
ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ LASER

ΚΩΔΙΚΟΣ : 07160ΥΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ

ΕΠΩΝΥΜΟ : ΚΕΡΜΕΛΗΣ

ΟΝΟΜΑ : ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΟΝΟΜΑ ΠΑΤΕΡΑ : ΣΤΕΡΓΙΟΣ

ΟΝΟΜΑ ΜΗΤΕΡΑΣ : ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΚΑΣ : 503534

e-mail : kermelis@yahoo.gr

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΠΩΝΥΜΟ : ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ

ΟΝΟΜΑ : ΒΕΛΙΣΣΑΡΙΟΣ

ΕΙΔΙΚΟΤΗΤΑ : ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

e-mail : vpapachr@el.teithe.gr

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΑΝΑΛΗΨΗΣ : 3/10/2008

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ : 10/9/2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της Πτυχιακής Εργασίας είναι τα ημιαγωγικά laser και τα κυκλώματα οδήγησης αυτών. Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή στην εξέλιξη των laser, στις ιδιότητές τους, στους τρόπους κατάταξής τους και αναφέρονται τα είδη laser που υπάρχουν σήμερα. Στην συνέχεια εξετάζεται το ημιαγωγικό laser ως προς τις ιδιότητές του, τα ηλεκτρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του καθώς και την εξαγωγή αυτών των χαρακτηριστικών. Ακολουθεί μια εκτενής μελέτη των απαιτήσεων οδήγησης του ημιαγωγικού laser και των τρόπων οδήγησής του, παρουσιάζοντας και αναλύοντας διάφορα διακριτά κυκλώματα οδήγησης με έμφαση σε αυτά που προτείνονται από τους κατασκευαστές των ημιαγωγικών laser. Σε αντίθεση με τα διακριτά, παρουσιάζεται η λύση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων οδήγησης και οι δυνατότητες που αυτά παρέχουν. Τέλος, γίνεται η μελέτη και κατασκευή κυκλώματος οδήγησης ενός διοδικού laser των 5mW με παλμικό ρεύμα συχνότητας 3MHz και οπτική αντιστάθμιση ισχύος.

ABSTRACT

The subject of the present Thesis is semiconducting lasers and their driving circuits. We start with an introduction in the development of lasers, their properties, the ways of their classification, and we reference the types of laser existent today. Next, we study the semiconducting laser according to its properties, its electrical and optical characteristics, as well as the extraction of these characteristics. Following that is an extensive study of the semiconducting laser's driving requirements and the various ways of drive, through the presentation and analysis of different discrete driving circuits with an emphasis on those proposed by the manufacturers of semiconducting lasers. As opposed to their discrete counterparts, we also present the driving solution of integrated circuits, as well as the options these offer. Finally, we study and construct the driving circuit for a 5mW diode laser with a, 3MHz frequency, pulse current feed, and optical power counterbalance.



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κυκλώματα οδήγησης ημιαγωγικών laser

ΚΕΡΜΕΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ ΒΕΛΙΣΣΑΡΙΟΣ

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της Πτυχιακής Εργασίας είναι τα ημιαγωγικά laser και τα κυκλώματα οδήγησης αυτών. Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή στην εξέλιξη των laser, στις ιδιότητές τους, στους τρόπους κατάταξής τους και αναφέρονται τα είδη laser που υπάρχουν σήμερα. Στην συνέχεια εξετάζεται το ημιαγωγικό laser ως προς τις ιδιότητές του, τα ηλεκτρικά και οπτικά χαρακτηριστικά του καθώς και την εξαγωγή αυτών των χαρακτηριστικών. Ακολουθεί μια εκτενής μελέτη των απαιτήσεων οδήγησης του ημιαγωγικού laser και των τρόπων οδήγησής του, παρουσιάζοντας και αναλύοντας διάφορα διακριτά κυκλώματα οδήγησης με έμφαση σε αυτά που προτείνονται από τους κατασκευαστές των ημιαγωγικών laser. Σε αντίθεση με τα διακριτά, παρουσιάζεται η λύση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων οδήγησης και οι δυνατότητες που αυτά παρέχουν. Τέλος, γίνεται η μελέτη και κατασκευή κυκλώματος οδήγησης ενός διοδικού laser των 5mW με παλμικό ρεύμα συχνότητας 3MHz και οπτική αντιστάθμιση ισχύος.

ABSTRACT

The subject of the present Thesis is semiconducting lasers and their driving circuits. We start with an introduction in the development of lasers, their properties, the ways of their classification, and we reference the types of laser existent today. Next, we study the semiconducting laser according to its properties, its electrical and optical characteristics, as well as the extraction of these characteristics. Following that is an extensive study of the semiconducting laser's driving requirements and the various ways of drive, through the presentation and analysis of different discrete driving circuits with an emphasis on those proposed by the manufacturers of semiconducting lasers. As opposed to their discrete counterparts, we also present the driving solution of integrated circuits, as well as the options these offer. Finally, we study and construct the driving circuit for a 5mW diode laser with a, 3MHz frequency, pulse current feed, and optical power counterbalance.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Εισαγωγή στα lasers	5
1.1.1 Ιστορική εξέλιξη των laser.....	5
1.1.2 Ιδιότητες της ακτινοβολίας laser.....	6
1.1.3 Τεχνολογική κατάταξη των διατάξεων laser.....	8
1.1.3.1 Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας.....	8
1.1.3.2 Ανάλογα με το ενεργό μέσο.....	8
1.1.3.3 Ανάλογα με την δυνατότητα πρόκλησης βιολογικής ζημίας.....	17
1.1.4 Τα laser στις οπτικές επικοινωνίες.....	20
1.2 Το ημιαγωγικό laser.....	21
1.2.1 Η ανατομία ενός ημιαγωγικού laser.....	21
1.2.2 Οπτικές διαδικασίες στα ημιαγωγικά laser.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ LASER.....	24
2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός ημιαγωγικού laser.....	24
2.1.1 Όροι περιγραφής μέγιστων απόλυτων τιμών.....	24
2.1.2 Όροι περιγραφής ηλεκτρο-οπτικών τιμών.....	24
2.1.3 Όροι περιγραφής οπτικών χαρακτηριστικών.....	26
2.2 Απαιτήσεις οδήγησης ενός διοδικού laser.....	28
2.3 Μέθοδοι μέτρησης των χαρακτηριστικών ενός ημιαγωγικού laser.....	31
2.3.1 I-P Γράφημα.....	31
2.3.2 Ρεύμα φωτοδιόδου συναρτήσει οπτικής ισχύος εξόδου.....	32
2.3.3 Ρεύμα διέλευσης συναρτήσει της τάσης στα άκρα του laser.....	32
2.3.4 Φάσμα ακτινοβολίας laser.....	33
2.3.5 Θερμοκρασία θήκης συναρτήσει του μήκους κύματος εκπομπής.....	33
2.3.6 Ίχνος μακρινού πεδίου.....	34
2.3.7 Λόγος πόλωσης συναρτήσει της οπτικής ισχύος εξόδου.....	34
2.3.8 Χρόνοι ανόδου-καθόδου.....	35
2.3.9 Θερμική αντίσταση (R_{th}).....	37
2.3.10 Θόρυβος σχετικής έντασης RIN.....	40
2.3.11 Αστιγματισμός (As).....	42
2.4 Τρόποι οδήγησης ημιαγωγικών laser.....	43
2.4.1 Οδήγηση με αυτόματο έλεγχο ισχύος (Automatic Power Control).....	43
2.4.2 Η ανάγκη ενός κυκλώματος APC.....	44
2.4.3 Η σχεδιαστική μέθοδος ενός κυκλώματος APC.....	45
2.4.4 Παραδείγματα κυκλωμάτων APC.....	47
2.4.4.1 Η συλλογή κυκλωμάτων της SANYO.....	47
2.4.4.2 Το APC κύκλωμα της SONY.....	52
2.4.4.3 Το APC κύκλωμα της MAXIM με ψηφιακά ελεγχόμενη διαμόρφωση ισχύος.....	54
2.4.5 Οδήγηση με σταθερό ρεύμα (Automatic Current Control).....	55

