	V _{IO} max (mV)	I _{IB} max (pA)	A _{vd} min (dB)	I _{CC} max (mA)	GBP typ (MHz)	SR typ (V/μs)	Packages
TSV914	2.5 - 5.5	I/O	1.5/4.5	10	80	1.1	8	4.5	SO-14, TSSOP14
TSV994	2.5 - 5.5	I/O	1.5/4.5	10	80	1.1	20 (G ≥ 3)	10	SO-14, TSSOP14

1 Absolute maximum ratings and operating conditions

Table 2. Absolute maximum ratings (AMR)

Symbol	Parameter	TS274C/AC	TS274I/AI	Unit
V_{CC}^+	Supply voltage ⁽¹⁾	18		V
V_{id}	Differential input voltage ⁽²⁾	± 18		V
V_{in}	Input voltage ⁽³⁾	-0.3 to 18		V
I_o	Output current for $V_{CC}^+ \geq 15V$	± 30		mA
I_{in}	Input current	± 5		mA
T_{oper}	Operating free-air temperature range	0 to +70	-40 to +125	°C
T_{stg}	Storage temperature range	-65 to +150		°C
R_{thja}	Thermal resistance junction to ambient ⁽⁴⁾			°C/W
	SO-14	103		
	TSSOP14 DIP14	100 80		
R_{thjc}	Thermal resistance junction to case			°C/W
	SO-14	31		
	TSSOP14 DIP14	32 33		
ESD	HBM: human body model ⁽⁵⁾	500		V
	MM: machine model ⁽⁶⁾	100		V
	CDM: charged device model ⁽⁷⁾	800		V

- All values, except differential voltage are with respect to network ground terminal.
- Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
- The magnitude of the input and the output voltages must never exceed the magnitude of the positive supply voltage.
- Short-circuits can cause excessive heating and destructive dissipation. Values are typical.
- Human body model: A 100pF capacitor is charged to the specified voltage, then discharged through a 1.5k Ω resistor between two pins of the device. This is done for all couples of connected pin combinations while the other pins are floating.
- Machine model: A 200pF capacitor is charged to the specified voltage, then discharged directly between two pins of the device with no external series resistor (internal resistor < 5 Ω). This is done for all couples of connected pin combinations while the other pins are floating.
- Charged device model: all pins and the package are charged together to the specified voltage and then discharged directly to the ground through only one pin. This is done for all pins.

Table 3. Operating conditions

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CC}^+	Supply voltage	3 to 16	V
V_{icm}	Common mode input voltage range	0 to $V_{CC}^+ - 1.5$	V
T_{oper}	Operating free-air temperature range		°C
	TS274C TS274I	0 to 70 -40 to 125	

2 Block diagram and circuit schematics

Figure 1. Block diagram

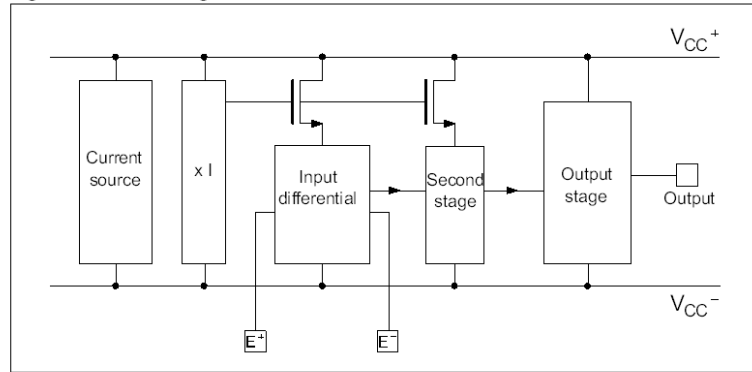
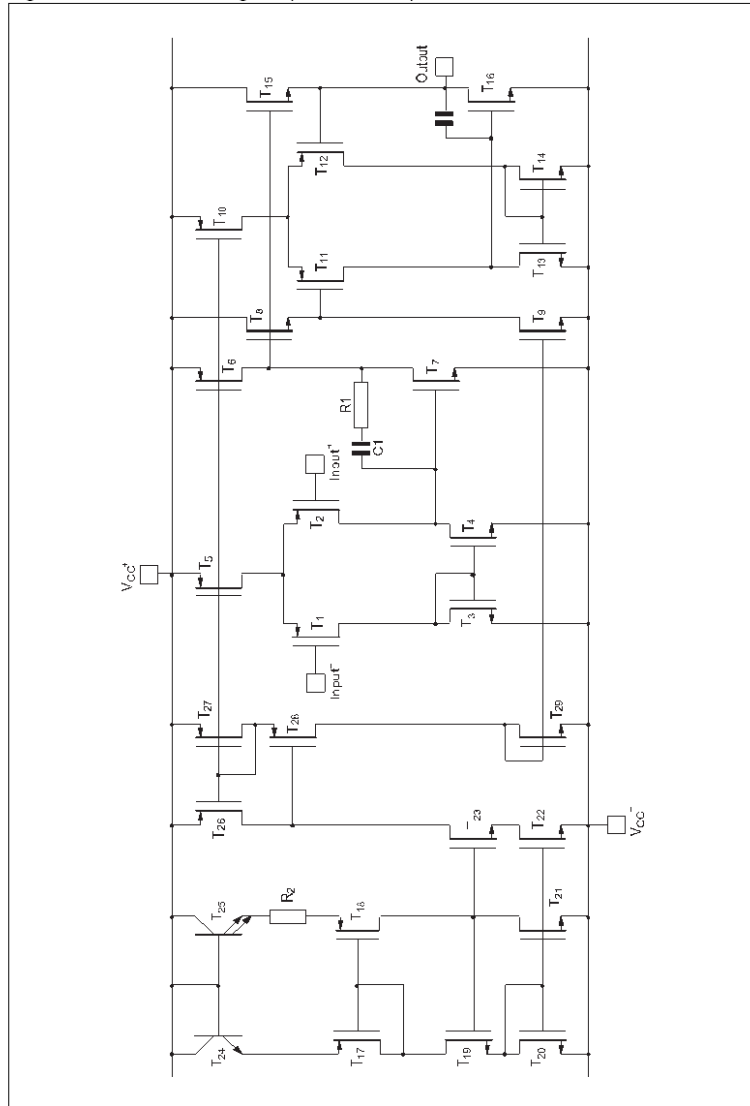


Figure 2. Schematic diagram (for 1/4 TS274)



3 Electrical characteristics

Table 4. $V_{CC}^+ = +10V$, $V_{CC}^- = 0V$, $T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Conditions	TS274C/AC			TS274I/AI			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{io}	Input offset voltage	$V_o = 1.4V$, $V_{ic} = 0V$ TS274C/I TS274AC/AI		1.1 0.9	10 5		1.1 0.9	10 5	mV
		$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ TS274C/I TS274AC/AI			12 6.5			12 6.5	mV
DV_{io}	Input offset voltage drift			2			2	$\mu V/^\circ C$	
I_{io}	Input offset current (1)	$V_{ic} = 5V$, $V_o = 5V$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	100		1	200	μA
I_{ib}	Input bias current (1)	$V_{ic} = 5V$, $V_o = 5V$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	150		1	300	μA
V_{OH}	High level output voltage	$V_{id} = 100mV$, $R_L = 10k\Omega$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	8.2 8.1	8.4		8.2 8	8.4		V
V_{OL}	Low level output voltage	$V_{id} = -100mV$			50			50	mV
A_{vd}	Large signal voltage gain	$V_{ic} = 5V$, $R_L = 10k\Omega$ $V_o = 1V$ to $6V$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10 7	15		10 6	15		V/mV
GBP	Gain bandwidth product	$A_v = 40dB$, $R_L = 10k\Omega$ $C_L = 100pF$, $f_{in} = 100kHz$		3.5			3.5		MHz
CMR	Common mode rejection ratio	$V_{ic} = 1V$ to $7.4V$, $V_o = 1.4V$	65	80		65	80		dB
SVR	Supply voltage rejection ratio	$V_{CC}^+ = 5V$ to $10V$, $V_o = 1.4V$	60	70		60	70		dB
I_{CC}	Supply current (per amplifier)	$A_v = 1$, no load, $V_o = 5V$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1000	1500 1600		1000	1500 1700	μA
I_o	Output short circuit current	$V_o = 0V$, $V_{id} = 100mV$		60			60		mA
I_{sink}	Output sink current	$V_o = V_{CC}$, $V_{id} = -100mV$		45			45		mA
SR	Slew rate at unity gain	$R_L = 10k\Omega$, $C_L = 100pF$, $V_{in} = 3$ to $7V$		5.5			5.5		V/ μs
ϕ_m	Phase margin at unity gain	$A_v = 40dB$, $R_L = 10k\Omega$ $C_L = 100pF$		40			40		Degrees
K_{OV}	Overshoot factor			30			30		%
e_n	Equivalent input noise voltage	$f = 1kHz$, $R_s = 100\Omega$		30			30		nV/ \sqrt{Hz}
V_{o1}/V_{o2}	Channel separation			120			120		dB