2.4.5.1 Το ACC κύκλωμα της SONY.....	56
2.4.5.2 Το ACC κύκλωμα της SANYO.....	57
2.4.5.3 Μια βασική πηγή ρεύματος της Linear Technology.....	58
2.4.5.4 Μια πηγή ρεύματος της Texas Instruments.....	59
2.5 Το πειραματικό μοντέλο εξομοίωσης ενός διοδικού laser.....	61
2.6 Διαμόρφωση του διοδικού laser για οπτική μετάδοση.....	62
2.6.1 Το εύρος ζώνης διαμόρφωσης ενός διοδικού laser.....	63
2.6.2 Η καθυστέρηση διέγερσης.....	64
2.6.3 Μετατόπιση συχνότητας.....	65
2.6.4 Πομπός laser.....	65
2.6.5 Το οφθαλμικό διάγραμμα μετάδοσης.....	67
2.7 Οδήγηση με ολοκληρωμένα κυκλώματα IC (Integrated Circuits).....	68
2.7.1 Διακριτό κύκλωμα οδήγησης εναντίον ολοκληρωμένου.....	68
2.7.2 Οδήγηση διοδικών laser με ολοκληρωμένα κυκλώματα της iC-Haus.....	71
2.7.2.1 Λειτουργία συνεχόμενου κύματος (CW).....	73
2.7.2.2 Παλμική λειτουργία.....	77
2.7.3 Μέθοδοι ελέγχου οδηγών laser.....	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.....	85
3.1 Κύκλωμα παλμικής οδήγησης διοδικού laser με Αυτόματο Έλεγχο Ισχύος.....	85
3.1.1 Το κύκλωμα του ταλαντωτή.....	93
3.1.2 Το κύκλωμα τροφοδοσίας.....	94
3.2 Κατασκευή του κυκλώματος.....	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή στα lasers

Σήμερα τα Laser μπορούν άνετα να χαρακτηριστούν σαν μια από τις πιο ενδιαφέρουσες τεχνολογικές επιτεύξεις των τελευταίων εβδομήντα χρόνων. Όμως παρά τις μοναδικές τους ιδιότητες τα Laser δεν έλαβαν αμέσως μία ξεχωριστή θέση στον εργαστηριακό χώρο. Και αυτό όπως ήταν φυσικό αν αναλογισθεί κανείς ότι οι εντυπωσιακές τους ιδιότητες, όπως λεπτότητα της φασματικής γραμμής, ένταση και γεωμετρική συνεκτικότητα, συμφωνία φωτός (coherent light), κλπ, ήταν τόσο σημαντικές ώστε να χρειασθεί ένα διάστημα προσαρμογής πριν γίνει γενικά παραδεκτή η υπεροχή που έδιναν αυτές οι ιδιότητες στις πηγές Laser σε σχέση με τις παραδοσιακές πηγές φωτός.

Για να γίνουμε πιο σαφείς ας πάρουμε σαν παράδειγμα τη λεπτότητα της φασματικής γραμμής που παράγεται από ένα Laser, και ας τη συγκρίνουμε με τη λεπτότητα της φασματικής γραμμής που παράγει μία παραδοσιακή πηγή. Προσπάθειες ερευνητών εβδομήντα χρόνων έκαναν τη λεπτότητα των φασματικών γραμμών των κλασικών φωτεινών πηγών μικρότερη κατά δέκα περίπου φορές, σε βάρος βέβαια της έντασης της φασματικής γραμμής.

Ξαφνικά τότε εμφανίζονται τα Laser με λεπτότητα φασματικής γραμμής κατά ένα εκατομμύριο φορές μικρότερη και με εξαιρετικά μεγάλη ένταση! Μία τόσο εντυπωσιακή πρόοδος δημιουργεί πάντα κάποια δυσπιστία για τη νέα εφεύρεση. Βελτιώσεις αμέσως αποδεκτές είναι αυτές που βελτιώνουν την υπάρχουσα κατάσταση κατά μερικές φορές, (όπως υλικά διπλάσιας αντοχής από τα υπάρχοντα, computers μερικές φορές ταχύτερα κλπ), και όχι κατά εκατομμύρια φορές.

Έτσι μετά την ανακάλυψη τους ακολούθησε μία περίοδος δυσπιστίας, ευτυχώς πολύ μικρή σε διάρκεια, που ύστερα αντικαταστάθηκε από μια περίοδο μεγάλης δραστηριότητας, που φθάνει ως τις μέρες μας.

1.1.1 Ιστορική εξέλιξη των laser

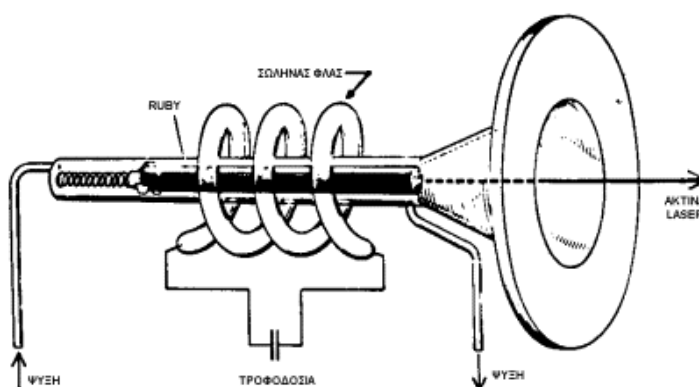
Η λέξη Laser δημιουργήθηκε από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων που περιγράφουν το φαινόμενο πανό στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της συσκευής. Δηλαδή "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" που θα μπορούσε να αποδοθεί στα ελληνικά σαν "ένισχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας" Έχουμε δηλαδή να κάνουμε με ένα ενισχυτή φωτός.

Είναι πολύ παράδοξο το γεγονός ότι τα Laser δεν ανακαλύφθηκαν πολύ πριν το 1960. Τη χρονιά αυτή είχα περάσει ήδη 43 χρόνια από τότε που είχαν τεθεί τα θεωρητικά θεμέλια της κατασκευής ενός ενισχυτή φωτός, δηλαδή ενός Laser. Ο Einstein το 1917 έδωσε την έννοια της εξαναγκασμένης εκπομπής, ότι δηλαδή μια δέσμη από φως μπορεί να εξαναγκάσει άτομα να δώσουν εκπομπή φωτός με χαρακτηριστικά όμοια με το αρχικό φως. Κανείς όμως δεν συνειδητοποίησε τότε ότι η έννοια αυτή θα οδηγούσε στην πραγματοποίηση μιας συσκευής ενίσχυσης του φωτός. Από το 1920 μέχρι το 1950 οι

επιστήμονες ήταν απασχολημένοι με τις νέες ανακαλύψεις της κβαντομηχανικής, της φυσικής των σωματιδίων και της πυρηνικής φυσικής και η ιδέα της κατασκευής ενός Laser έμενε παραμελημένη παρόλο που όχι μόνο η αρχή λειτουργίας των Laser ήταν γνωστή αλλά και η τεχνολογία της κατασκευής τους ήταν απλούστατη.

Είναι πολύ πιθανό κάποιος που έκανε πειράματα με σωλήνες αίγλης παλαιότερα, να δημιούργησε συνθήκες ενίσχυσης φωτός. Δεν παρατήρησε όμως ακτινοβολία Laser είτε από έλλειψη οπτικού αντηχείου, που θα μετέτρεπε τον ενισχυτή φωτός, σε ταλαντωτή-πηγή φωτός, είτε γιατί τα πειράματα αυτά έγιναν σε γυάλινους σωλήνες που είναι σκοτεινοί στο υπέρυθρο, περιοχή όπου συναντάμε τα πιο ισχυρά Laser αερίων.

Το 1960 τελικά, έγινε ένα πολύ σημαντικό πείραμα στα εργαστήρια Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια, που κατέληξε στην κατασκευή του πρώτου Laser. Το πείραμα αυτό ήταν πάρα πολύ απλό. Ένας συνθετικός κρύσταλλος Ruby (ρουβινίου), μήκους 2cm και διαμέτρου 9mm, με γυαλισμένες οπτικά τις δύο έδρες του και επιστρωμένες με άργυρο,



Σχήμα 1.1 : Το Ruby Laser

τοποθετήθηκε μέσα σε ένα ελικοειδή σωλήνα φλας. Όταν το φλας τέθηκε σε λειτουργία, λούζοντας τον κρύσταλλο με πολυχρωματικό φως, βγήκε μία πολύ λεπτή ακτίνα από κόκκινο μονοχρωματικό φως, βγήκε από το ένα άκρο του κρυστάλλου. Αυτή ήταν η πρώτη επιτυχής λειτουργία ενός Laser, του πρώτου από μία σειρά εντυπωσιακών συσκευών, με μοναδικές ιδιότητες, που μεταμόρφωσαν ή δημιούργησαν ολόκληρες περιοχές έρευνας και τεχνολογίας. Το πρώτο αυτό Ruby Laser φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

Το πόσο σημαντική ήταν η ανακάλυψη αυτή του Ruby Laser από τον T. H. Maiman, φαίνεται και από το γεγονός ότι μέσα στα επόμενα 10 χρόνια εμφανίστηκαν 5000 δημοσιεύσεις πάνω σε θέματα ανάπτυξης συστημάτων Laser στον διεθνή επιστημονικό τύπο. Τα έξοδα για έρευνα στον ίδιο τομέα, στην ίδια χρονική περίοδο, ξεπέρασαν τα 500 εκατομμύρια λίρες Αγγλίας.