1. Maximum values including unavoidable inaccuracies of the industrial test.

Figure 3. Supply current (each amplifier) vs. supply voltage

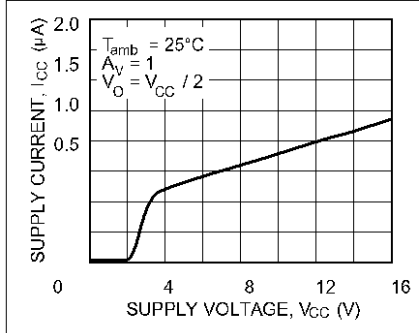


Figure 4. High level output voltage vs. high level output current

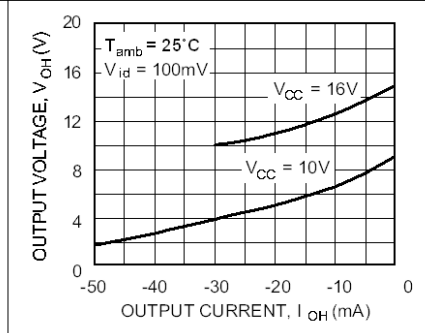


Figure 5. Input bias current vs. free-air temperature

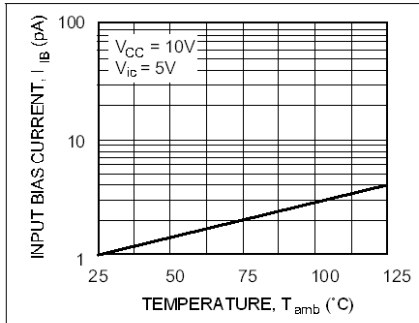


Figure 6. Low level output voltage vs. low level output current

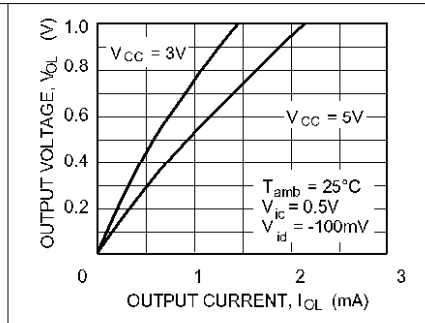


Figure 7. High level output voltage vs. high level output current

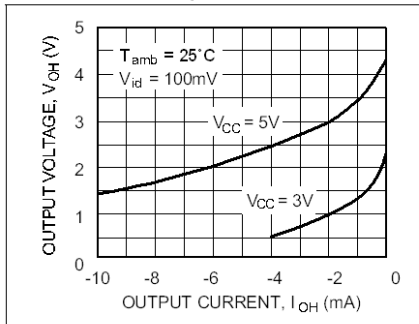


Figure 8. Low level output voltage vs. low level output current

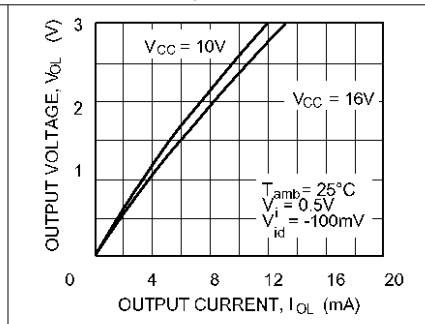


Figure 9. Open loop frequency response and Figure 10. Phase margin vs. capacitive load phase shift

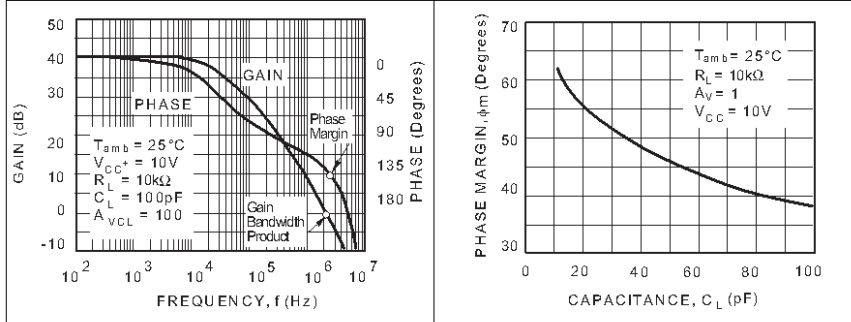


Figure 11. Gain bandwidth product vs. supply voltage and Figure 12. Slew rate vs. supply voltage

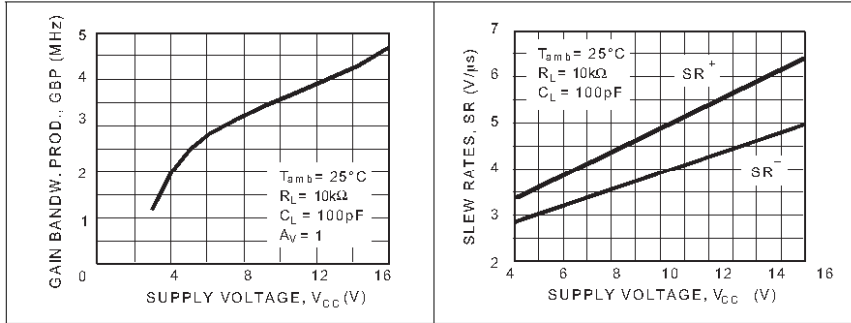
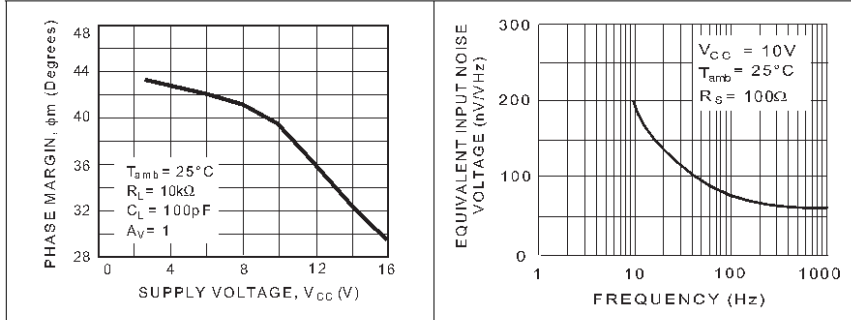


Figure 13. Phase margin vs. supply voltage and Figure 14. Input voltage noise vs. frequency



4 Macromodel

4.1 Important note concerning this macromodel

Please consider the following remarks before using this macromodel.

- All models are a trade-off between accuracy and complexity (i.e. simulation time).
- Macromodels are not a substitute to breadboarding; rather, they confirm the validity of a design approach and help to select surrounding component values.
- A macromodel emulates the **nominal** performance of a **typical** device within **specified operating conditions** (temperature, supply voltage, for example). Thus the macromodel is often not as exhaustive as the datasheet, its purpose is to illustrate the main parameters of the product.

Data derived from macromodels used outside of the specified conditions (V_{CC} , temperature, for example) or even worse, outside of the device operating conditions (V_{CC} , V_{icm} , for example), is not reliable in any way.