Η επιβράβευση όλων αυτών που ασχολήθηκαν με την κατασκευή του Laser ήρθε το 1969 όταν οι τρεις πρωτοπόροι C. H. Townes στις Ηνωμένες Πολιτείες και οι A. M. Prokhorov και N. Basov στη Σοβιετική Ένωση μοιράστηκαν το βραβείο Nobel φυσικής.

1.1.2 Ιδιότητες της ακτινοβολίας laser

Εκείνο που έκανε τα Laser μια από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις της επιστήμης είναι οι μοναδικές ιδιότητες της ακτινοβολίας τους, οι οποίες είναι οι εξής:

A. Μονοχρωματικότητα της ακτινοβολίας τους

Η πιο ενδιαφέρουσα ίσως ιδιότητα των Laser είναι η μονοχρωματικότητα της ακτινοβολίας τους. Αν και μια πηγή φωτός δεν μπορεί να δώσει απόλυτα μονοχρωματικό φως, τα Laser δίνουν την καλύτερη υπαρκτή προσέγγιση προς το ιδανικό μονοχρωματικό φως.

B. Κατευθυντικότητα της δέσμης

Κριτήριο για την Κατευθυντικότητα της δέσμης είναι το λεγόμενο "άνοιγμα" της, που στην πράξη είναι το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική ακτίνα. Συνηθίζεται να εκφράζεται σε mrad. Για ένα κλασσικό μικρό Laser το άνοιγμα της δέσμης του είναι περίπου 1mrad, πράγμα που αντιστοιχεί σε αύξηση της διαμέτρου της δέσμης του Laser κατά 1mm ανά μετρό διαδρομής.

Γ. Λαμπρότητα δέσμης

Τα Laser είναι πηγές μεγάλης λαμπρότητας και έντασης ακτινοβολίας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η λαμπρότητα της δέσμης ενός Laser He-Ne που έχει ισχύ 1mWatt είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τη λαμπρότητα του ήλιου (τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη).

Δ. Σύμφωνη ακτινοβολία

Στα Laser βρίσκουμε τον υψηλότερο δυνατό βαθμό συμφωνίας από οποιαδήποτε άλλη φωτεινή πηγή. Αν μια πηγή φωτός είναι τελείως σύμφωνη και στο χώρο και στον χρόνο, υπάρχει απόλυτη και σταθερή συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου της φωτεινής ακτινοβολίας σ' ένα σημείο του χώρου μ' αυτές σε κάθε άλλο σημείο του. Αν η μεταβολή αυτή του ηλεκτρικού πεδίου μετρηθεί και στα δυο σημεία αυτά, μπορεί να πει κανείς με μεγάλη βεβαιότητα σε κάθε επόμενη χρονική στιγμή τι κάνει το ηλεκτρικό πεδίο σ' ένα δεύτερο σημείο, απλώς και μόνο μετρώντας το πεδίο στο πρώτο σημείο.

E. Η πόλωση της δέσμης LASER

Το φως των ηλεκτρικών λαμπτήρων, των λαμπτήρων φθορισμού, του ήλιου και των πολλών άλλων φωτεινών πηγών συμπεριφέρεται γενικά σαν "μη πολωμένο" ή "τυχαία πολωμένο". Αντίθετα, πολλά Laser παράγουν πολωμένο φως. Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε, ότι η ακτινοβολία τους έχει και αυτή την ιδιότητα σαν χαρακτηριστικό της. Στην πράξη η πόλωση της δέσμης του Laser επιτυγχάνεται με την χρήση ενός οπτικού πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο. Τα πιο συνηθισμένα από αυτά στοιχεία είναι οπτικές επιφάνειες σε γωνίες Brewster, (που συνήθως ονομάζονται "παράθυρα Brewster"), πρίσματα, φράγματα ανάκλασης, οπτικοί πολωτές κλπ.

1.1.3 Τεχνολογική κατάταξη των διατάξεων laser

Τα συστήματα laser μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους, τη «φύση» του οπτικού ενεργού μέσου και τη πρόκληση βιολογικής ζημίας της εκπεμπόμενης δέσμης. Στη συνέχεια αναφέρουμε τους κανόνες ταξινόμησης των laser και ταξινομούμε τα γνωστότερα laser στις κατηγορίες που αναφέρθηκαν.

1.1.3.1 Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας

Continuous Wave Lasers - CW (laser συνεχούς λειτουργίας): Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με σταθερό ρυθμό ισχύος της δέσμης. Στα περισσότερα laser μεγάλης ισχύος υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της, ενώ στα laser αερίων μικρής ισχύος (He-Ne) η ισχύς εξόδου είναι σταθερή εκ κατασκευής και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Single Pulsed Lasers (laser μονού παλμού): Τα laser συνήθως έχουν διάρκεια παλμού από μερικές εκατοντάδες microseconds ως μερικά milliseconds. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας αναφέρεται και ως κανονικός τρόπος, ή μακρύς παλμός.

Single Pulsed Q-Switched (laser μετατροπής Q): Είναι εκείνα τα συστήματα laser στα οποία μία καθυστέρηση εκτός της κοιλότητας επιτρέπει στο ενεργό μέσο να αποθηκεύσει το μέγιστο της ενέργειας. Έπειτα, ύστερα από συνθήκες βέλτιστου κέρδους (gain), η εκπομπή συμβαίνει σε μονό παλμό, της τάξης του 10^{-8} s. Η ισχύς των παλμών αυτών συνήθως φτάνει σε επίπεδα μεταξύ 10^6 και 10^8 W.

Παλμικά lasers: Είναι αυτά τα συστήματα laser που λειτουργούν όπως τα μονού παλμού, με επανάληψη της διαδικασίας με σταθερό ή και μεταβλητό ρυθμό.

Mode Locked lasers (laser εγκλείδωσης ρυθμού): Αυτά λειτουργούν ως αποτέλεσμα των συντονισμένων ρυθμών της οπτικής κοιλότητας, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης δέσμης. Όταν οι φάσεις των διαφορετικής συχνότητας ρυθμών συγχρονίζονται, τότε οι ρυθμοί συμβάλλουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα στενούς επαναλαμβανόμενους παλμούς. Τα laser αυτής της κατηγορίας παράγουν σειρές από παλμούς με διάρκειες από pico- (10^{-12}) ως femto- (10^{-15}) seconds.

1.1.3.2 Ανάλογα με το ενεργό μέσο

Solid State Laser (laser στερεάς κατάστασης): Είναι τα laser που χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο, ή γυαλί. Το υλικό που παράγει την ακτινοβολία laser, συνήθως ιόντα Cr^{3+} , Nd^{3+} , ή Ho^{3+} , είναι διασκορπισμένο σε κρυσταλλικό πλέγμα.

Semiconductor Laser (laser ημιαγωγών ή διοδικά): Ημιαγωγίμες διατάξεις, οι οποίες αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγωγίμου υλικού σε επαφή. Τα laser αυτού του τύπου είναι πολύ μικρών διαστάσεων και ισχύος και μπορούν να τοποθετηθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Gas Laser (laser αερίων): Χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο ένα αέριο ή μείγμα αερίων μέσα σε σωλήνα.

Excimer Laser (laser διεγερμένων διμερών): Μοριακά laser που εμπλέκουν μεταπτώσεις μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρονικών καταστάσεων. (Υποκατηγορία των laser αερίων).

Chemical Laser (χημικά laser): Είναι τα laser εκείνα στα οποία η αναστροφή πληθυσμών παράγεται άμεσα μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Συνήθως τα χημικά laser περιλαμβάνουν στο μηχανισμό άντλησης μία αντίδραση μεταξύ αερίων στοιχείων ή ενώσεων. (Υποκατηγορία των Gas lasers).

Dye Laser (laser χρωστικών): Είναι εκείνα που το ενεργό μέσο αποτελείται από διαλύματα σύνθετων οργανικών χρωστικών σε υγρά όπως η αιθυλική και η μεθυλική αλκοόλη ή το νερό. Κατάλληλη επιλογή της χρωστικής και της συγκέντρωσής της επιτρέπει την παραγωγή δέσμης laser σε μεγάλη περιοχή μηκών κύματος, μέσα και γύρω από το ορατό φάσμα.

Laser Χρωματικών Κέντρων: Χρωματικά κέντρα σε κρυστάλλους αλογονούχων αλκαλίων χρησιμοποιούνται ως αποδοτικά, οπτικά αντλούμενα, laser με πλατιά επιλεκτικότητα στο κοντινό υπέρυθρο.

Laser ελευθέρων ηλεκτρονίων: Τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα διαμέσου ενός περιοδικού μαγνητικού πεδίου και η διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής προέρχεται από την αλληλεπίδραση του H/M πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια. (κυρίως σε πειραματικό στάδιο).