4.2 Macromodel code

```
*****
.SUBCKT TS27X 1 2 3 4 5
*** INP- = 1, INP+ =2, OUT = 3 VDD=4 VSS = 5
*** TYPE = TS271/TS272/TS274
.MODEL MDTH D IS=1E-8 KF=2.664E-16 CJO=10F
***INPUT STAGE
CIP 2 5 1E-12
CIN 1 5 1E-12
EIP 10 5 2 5 1
EIN 16 5 1 5 1
RIP 10 11 8
RIN 15 16 8
RIS 11 15 223.84
CPS 11 15 1E-9
DIP 11 120 MDTH 400E-12
DIN 15 140 MDTH 400E-12
RDEG1 12 120 4400
RDEG2 14 140 4400
VOFP 12 13 DC 0
VOFN 13 14 DC 0
IPOL 13 5 38E-6
***ICC
DICC1 4 31 MDTH 400E-12
DICC2 31 32 MDTH 400E-12
DICC3 32 33 MDTH 400E-12
DICC4 33 34 MDTH 400E-12
RICC 34 5 20E3
ICC 4 5 600E-6
***COMMON MODE INPUT LIMITATION
DINN 17 13 MDTH 400E-12
VIN 17 5 DC -0.1
```

```
DINR 15 18 MDTH 400E-12
VIP 4 18 DC 2.2
***GM1 STAGE
FGMLP 119 5 VOFP 1
FGMLN 119 5 VOFN 1
RAP 119 4 1E6
RAN 119 5 1E6
***GM2 STAGE
G2P 19 5 119 5 4E-4
G2N 19 5 119 4 4E-4
R2P 19 4 450E3
R2N 19 5 450E3
***COMPENSATION
CC 19 119 7p
***BUFFER
EBUF 20 5 19 5 1
***SHORT-CIRCUIT LIMITATIONS( ISINK, ISOURCE)
DOPM 19 22 MDTH 400E-12
DONM 21 19 MDTH 400E-12
HOPM 22 28 VOUT 910
VIEM 28 4 DC 50
HONM 21 27 VOUT 1222
VINM 5 27 DC 50
VOUT 3 23 DC 0
***VOH, VOL DEFINITIONS
DOP 19 25 MDTH 400E-12
VOP 4 25 2.5
DON 24 19 MDTH 400E-12
VON 24 5 0.92
***OUTPUT RESISTOR
ROUT 23 20 10
.ENDS
```

5 Package information

In order to meet environmental requirements, ST offers these devices in ECOPACK® packages. These packages have a lead-free second level interconnect. The category of second level interconnect is marked on the package and on the inner box label, in compliance with JEDEC Standard JESD97. The maximum ratings related to soldering conditions are also marked on the inner box label. ECOPACK is an ST trademark. ECOPACK specifications are available at: www.st.com.

5.1 DIP14 package information

Figure 15. DIP14 package mechanical drawing

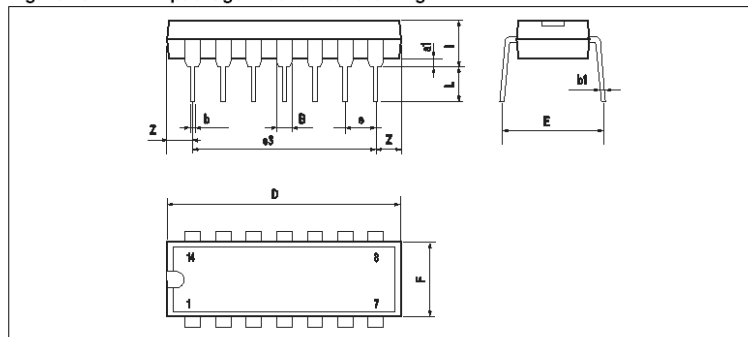


Table 5. DIP14 package mechanical data

Ref.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
a1	0.51			0.020		
B	1.39		1.65	0.055		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		15.24			0.600	
F			7.1			0.280
I			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z	1.27		2.54	0.050		0.100

5.2 SO-14 package information

Figure 16. SO-14 package mechanical drawing

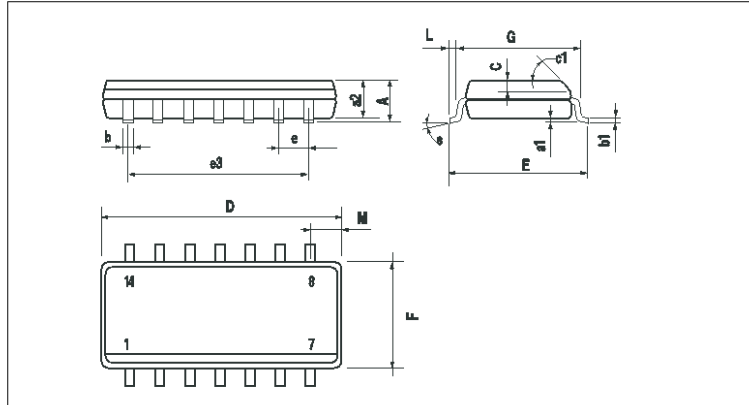


Table 6. SO-14 package mechanical data

Ref.	Dimensions					
	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.068
a1	0.1		0.2	0.003		0.007
a2			1.65			0.064
b	0.35		0.46	0.013		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.019	
c1	45° (typ.)					
D	8.55		8.75	0.336		0.344
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		7.62			0.300	
F	3.8		4.0	0.149		0.157
G	4.6		5.3	0.181		0.208
L	0.5		1.27	0.019		0.050
M			0.68			0.026
S	8° (max.)					

5.3 TSSOP14 package information

Figure 17. TSSOP14 package mechanical drawing

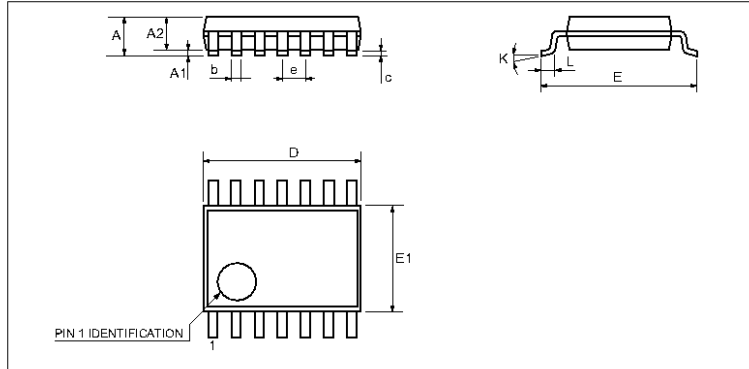


Figure 18. TSSOP14 package mechanical data

Ref.	Dimensions					
	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.2			0.047
A1	0.05		0.15	0.002	0.004	0.006
A2	0.8	1	1.05	0.031	0.039	0.041
b	0.19		0.30	0.007		0.012
c	0.09		0.20	0.004		0.0089
D	4.9	5	5.1	0.193	0.197	0.201
E	6.2	6.4	6.6	0.244	0.252	0.260
E1	4.3	4.4	4.48	0.169	0.173	0.176
e		0.65 BSC			0.0256 BSC	
K	0°		8°	0°		8°
L1	0.45	0.60	0.75	0.018	0.024	0.030



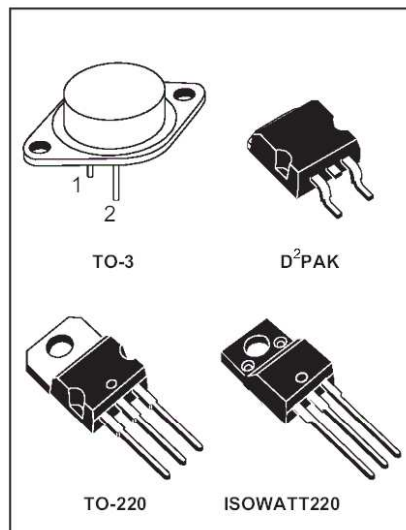
L7800 SERIES

POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

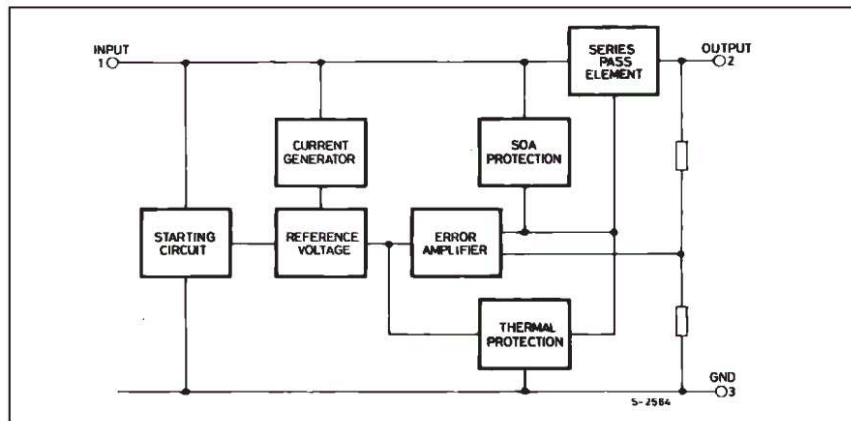
- OUTPUT CURRENT UP TO 1.5 A
- OUTPUT VOLTAGES OF 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 12; 15; 18; 24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION

DESCRIPTION

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220 ISOWATT220 TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



BLOCK DIAGRAM



November 1999

1/25

L7800

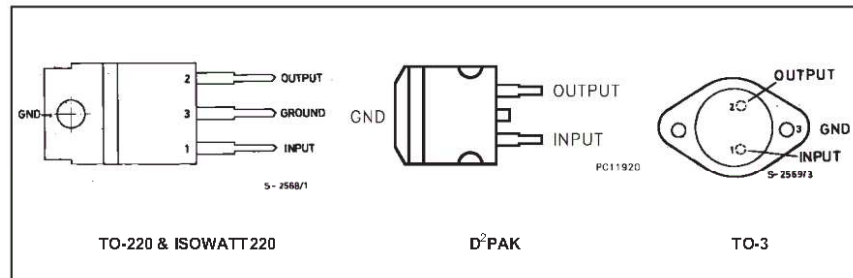
ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_i	DC Input Voltage (for $V_o = 5$ to 18V) (for $V_o = 20, 24V$)	35 40	V
I_o	Output Current	Internally limited	
P_{tot}	Power Dissipation	Internally limited	
T_{op}	Operating Junction Temperature Range (for L7800) (for L7800C)	-55 to 150 0 to 150	°C
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to 150	°C

THERMAL DATA

Symbol	Parameter	D ² PAK	TO-220	ISOWATT220	TO-3	Unit
$R_{th(jc)}$	Thermal Resistance Junction-case Max	3	3	4	4	°C/W
$R_{th(ja)}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	62.5	50	60	35	°C/W

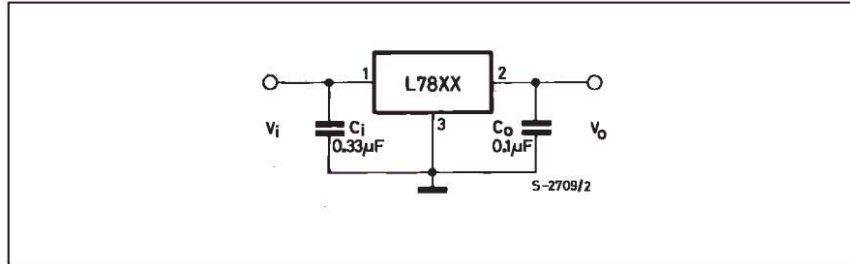
CONNECTION DIAGRAM AND ORDERING NUMBERS (top view)