Ακολουθεί ένας πίνακας με τα κυριότερα παραδείγματα laser των παραπάνω κατηγοριών καθώς και οι κυριότερες εφαρμογές τους.

Gas lasers

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Helium-neon laser	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 μm, 1.52 μm, 3.3913 μm)	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Παρεμβαλλομετρία, Ολογραφία, Φασματοσκοπία, Ανάγνωση barcode, Ευθυγράμμιση, Οπτικές

			επιδείξεις
Argon laser	454.6 nm, 488.0 nm, 514.5 nm (351 nm, 363.8, 457.9 nm, 465.8 nm, 476.5 nm, 472.7 nm, 528.7 nm, επίσης ο διπλασιασμός συχνότητας μας παρέχει 244 nm, 257 nm)	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Αμφιβληστροειδούς φωτοθεραπεία (για το διαβήτη), Λιθογραφία, Ομοεστιακή μικροσκοπία, Φασματοσκοπία άντλησης άλλων laser
Krypton laser	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Επιστημονική έρευνα, Συνδυασμός με το Argon laser για τη δημιουργία laser "Λευκού Φωτός", Οπτικές επιδείξεις
Xenon ion laser	Πολλές γραμμές σ'όλο το ορατό φάσμα επεκταμένες στο UV και IR	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Επιστημονική έρευνα
Nitrogen laser	337.1 nm	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Άντληση των dye laser, Μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Επιστημονική έρευνα. Τα laser αζώτου μπορούν να λειτουργήσουν υπερακτινοβολώντας (χωρίς συντονιστή κοιλότητας). Ερασιτεχνικές κατασκευές
Carbon dioxide laser	10.6 μm, (9.4 μm)	Εγκάρσια (υψηλής ισχύος) ή διαμήκη (χαμηλής ισχύος) ηλεκτρική εκκένωση	Επεξεργασία υλικών (κοπή, συγκόλληση, κλπ.). Χειρουργική
Carbon monoxide laser	2.6 to 4 μm, 4.8 to 8.3 μm	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Επεξεργασία υλικών (χάραξη, συγκόλληση, κλπ.), Φωτοακουστική φασματοσκοπία
Excimer laser	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	Επανασυνδυασμός μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης	Υπεριώδης λιθογραφία για ημιαγωγικές κατασκευές, Χειρουργική

Chemical Lasers

(χρησιμοποιούνται σαν όπλα κατευθυνόμενης ενέργειας)

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Hydrogen fluoride laser	2.7 με 2.9 μm για το Hydrogen fluoride (<80% στην ατμοσφαιρική μετάδοση)	Χημική αντίδραση σε ένα καιόμενο πίδακα από αιθυλένιο και τριφθοριούχο άζωτο	Χρησιμοποιήθηκαν για στρατιωτικό σκοπό από τις Η.Π.Α., Σε CW (συνεχόμενου κύματος) λειτουργία μπορούν να φτάσουν σε ισχύ της τάξεως των MW
Deuterium fluoride laser	~3800 nm (3.6 με 4.2 μm) (~90% ατμ. μετάδοση)	Χημική αντίδραση	Βλήματα παλμικής ενέργειας, Στρατηγικά laser υψηλής ισχύος
COIL (Chemical oxygen-iodine laser)	1.315 μm (<70% ατμ. μετάδοση)	Χημική αντίδραση του μονατομικού δέλτα οξυγόνου με το ιώδιο	Laser οπλισμός, Επιστημονική και υλική έρευνα, Αερομεταφερόμενο laser, ισχύς της τάξεως των MW στο CW
Agil (All gas-phase iodine laser)	1.315 μm (<70% ατμ. μετάδοση)	Χημική αντίδραση ατόμων χλωρίου και αεριούχου υδροζοϊκού οξέως με αποτέλεσμα διεγερόμενα μόρια χλωριούχου αζώτου τα οποία μετά περνούν την ενέργειά τους στα άτομα ιωδίου	Επιστημονική μελέτη, Οπλισμός, Αεροδιάστημα

Dye Lasers

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Dye lasers	390-435 nm (στιλβένιο), 460-515 nm (κουμαρίνης 102), 570-640 nm (rhodamine 6G), πολλά άλλα	Άλλα laser, Λυχνία λάμπης	Έρευνα, Φασματοσκοπία, Απομάκρυνση εκγενετής σημαδιών, Διαχωρισμός ισοτόπου. Το εύρος συντονισμού του laser εξαρτάται από πια χρωστική ουσία έχει χρησιμοποιηθεί

Metal-vapor Lasers (Ατμών Μετάλλου)

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Helium-cadmium (HeCd) metal-vapor laser	441.563 nm, 325 nm	Ηλεκτρικής εκκένωσης ατμών μετάλλου αναμειγμένου με ρυθμιστή αερίου ηλίου	Εφαρμογές εκτύπωσης και στοιχειοθεσίας, Εξέταση διέγερσης φθορισμού (εκτύπωση χαρτονομισμάτων), Επιστημονική έρευνα
Helium-mercury (HeHg) metal-vapor laser	567 nm, 615 nm		Σπάνιο, Επιστημονική μελέτη, Ερασιτεχνικές κατασκευές
Helium-selenium (HeSe) metal-vapor laser	μέχρι 24 μήκη κύματος μεταξύ κόκκινου και UV		Σπάνιο, Επιστημονική μελέτη, Ερασιτεχνικές κατασκευές
Helium-silver (HeAg) metal-vapor laser	224.3		Επιστημονική έρευνα
Neon-copper (NeCu) metal-vapor laser	248.6	Ηλεκτρικής εκκένωσης ατμών μετάλλου αναμειγμένου με ρυθμιστή αερίου νέου	Επιστημονική έρευνα
Copper vapor laser	510.6 nm, 578.2 nm	Ηλεκτρικής εκκένωσης	Δερματολογικές χρήσεις, φωτογραφία υψηλής ταχύτητας, άντληση των dye laser
Gold vapor laser	627 nm		Σπάνιο, Χρήση σε δερματολογικές και φωτοδυναμικές θεραπείες

Solid State Lasers

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Ruby laser	694.3 nm	Λυχνία λάμπης	Ολογραφία, αφαίρεση τατουάζ. Ο πρώτος τύπος

			ορατού laser που κατασκευάστηκε (Μάιος 1960)
Nd:YAG laser	1.064 μm, (1.32 μm)	Λυχνία λάμπης, δίοδος laser	Επεξεργασία υλικών, μέτρηση απόστασης, laser προσδιορισμού στόχου, άντληση άλλων laser (σε συνδυασμό με τον διπλασιασμό συχνότητας για παραγωγή πράσινης (532 nm) δέσμης. Ένα από τα πιο κοινά πράσινα laser
Er:YAG laser	2.94 μm	Στιγμιαίο φώς, δίοδος laser	Περιοδοντική απολέπιση, Οδοντιατρική
Neodymium YLF (Nd:YLF) solid-state laser	1.047 and 1.053 μm	Λυχνία λάμπης, δίοδος laser	Χρησιμοποιείται κυρίως για παλμική άντληση ορισμένων τύπων παλμικών Ti:sapphire laser, σε συνδυασμό με διπλασιασμό συχνότητας
Neodymium doped Yttrium orthovanadate (Nd:YVO ₄) laser	1.064 μm	Δίοδος laser	Χρησιμοποιείται κυρίως για συνεχή άντληση Ti:sapphire και dye lasers σε συνδυασμό με διπλασιασμό συχνότητας. Επίσης χρησιμοποιούνται παλμικά για μαρκάρισμα και μικροκατεργασία. Ένα διπλασιασμένο συχνοτικά Nd:YVO ₄ laser είναι ο σωστός τρόπος κατασκευής πράσινου laser pointer
Neodymium doped yttrium calcium oxoborate Nd:YCa ₄ O(BO ₃) ₃ or simply Nd:YCOB	~1.060 μm (~530 nm στη δεύτερη αρμονική)	Δίοδος laser	Nd:YCOB επίσης ονομάζεται "self-frequency doubling" ή SFD laser το οποίο έχει μη γραμμικά χαρακτηριστικά ικανά για παραγωγή δεύτερης αρμονικής. Έχει τη δυνατότητα να απλοποιήσει το σχεδιασμό των υψηλής φωτεινότητας πράσινων laser
Neodymium glass (Nd:Glass) laser	~1.062 μm (ορυκτό γυαλί), ~1.054 μm (φωσφορικό	Λυχνία λάμπης, δίοδος laser	Χρησιμοποιείται σε εξαιρετικά υψηλής ισχύος (terawatt) και υψηλής ενέργειας (megajoules)

	γυαλί)		συστήματα πολλαπλών δεσμών για αδρανή περιορισμένη τήξη. Τα Nd:Glass lasers είναι συνήθως συχνοτικά τριπλασιασμένα στην τρίτη αρμονική στα 351 nm για συσκευές τήξης
Titanium sapphire (Ti:sapphire) laser	650-1100 nm	Άλλα laser	Φασματοσκοπία, έρευνα. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή υπέρμικρου εύρους και μεγάλης έντασης παλμών
Thulium YAG (Tm:YAG) laser	2.0 μm	Δίοδος laser	
Ytterbium YAG (Yb:YAG) laser	1.03 μm	Λυχνία λάμπης, δίοδος laser	Οπτική ψύξη, επεξεργασία υλικών, έρευνα στην παραγωγή παλμών υπέρμικρου εύρους, πολυφωτονιακή μικροσκοπία
Ytterbium: ₂ O ₃ (glass or ceramics) laser	1.03 μm	Δίοδος laser	Έρευνα στην παραγωγή παλμών υπέρμικρου εύρους
Ytterbium doped glass laser (rod, plate/chip, and fiber)	1. μm	Δίοδος laser	Συνδεδεμένη σε οπτική ίνα είναι ικανό να παράγει αρκετά kilowatt συνεχόμενη ισχύ, έχοντας καλή απόδοση οπτικής μεταφοράς. Επεξεργασία υλικών : κοπή, συγκόλληση, χάραξη. Ευρείας ζώνης οπτικές επικοινωνίες
Holmium YAG (Ho:YAG) laser	2.1 μm	Δίοδος laser	Αποκόλληση ιστών, αφαίρεση πέτρας νεφρού, οδοντιατρική
Cerium doped lithium strontium(or calcium) aluminum fluoride (Ce:LiSAF, Ce:LiCAF)	~280 to 316 nm	Αντλούμενο Nd:YAG laser τετραπλασιασμένο συχνοτικά, αντλούμενο excimer laser, αντλούμενο laser ατμών χαλκού	Απομακρυσμένες ατμοσφαιρικές μετρήσεις, οπτική μελέτη
Promethium 147 doped	933 nm, 1098 nm	??	Το υλικό του συγκεκριμένου laser είναι ραδιενεργό. Έχει

phosphate glass ($^{147}\text{Pm}^{+3}:\text{Glass}$) solid-state laser			γίνει επίδειξη στην χρήση το 1987 στο LLNL
Chromium doped chrysoberyl (alexandrite) laser	Συντονισμένο στο εύρος 700 με 820 nm	Λυχνία λάμψης, δίοδος laser, τόξο υδραργύρου (για CW λειτουργία)	Δερματολογικές χρήσεις, κατεργασία laser
Erbium doped and erbium-ytterbium codoped glass lasers	1.53-1.56 μm	Δίοδος laser	Συναντώνται σε μορφή ράβδου, πιάτου/τσιπ και οπτικής ίνας. Χρησιμοποιούνται στην οπτική ενίσχυση στις τηλεπικοινωνίες
Trivalent uranium doped calcium fluoride ($\text{U}:\text{CaF}_2$) solid-state laser	2.5 μm	Λυχνία λάμψης	Το πρώτο laser στερεάς κατάστασης (Νοέμβριος 1960) που αναπτύχθηκε από τον Peter Sorokin και Mirek Stevenson στα εργαστήρια της IBM. Δεύτερο συνολικά μετά το ruby laser υγρού ηλίου. Αχρησιμοποίητο σήμερα
Divalent samarium doped calcium fluoride ($\text{Sm}:\text{CaF}_2$) laser	708.5 nm	Λυχνία λάμψης	Επίσης ανεπτυγμένο από τους παραπάνω το 1961. Δεν χρησιμοποιείται επίσης
F-center laser	2.3-3.3 μm	Ιόν laser	Φασματοσκοπία

Semiconductor Lasers

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Semiconductor laser diode (γενικές πληροφορίες)	0.4-20 μm , ανάλογα την ενεργό περιοχή του υλικού	Ηλεκτρικό ρεύμα	Τηλεπικοινωνίες, ολογραφία, εκτύπωση, οπλισμός, κατεργασία, συγκόλληση, πηγή άντλησης για άλλα laser
GaN	0.4 μm		Οπτικοί δίσκοι
AlGaAs	0.63-0.9 μm		Οπτικοί δίσκοι, laser

			δείκτες, επικοινωνία δεδομένων. 780nm laser δίοδοι που χρησιμοποιούνται στα CD players είναι το πιο κοινό είδος laser στον κόσμο. Άντληση των laser στερεάς κατάστασης, κατεργασία, ιατρική
InGaAsP	1.0-2.1 μm		Τηλεπικοινωνίες, άντληση των laser στερεάς κατάστασης, κατεργασία, ιατρική
lead salt	3-20 μm		
Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL)	850 - 1500 nm, ανάλογα το υλικό		Τηλεπικοινωνίες
Quantum cascade laser	Ημιπέρυθρο με μακρινό υπέρυθρο		Έρευνα, μελλοντικές εφαρμογές μπορεί να περιλαμβάνουν κρούση-αποφυγή ραντάρ, βιομηχανικός έλεγχος διεργασίας και ιατρικές γνωματεύσεις όπως αναλυτής αναπνοής
Hybrid silicon laser	Ημιπέρυθρο		Έρευνα

Άλλοι τύποι Laser

Τύπος Laser	Μήκη Κύματος Λειτουργίας	Πηγή Άντλησης	Εφαρμογές και Σημειώσεις
Free electron laser	Ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος (περίπου 100 nm – μέχρι αρκετά mm), ένα free electron laser μπορεί να συντονιστεί σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος	Σχετικιστική δέσμη ηλεκτρονίων	Ατμοσφαιρική έρευνα, επιστήμη υλικών, εφαρμογές υγείας

Gas dynamic laser	Αρκετές φασματικές γραμμές γύρω στα 10.5 μm , άλλες συχνότητες είναι εφικτές με διαφορετικές προσμίξεις αερίου		Στρατιωτικές εφαρμογές, μπορεί να λειτουργεί σε CW με ισχύ αρκετά MW
"Nickel-like" Samarium laser	X-rays στα 7.3 nm		Πρώτη επίδειξη ενός αποτελεσματικού laser ακτίνων X, πιθανές εφαρμογές σε υψηλής ανάλυσης μικροσκοπία και ολογραφία, λειτουργία σε μήκη κύματος όπου είναι δυνατή η παρατήρηση της δομής του DNA, η δράση των ιών και των φαρμάκων στα κύτταρα
Raman laser, uses inelastic stimulated Raman scattering in a nonlinear media, mostly fiber, for amplification	1-2 μm για την έκδοση οπτικής ίνας	Άλλα laser, κυρίως Yb-glass laser σε οπτική ίνα	Πλήρης κάλυψη του εύρους 1 – 2 μm , διανέμει την οπτική ενίσχυση σημάτων για τηλεπικοινωνίες
Nuclear pumped laser	Βλέπε gas lasers	Πυρηνική διάσπαση	Έρευνα

1.1.3.3 Ανάλογα με την δυνατότητα πρόκλησης βιολογικής ζημίας

Με σκοπό να εξασφαλιστεί μια κοινή βάση για τις απαιτήσεις και τα πρότυπα ασφαλείας στα βιοϊατρικά laser, έχει γίνει προσπάθεια ώστε όλα τα laser (ιατρικά, βιομηχανικά κ.ά.) να μπορούν να ταξινομηθούν σε κάποια ορισμένη κατηγορία ή κλάση ή τάξη. Για να ταξινομηθεί ένα laser πρέπει να είναι γνωστά το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει, η ισχύς του και η διάρκεια της έκθεσης στην ακτινοβολία. Σημασία έχει το μέγιστο επίπεδο ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει το laser κατά τη διάρκεια χρήσης του κάτω από την πλήρη ικανότητά του και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετά την κατασκευή του. Κάθε τάξη έχει ένα σύνολο από μέτρα ασφαλούς χρήσης, τα οποία οι κατασκευαστές και οι χρήστες πρέπει να τηρούν αυστηρά. Σε κάθε laser ή αντίστοιχο

σύστημα πρέπει να επισυνάπτονται σχετικές ετικέτες που αναφέρουν την τάξη και κάποια στοιχεία επικινδυνότητας για τη συγκεκριμένη συσκευή. Η κατανόηση της διαδικασίας ταξινόμησης των laser αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση σχετικά με την ασφάλειά τους. Αυτές οι τάξεις αναφέρονται στα διάφορα πρότυπα ασφαλείας των διαφόρων χωρών (π.χ. τα πρότυπα ANSI Z136.1, το IEC κ.ά.). Η ταξινόμηση των βιομηχανικών laser παρέχεται επίσης από τον κατασκευαστή. Παρακάτω αναλύουμε εκτενέστερα την κάθε μία από τις τάξεις στις οποίες ταξινομούνται σήμερα οι πηγές των laser

(α) Τάξη I

Η τάξη I περιλαμβάνει συσκευές που δεν εκπέμπουν επιζήμια για τους οφθαλμούς επίπεδα ακτινοβολίας και, επομένως, τα laser που ανήκουν σε αυτήν εξαιρούνται πρακτικά από μέτρα ασφαλείας. Παρόλα αυτά, καλό είναι η άσκοπη έκθεση σε αυτά να αποφεύγεται, αν και σε γενικές γραμμές είναι ασφαλή κάτω από λογική και προβλέψιμη χρήση. Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο έκθεσης σε δέσμη της τάξης αυτής είναι 0,98mW. Εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα laser της τάξης αυτής είναι τα compact disc (CD) player, οι εκτυπωτές laser και τα CD ROM players.