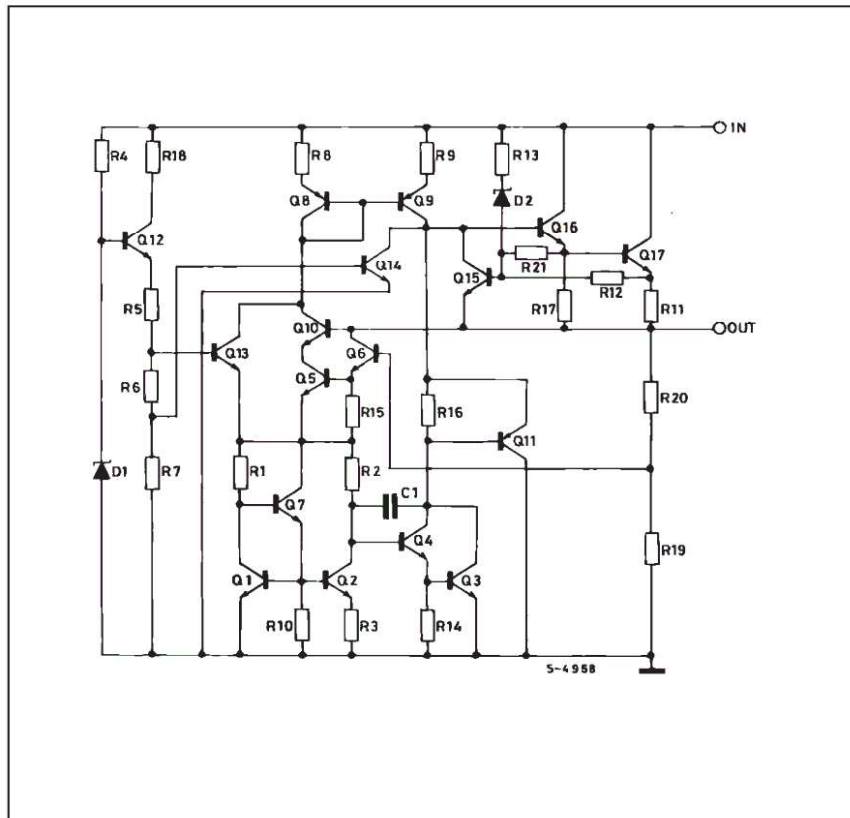
Type	TO-220	D ² PAK (*)	ISOWATT220	TO-3	Output Voltage
L7805				L7805T	5V
L7805C	L7805CV	L7805CD2T	L7805CP	L7805CT	5V
L7852C	L7852CV	L7852CD2T	L7852CP	L7852CT	5.2V
L7806				L7806T	6V
L7806C	L7806CV	L7806CD2T	L7806CP	L7806CT	6V
L7808				L7808T	8V
L7808C	L7808CV	L7808CD2T	L7808CP	L7808CT	8V
L7885C	L7885CV	L7885CD2T	L7885CP	L7885CT	8.5V
L7809C	L7809CV	L7809CD2T	L7809CP	L7809CT	9V
L7812				L7812T	12V
L7812C	L7812CV	L7812CD2T	L7812CP	L7812CT	12V
L7815				L7815T	15V
L7815C	L7815CV	L7815CD2T	L7815CP	L7815CT	15V
L7818				L7818T	18V
L7818C	L7818CV	L7818CD2T	L7818CP	L7818CT	18V
L7820				L7820T	20V
L7820C	L7820CV	L7820CD2T	L7820CP	L7820CT	20V
L7824				L7824T	24V
L7824C	L7824CV	L7824CD2T	L7824CP	L7824CT	24V

(*) AVAILABLE IN TAPE AND REEL WITH "-TR" SUFFIX

APPLICATION CIRCUIT



SCHEMATIC DIAGRAM



L7800

TEST CIRCUITS

Figure 1 : DC Parameter

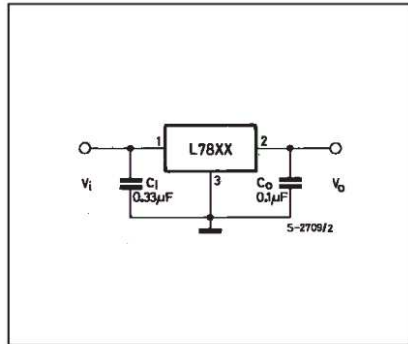


Figure 2 : Load Regulation.

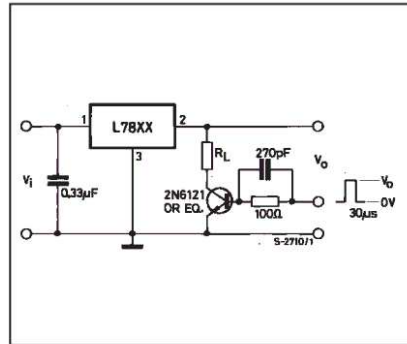
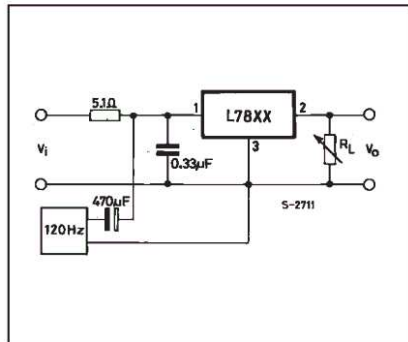