(β) Τάξη II

Τα laser της δεύτερης τάξης εκπέμπουν ακτινοβολία στην ορατή περιοχή και έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν βλάβη στα μάτια μέσα από χρόνια έκθεση. Γενικά, το ανθρώπινο μάτι ανοιγοκλείνει μέσα σε 0,25s όταν εκτεθεί σε τέτοιου είδους laser. Αυτή η αντίδραση παρέχει ικανοποιητική προστασία. Ωστόσο, είναι δυνατό, να ξεπεραστεί αυτό το ανοιγοκλείσιμο των βλεφάρων και να κοιτάξει κανείς την ακτινοβολία από το laser για χρονικό διάστημα αρκετό να προκαλέσει βλάβη στο μάτι. Η μέγιστη εξερχόμενη ισχύς είναι 1mW και το μήκος κύματος 400-700nm. Εφαρμογές που συναντά κανείς τέτοια laser είναι σε ευθυγραμμίσεις και στους σαρωτές των ταμείων των υπερκαταστημάτων, ενώ αντιπροσωπευτικό είναι το laser He-Ne που χρησιμοποιείτε σχεδόν παντού. Δεν απαιτούνται ιδιαίτερες προφυλάξεις για τυχαία έκθεση, εκτός από την οφειλόμενη προσοχή στη σκόπευση της δέσμης και στο να μην τη δει κανείς απευθείας.

(γ) Τάξη IIa (δεν χρησιμοποιείται από το πρότυπο ANSI Z136)

Τα laser αυτής της τάξης προορίζονται για ειδικούς σκοπούς και δεν κρίνεται σκόπιμη η παρατεταμένη επαφή με τα μάτια. Η ισχύς τους είναι μικρότερη από 1mW. Προκαλούν βλάβη σε επαφή με τα μάτια για 1s και οι περισσότεροι αναγνώστες bar-code ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

(δ) Τάξη IIIa

Στην τάξη αυτή, τα laser είναι γενικά ακίνδυνα όταν τα κοιτάξουμε στιγμιαία με γυμνό μάτι, αλλά θέτουν μεγάλο κίνδυνο για τα μάτια όταν κοιταχθούν μέσα από οπτικά όργανα όπως μικροσκόπια και κιάλια. Ισχύουν περίπου τα ίδια με τα της τάξης II αλλά τα laser της τάξης IIIa είναι συνεχούς λειτουργίας, έχουν μέγιστη ισχύ εξόδου 5mW και ακτινοβολία μικρότερη από $25Wm^{-2}$, ενώ εκπέμπουν και αυτά στο ορατό. Πάνω από τα 4μm συμπεριφέρονται όπως η τάξη I και χρησιμοποιούνται κυρίως σε χειρουργικές διατάξεις και σε στυλοδείκτες (pointer pens).

(ε) Τάξη IIIβ

Η ακτινοβολία των laser της τάξης IIIβ μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό σε απευθείας επαφή με το ανθρώπινο μάτι ή από κατοπτρική ανάκλαση. Αντίθετα, η επαφή με διάχυτα ανακλώμενη σε αντικείμενα ακτινοβολία είναι γενικά ασφαλής, υπό την προϋπόθεση η απόσταση του ματιού από την ανακλώμενη επιφάνεια να είναι μεγαλύτερη από 13cm και η διάρκεια της έκθεσης να είναι μικρότερη από 10s. Τα laser αυτά δίνουν ισχύ 0.5W και μπορεί να εκπέμπουν στο ορατό ή στο μη-ορατό (μήκη κύματος μεγαλύτερα από 315 nm). Παράδειγμα αποτελούν τα laser He-Ne που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα ερευνητικά εργαστήρια, καθώς και ορισμένα laser ημιαγωγών για εφαρμογές στη φυσιοθεραπεία.

(στ) Τάξη IV

Η τάξη αυτή συμπεριλαμβάνει όλα τα laser με ισχύ πάνω από 500mW σε συνεχή λειτουργία. Θέτουν κινδύνους για τραυματισμούς στα μάτια και στο δέρμα καθώς και κίνδυνο ανάφλεξης εύφλεκτων υλικών. Το κοίταγμα της δέσμης, ακόμη και ύστερα από διάχυτη ανάκλαση, μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό στα μάτια και στο δέρμα. Όλα τα μέτρα ασφαλείας για αυτήν την τάξη πρέπει να τηρούνται πολύ αυστηρά.

(ζ) Τάξη 1M (IEC μόνο)

Στην τάξη αυτή ανήκουν προϊόντα laser τα οποία είναι ασφαλή για το γυμνό μάτι χωρίς προσθήκη οπτικών στοιχείων. Μία ετικέτα πάνω τους θα έλεγε χαρακτηριστικά: “μην κοιτάζετε απευθείας μέσα από μεγεθυντικούς φακούς ή μικροσκόπια” για μια αποκλίνουσα δέσμη και “μην κοιτάζετε απευθείας μέσα από κιάλια ή μικροσκόπια” για ευθυγραμμισμένη δέσμη. Εκπέμπουν σε μήκος κύματος 302nm-4μm.

(η) Τάξη 2M (IEC μόνο)

Η τάξη αυτή περιορίζεται σε laser με μήκος κύματος 302nm -4μm τα οποία είναι ασφαλή στην επαφή με το γυμνό μάτι για 0,25s. Δεν είναι ασφαλή κάτω από ορισμένες συνθήκες όρασης με οπτικά βοηθήματα.

Όπως είπαμε παραπάνω, κάθε laser, ανάλογα με την τάξη που ανήκει, πρέπει να σημαίνεται με κατάλληλες ενδείξεις και να συνοδεύεται, αν χρειάζεται, από ένα διάφραγμα ή εξασθενητή δέσμης που θα εξασφαλίζει επίπεδα εξόδου σύμφωνα με τα MPE. Συνήθως κάθε συσκευή φέρει πάνω της μια ετικέτα στην οποία έχουν καταγραφεί από τον κατασκευαστή κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία. Αν το μέγεθος της συσκευής δεν βοηθάει στην τοποθέτηση της ετικέτας, αυτή συμπεριλαμβάνεται στη συσκευασία. Το χρώμα τους είναι μαύρο πάνω σε κίτρινο φόντο. Για τις τάξεις I και 1M αναφέρονται η ακτινοβολία που εκπέμπεται και πληροφορίες για τα πρότυπα. Στις τάξεις από II και πάνω αναφέρονται η μέγιστη ισχύς εξόδου, η διάρκεια του παλμού και το εκπεμπόμενο μήκος κύματος. Το άνοιγμα του laser αναφέρεται στις τάξεις IIIβ και IV.

1.1.4 Τα laser στις οπτικές επικοινωνίες

Από την πρώτη μέρα λειτουργίας των laser είναι ελκυστικά για πολλούς λόγους. Η μεγάλη κατευθυντικότητα της δέσμης των laser, σε σύγκριση με τις πηγές μικροκυμάτων, είναι ένας πρώτος βασικός λόγος. Για να πετύχουμε την ίδια κατευθυντικότητα, πρέπει να φτιάξουμε κεραίες μικροκυμάτων με διάμετρο περίπου 100.000 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της δέσμης laser. Έτσι ίδιο άνοιγμα δέσμης παίρνουμε από laser διαμέτρου 1cm και από πηγή μικροκυμάτων με κεραία διαμέτρου 1000m. Εκτός όμως από τα πολλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και μειονεκτήματα. Ένα απ' αυτά είναι ότι το πολύ μεγάλο εύρος ζώνης τους πολύ δύσκολα ακόμα μπορεί ν' αξιοποιηθεί σ' όλη την έκταση του. Επίσης, οι δυνατότητες των συστημάτων οπτικής τηλεπικοινωνίας περιορίζονται ακόμα από άλλους παράγοντες όπως είναι η χρησιμοποίηση των κατάλληλων φωρατών, δυσκολίες στην εισαγωγή της πληροφορίας στη δέσμη laser, κακές καιρικές συνθήκες... Ευρεία εφαρμογή τα τελευταία χρόνια γίνεται στη διαστημική τηλεπικοινωνία με laser (όπου η απουσία ατμόσφαιρας παρακάμπει πολλά προβλήματα), στην επίγεια τηλεπικοινωνία μεταξύ σημείων που έχουν οπτική επαφή, και τέλος σε επικοινωνία με οπτικές ίνες. Σ' ένα πρακτικό σύστημα οπτικής τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα laser CO₂ ενός ρυθμού. Το laser αυτό λειτουργεί συνεχώς σε μια από τις πολλές γραμμές ταλάντωσης-περιστροφής του, συνήθως στην 10.5915μm. Η διαμόρφωση της δέσμης γίνεται κατά συχνότητα μ' έναν ενεργό κρύσταλλο που τοποθετείται μέσα στο οπτικό αντηχείο και ο οποίος αλλάζει το μήκος του οπτικού αντηχείου όταν ένα ηλ. σήμα εφαρμόζεται πάνω του. Για το μήκος κύματος του CO₂ laser μια αλλαγή μήκους του αντηχείου κατά λ/10 αλλάζει τη συχνότητα συντονισμού του laser κατά 85 MHz, πράγμα που είναι υπεραρκετό για το σύστημα F.M.

Ένας άλλος λόγος που κάνει την ιδέα της οπτικής επικοινωνίας ελκυστική είναι η μεγάλη δυνατότητά της σε μεταφερόμενη ποσότητα πληροφορίας. Το ποσό πληροφορίας που μπορεί να σταλεί με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ανάλογο του εύρους ζώνης του φέροντος κύματος. Έτσι, πηγαίνοντας από τη μικροκυματική περιοχή στην οπτική περιοχή, η συχνότητα του φέροντος αυξάνει κατά ένα παράγοντα 10 δημιουργώντας προϋποθέσεις πολύ μεγάλου εύρους ζώνης. Η χρήση laser στις επικοινωνίες χωρίς μέσο διάδοσης την οπτική ίνα έχει εφαρμογές στις δορυφορικές επικοινωνίες, καθώς και επικοινωνίες μικρών αποστάσεων, μεταξύ σταθμών που έχουν μεταξύ τους οπτική επαφή.

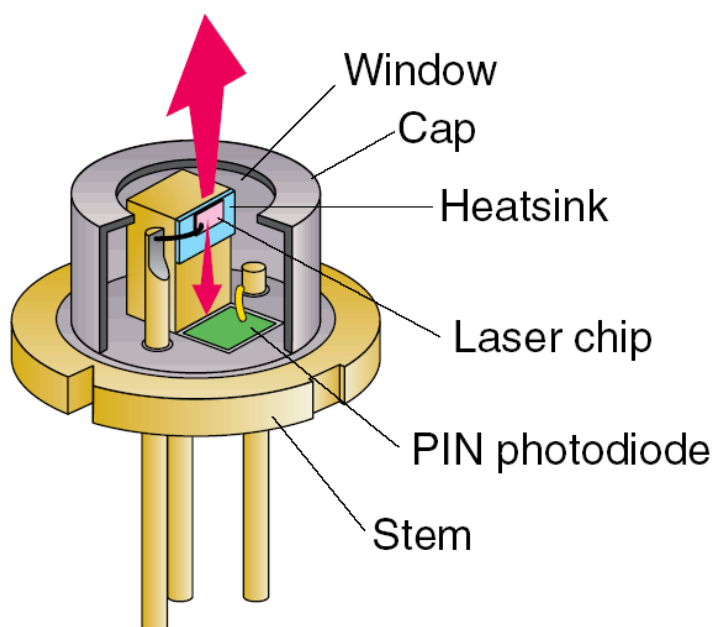
Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα σήμα οποιασδήποτε μορφής π.χ. ομιλία, σήμα video κλπ, πάνω σε μία δέσμη laser. Η τοποθέτηση αυτή του σήματος πάνω στην οπτική συχνότητα λέγεται διαμόρφωση οπτικών συχνοτήτων. Υπάρχουν τρεις τρόποι επέμβασης στα χαρακτηριστικά της φωτεινής δέσμης. Η άμεση διαμόρφωση, η έμμεση εξωτερική και η έμμεση εσωτερική διαμόρφωση.

1.2 Το ημιαγωγικό laser

Η πιο συμπαγής ακτινοβολία laser είναι αυτή των laser ημιαγωγών που αποτελείται συνήθως από μια σύνδεση μεταξύ των στρωμάτων των ημιαγωγών με τις διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες τους. Το αρσενίδιο γαλλίου είναι ο πιο κοινός ημιαγωγός χρησιμοποιούμενος για αυτά. Τα laser ημιαγωγών αντλούνται από την άμεση εφαρμογή του ηλεκτρικού ρεύματος πέρα από τη σύνδεση, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν laser συνεχών κυμάτων (Continuous Wave) με μεγαλύτερη από 50% αποδοτικότητα. Μια μέθοδος που επιτρέπει ακόμη αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας έχει επινοηθεί και περιλαμβάνει μικροσκοπικά laser κάθετα σε κυκλώματα, σε μια πυκνότητα περισσότερο από ενός εκατομμυρίου ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο. Τα laser ημιαγωγών χρησιμοποιούνται κυρίως σε CD players καθώς και σε εκτυπωτές laser. Επειδή αυτά τα laser εκπέμπουν φως με μικρά μήκη κύματος μπορούν να επιτρέψουν σε ένα CD να χωρέσουν περισσότερες πληροφορίες και να κάνουν τους εκτυπωτές laser να τυπώνουν πιο καθαρά. Επίσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να κάνουν τον οικιακό φωτισμό να <<εξοικονομεί>> ενέργεια.

1.2.1 Η ανατομία ενός ημιαγωγικού laser

Μια πρόχειρη σχηματική αναπαράσταση ενός ημιαγωγικού laser που συναντάμε σε ένα laser pointer ή ένα CD player παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Το σχήμα δεν βρίσκεται υπό κλίμακα. Το ολικό μέγεθος της συσκευής είναι περίπου 5 με 10 mm ενώ το πραγματικό μέγεθος του laser chip είναι μικρότερο από 1 mm σε μήκος.



Σχήμα 1.2 : Η ανατομία ενός διοδικού laser

Η κύρια ακτίνα καθώς αναδύεται από το διοδικό laser έχει σφηνοειδές σχήμα με μεγάλη απόκλιση της τάξης 10 με 30 μοιρών. Απαιτούνται εξωτερικοί φακοί αν θέλουμε

να προσεγγίσουμε μια ευθύγραμμη ακτίνα. Ένας απλός σφαιρικός με μικρό εστιακό μήκος κυρτός φακός θα λειτουργήσει εύλογα στο νετάρισμα της ακτίνας.

Η ακτίνα που εκπέμπεται από την πίσω άκρη του laser chip προσπίπτει πάνω στην ενσωματωμένη φωτοδίοδο η οποία συνήθως χρησιμεύει για οπτικό βρόγχο ανατροφοδότησης, ρυθμίζοντας έτσι το ρεύμα της διόδου laser και κατά συνέπεια την οπτική ισχύ εκπομπής. Σ' αυτό το σημείο σημειώνω πως η φωτοδίοδος βρίσκεται υπό γωνία ούτως ώστε η ανάκλαση της δέσμης να μην παρεμποδίζει την λειτουργία της διόδου laser.

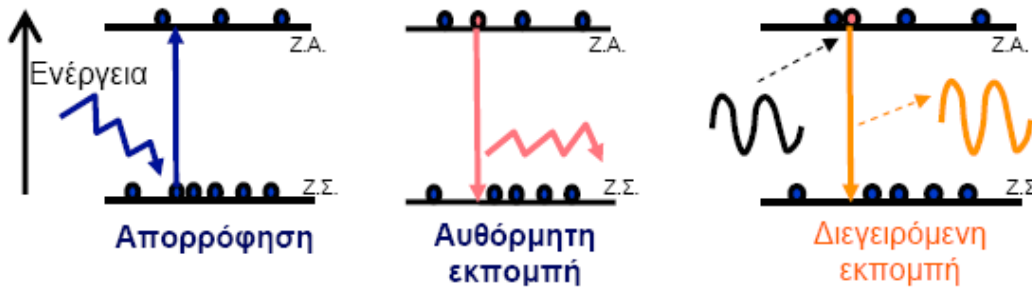
1.2.2 Οπτικές διεργασίες στα ημιαγωγικά laser