Figure 3 : Ripple Rejection.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR L7805 (refer to the test circuits, $T_j = -55$ to 150 °C,
 $V_i = 10V$, $I_o = 500$ mA, $C_i = 0.33$ μ F, $C_o = 0.1$ μ F unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_o	Output Voltage	$T_j = 25$ °C	4.8	5	5.2	V
V_o	Output Voltage	$I_o = 5$ mA to 1 A $P_o \leq 15$ W $V_i = 8$ to 20 V	4.65	5	5.35	V
ΔV_o^*	Line Regulation	$V_i = 7$ to 25 V $T_j = 25$ °C $V_i = 8$ to 12 V $T_j = 25$ °C		3 1	50 25	mV mV
ΔV_o^*	Load Regulation	$I_o = 5$ to 1500 mA $T_j = 25$ °C $I_o = 250$ to 750 mA $T_j = 25$ °C			100 25	mV mV
I_d	Quiescent Current	$T_j = 25$ °C			6	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_o = 5$ to 1000 mA			0.5	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$V_i = 8$ to 25 V			0.8	mA
$\frac{\Delta V_o}{\Delta T}$	Output Voltage Drift	$I_o = 5$ mA		0.6		mV/°C
eN	Output Noise Voltage	$B = 10$ Hz to 100KHz $T_j = 25$ °C			40	μ V/ V_o
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_i = 8$ to 18 V $f = 120$ Hz	68			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_o = 1$ A $T_j = 25$ °C		2	2.5	V
R_o	Output Resistance	$f = 1$ KHz		17		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_i = 35$ V $T_j = 25$ °C		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_j = 25$ °C	1.3	2.2	3.3	A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS FOR L7806 (refer to the test circuits, $T_j = -55$ to 150 °C,
 $V_i = 15V$, $I_o = 500$ mA, $C_i = 0.33$ μ F, $C_o = 0.1$ μ F unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_o	Output Voltage	$T_j = 25$ °C	5.75	6	6.25	V
V_o	Output Voltage	$I_o = 5$ mA to 1 A $P_o \leq 15$ W $V_i = 9$ to 21 V	5.65	6	6.35	V
ΔV_o^*	Line Regulation	$V_i = 8$ to 25 V $T_j = 25$ °C $V_i = 9$ to 13 V $T_j = 25$ °C			60 30	mV mV
ΔV_o^*	Load Regulation	$I_o = 5$ to 1500 mA $T_j = 25$ °C $I_o = 250$ to 750 mA $T_j = 25$ °C			100 30	mV mV
I_d	Quiescent Current	$T_j = 25$ °C			6	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_o = 5$ to 1000 mA			0.5	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$V_i = 9$ to 25 V			0.8	mA
$\frac{\Delta V_o}{\Delta T}$	Output Voltage Drift	$I_o = 5$ mA		0.7		mV/°C
eN	Output Noise Voltage	$B = 10$ Hz to 100KHz $T_j = 25$ °C			40	μ V/ V_o
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_i = 9$ to 19 V $f = 120$ Hz	65			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_o = 1$ A $T_j = 25$ °C		2	2.5	V
R_o	Output Resistance	$f = 1$ KHz		19		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_i = 35$ V $T_j = 25$ °C		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_j = 25$ °C	1.3	2.2	3.3	A

* Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_o due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.



Negative voltage regulators

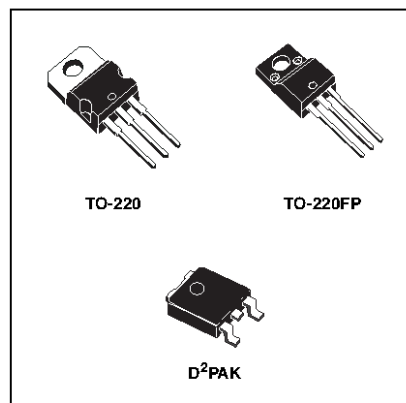
Features

- Output current up to 1.5 A
- Output voltages of -5; -8; -12; -15; -20 V
- Thermal overload protection
- Short circuit protection
- Output transition SOA protection

Description

The L79XXC series of three-terminal negative regulators is available in TO-220, TO-220FP and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation; furthermore, having the same voltage option as the L78XX positive standard series, they are particularly suited for split power supplies. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1.5 A output current.

Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

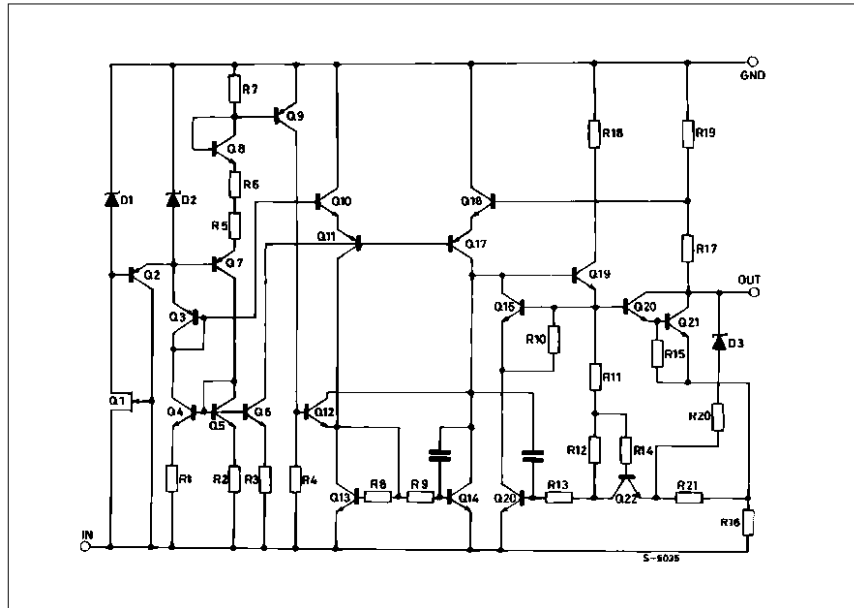
**Table 1. Device summary**

Part numbers	Order codes			Output voltages
	TO-220 (A type)	D ² PAK	TO-220FP	
L7905C	L7905CV	L7905CD2T-TR	L7905CP	-5 V
L7908C	L7908CV			-8 V
L7912C	L7912CV	L7912CD2T-TR	L7912CP	-12 V
L7915C	L7915CV	L7915CD2T-TR	L7915CP	-15 V
L7920C		L7920CD2T-TR ⁽¹⁾		-20 V

1. Available on request.

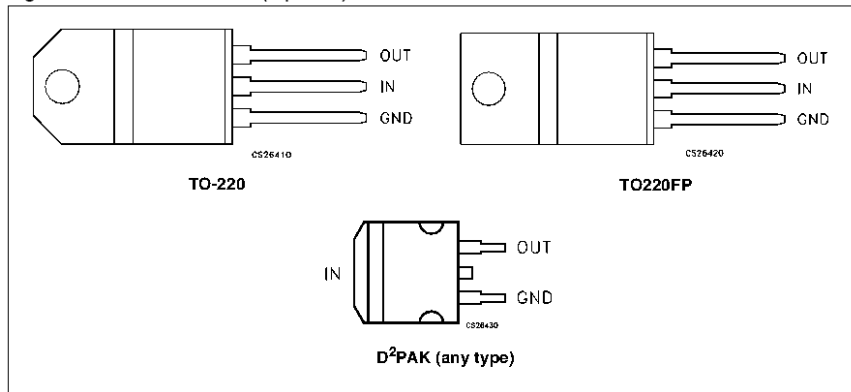
1 Diagram

Figure 1. Schematic diagram



2 Pin configuration

Figure 2. Pin connections (top view)



3 Maximum ratings

Table 2. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value	Unit	
V_I	DC input voltage	for $V_O = 5$ to $18V$	-35	V
		for $V_O = 20, 24V$	-40	
I_O	Output current	Internally limited		
P_D	Power dissipation	Internally limited		
T_{STG}	Storage temperature range	-65 to 150	°C	
T_{OP}	Operating junction temperature range	0 to 150	°C	

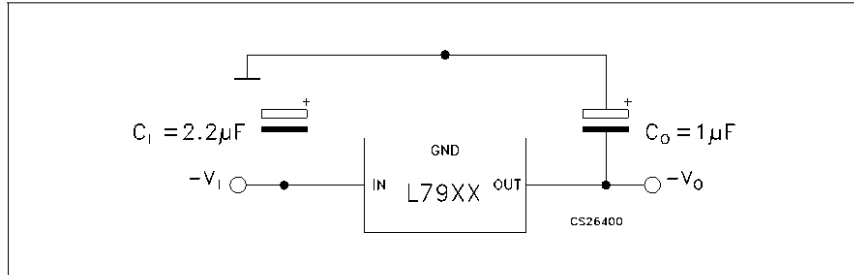
Note: Absolute maximum ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

Table 3. Thermal data

Symbol	Parameter	D ² PAK	TO-220	TO-220FP	Unit
R_{thJC}	Thermal resistance junction-case	3	3	5	°C/W
R_{thJA}	Thermal resistance junction-ambient	62.5	50	60	°C/W

4 Test circuit

Figure 3. Test circuit



5 Electrical characteristics

Table 4. Electrical characteristics of L7905C (refer to the test circuits, $T_J = 0$ to 125 °C, $V_I = -10$ V, $I_O = 500$ mA, $C_I = 2.2$ μ F, $C_O = 1$ μ F unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	-4.8	-5	-5.2	V
V_O	Output voltage	$I_O = -5$ mA to -1 A, $P_O \leq 15$ W $V_I = -8$ to -20 V	-4.75	-5	-5.25	V
$\Delta V_O^{(1)}$	Line regulation	$V_I = -7$ to -25 V, $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$V_I = -8$ to -12 V, $T_J = 25^\circ\text{C}$			50	
$\Delta V_O^{(1)}$	Load regulation	$I_O = 5$ mA to 1.5 A, $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$I_O = 250$ to 750 mA, $T_J = 25^\circ\text{C}$			50	
I_d	Quiescent current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			3	mA
ΔI_d	Quiescent current change	$I_O = 5$ mA to 1 A			0.5	mA
		$V_I = -8$ to -25 V			1.3	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output voltage drift	$I_O = 5$ mA		-0.4		mV/°C
eN	Output noise voltage	$B = 10$ Hz to 100 kHz, $T_J = 25^\circ\text{C}$		100		μ V
SVR	Supply voltage rejection	$\Delta V_I = 10$ V, $f = 120$ Hz	54	60		dB
V_d	Dropout voltage	$I_O = 1$ A, $T_J = 25^\circ\text{C}$, $\Delta V_O = 100$ mV		1.4		V
I_{sc}	Short circuit current			2.1		A

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Ε) Βιβλιογραφία

ΒΙΒΛΙΑ:

α) Βασική Ηλεκτρονική

Συγγραφέας: Albert Paul Malvino

β) Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Συγγραφέας : Taub/Schilling

γ) Review Of Scientific Instruments

American Institute Of Physics

Συγγραφέας:Κ.Πετρίδης, D.Lindsay, D.J.MStothard, M.Ebrahimzadeh

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ:

<http://sps.motorola.com/mfax/>

<http://www.atmel.com>

<http://electronics.teipir.gr>

<http://www.datasheetcatalog.com>

<http://www.hlektronika.gr>

<http://www.maxim-ic.com>

<http://www.falstad.com/circuit>