Η εκπομπή φωτονίων στα ημιαγωγικά λέιζερ οφείλεται στη επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών μέσα στην ενεργό περιοχή. Ακτινοβολούσα επανασύνδεση συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας επανασυνδέεται με μία κενή θέση (οπή) της ζώνης σθένους και η ενέργεια εκπέμπεται με τη μορφή φωτονίου. Οι οπτικές διαδικασίες που σχετίζονται με την ακτινοβολούσα επανασύνδεση στους ημιαγωγούς είναι: (α) απορρόφηση, (β) αυθόρμητη εκπομπή και (γ) διεγερόμενη εκπομπή. Κατά την απορρόφηση, ένα φωτόνιο προσπίπτει στο ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους και αν έχει την απαιτούμενη ενέργεια κάνει το ηλεκτρόνιο να μεταβεί στην ζώνη αγωγιμότητας, ενώ το ίδιο το φωτόνιο χάνεται. Οι αντίθετες μεταβάσεις, από την ζώνη αγωγιμότητας στην ζώνη σθένους, συνδέονται με την παραγωγή φωτονίου. Η αυθόρμητη εκπομπή δεν απαιτεί κάποια διέγερση για να συμβεί, αλλά το φως που προκύπτει είναι ασύμφωνο και δεν έχει συσχέτιση τόσο στην φάση όσο και στην πόλωση με την υπόλοιπη φωτεινή ακτινοβολία στην κοιλότητα. Αντίθετα, διεγερόμενη εκπομπή συμβαίνει όταν ένα φωτόνιο που προέρχεται από τη διέγερση πέφτει σε ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας, το διεγείρει και αυτό μεταπίπτει στη ζώνη σθένους εκπέμποντας ένα νέο φωτόνιο που έχει την ίδια ενέργεια και ορμή με το προσπίπτον φωτόνιο. Αυτή η διαδικασία αποτελεί την αρχή της λειτουργίας των laser και περιγράφηκε από τον Einstein το 1917. Οι ηλεκτρονικές μεταβάσεις ανάμεσα στη ζώνη σθένους και αγωγιμότητας στα ημιαγωγικά λέιζερ είναι όμοιες με τις ατομικές ή μοριακές μεταβάσεις που συμβαίνουν στα λέιζερ αερίου. Η μόνη διαφορά είναι πως στα ημιαγωγικά λέιζερ οι οπτικές μεταβάσεις γίνονται ανάμεσα σε συνεχείς ζώνες καταστάσεων. Η ακριβής περιγραφή της δομής των ενεργειακών ζωνών απαιτεί σύνθετες αριθμητικές μεθόδους. Η πιο συχνή προσέγγιση που χρησιμοποιείται στους ημιαγωγούς αμέσου χάσματος είναι το παραβολικό μοντέλο βάση του οποίου η ενέργεια με την κυματοσυνάρτηση σχετίζονται με την εξίσωση :

$$E_c = \frac{\hbar^2 \psi^2}{2m_c} \quad \text{και} \quad E_v = \frac{\hbar^2 \psi^2}{2m_v}$$

όπου m_c και m_v είναι οι ενεργές μάζες των ηλεκτρονίων και των οπών, \hbar είναι η σταθερά του Planck και ψ είναι το πλάτος της κυματοσυνάρτησης Ψ . Σε ένα ημιαγωγό αμέσου χάσματος το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας και το μέγιστο της ζώνης σθένους συμβαίνουν στο ίδιο Ψ . Αφού η ορμή του φωτονίου είναι πολύ μικρότερη από την ορμή

των φορέων $h \psi$, ακτινοβολούσες μεταπτώσεις συμβαίνουν ανάμεσα σε ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές του ίδιου κυματοδιανύσματος.



Σχήμα 1.3 : Οπτικές διαδικασίες

Η βασική δομή ενός κλασικού ημιαγωγικού laser διπλής ετεροδομής αποτελείται από ένα υλικό αμέσου χάσματος που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα των οποίων τα ενεργειακά χάσματα είναι μεγαλύτερα και οι δείκτες διάθλασης μικρότεροι. Η διαδικασία επανασύνδεσης ηλεκτρονίων-οπών αποτελεί την οπτική απολαβή ενώ οι διαχωριστικές επιφάνειες την οπτική ανάδραση. Όταν το ρεύμα έγχυσης αυξάνεται όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια πηγαίνουν στην υψηλής ενέργειας ζώνη αγωγιμότητας, μέχρι που κάποια στιγμή οι πιθανότητες για απορρόφηση και διεγειρόμενη εκπομπή γίνονται ίσες. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως διαφάνεια (transparency). Αν το ρεύμα αυξηθεί ακόμα περισσότερο επιτυγχάνεται αναστροφή πληθυσμού (population inversion) και η δομή παρέχει οπτική απολαβή για μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο ενεργειακό χάσμα. Για κάποια τιμή του ρεύματος η απολαβή γίνεται αρκετά μεγάλη ώστε να αντισταθμίσει τις οπτικές απώλειες και η δομή λειτουργεί ως ένας οπτικός ταλαντωτής. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα κατωφλίου. Το λέιζερ, στην πιο απλή του δομή, αποτελείται από δύο καθρέφτες όπου ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένα μέσο ενίσχυσης του φωτός. Οι δύο καθρέφτες αντανακλούν μερικώς το φως (~99%) το οποίο ταλαντώνεται πολλές φορές μέσα στην περιοχή ενίσχυσης. Αν η απολαβή είναι αρκετή ώστε να αντισταθμίσει τις οπτικές απώλειες, τότε το λέιζερ θα εκπέμψει σύμφωνο φως δια μέσω των καθρεφτών. Αυτή η τιμή της απολαβής κατά την οποία αρχίζει η εκπομπή ονομάζεται κέρδος κατωφλίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΩΝ LASER

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά μιας διόδου laser

Πριν ξεκινήσουμε την αναζήτηση και την αγορά μια διόδου laser αλλά και πριν προχωρήσουμε στην κατασκευή μιας διάταξης οδήγησης αυτής, θα πρέπει να γνωρίζουμε κάποια χαρακτηριστικά που την διέπουν.

2.1.1 Όροι περιγραφής μέγιστων απόλυτων τιμών

Case Temperature (T_c) : Είναι η θερμοκρασία της συσκευής μετρώντας την στην μεταλλική βάση της.

Operating Temperature (T_{opr}) : Το εύρος των τιμών θερμοκρασίας στο οποίο η συσκευή λειτουργεί με ασφάλεια.

Optical Power Output (P_o) : Η μέγιστη επιτρεπόμενη οπτική ισχύς για συνεχόμενο κύμα (CW) ή και παλμικό. Μέχρις εδώ δεν υπάρχει συσχετισμός της οπτικής ισχύος με το ρεύμα διέλευσης της διόδου.

Σημαντική σημείωση : Η οπτική ισχύς που καθορίζει ο κάθε κατασκευαστής στα φύλλα δεδομένων του δεν λαμβάνει υπ' όψιν του τις τυχόν απώλειες μεταξύ της διόδου και του οργάνου μέτρησης της οπτικής ισχύος, λόγω φακών νεταρίσματος, σκεδάσεων φωτός και απώλειες οργάνου.

Reverse Voltage (V_R) : Είναι η μέγιστη επιτρεπτή τάση όταν ανάστροφο ρεύμα περνά από την δίοδο laser ή την φωτοδίοδο. Για laser με ενσωματωμένη φωτοδίοδο η ανάστροφη τάση ορίζεται ως $V_{R(LD)}$ για την δίοδο laser και $V_{R(PD)}$ για την φωτοδίοδο.

Storage Temperature (T_{stg}) : Το επιτρεπτό εύρος της θερμοκρασίας της συσκευασίας, όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

2.1.2 Όροι περιγραφής ηλεκτρο-οπτικών τιμών

Fall Time : Χρόνος Καθόδου. Ο απαιτούμενος χρόνος πτώσης του εκπεμπόμενου φωτός από το 90% στο 10% της μέγιστης ισχύος.

Mode Hopping : Καθώς η θερμοκρασία της συσκευασίας της διόδου laser ανεβαίνει, αυξάνεται και το μήκος κύματος εκπομπής. Παρ' όλα αυτά το μήκος κύματος δεν αυξάνεται γραμμικά αλλά κάνει διακριτά “πηδηματάκια” σε υψηλότερες στάθμες μήκους κύματος καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται “mode hopping” ή “mode jumps”.

Monitor Current (Im) : Είναι το ρεύμα ελέγχου που διέρχεται την φωτοδίοδο για μία συγκεκριμένη ανάστροφη τάση στα άκρα της, όταν η laser δίοδος εκπέμπει την τυπική της οπτική ισχύ. Σημείωση : Τα φύλλα δεδομένων των κατασκευαστών μπορεί να δίνουν τιμές , με τη laser δίοδο να λειτουργεί σε χαμηλότερη οπτική ισχύ εξόδου από την μέγιστη απόλυτη τιμή που αναφέρουν. Για παράδειγμα το περιβάλλον δοκιμής μπορεί να είναι 20mW ενώ η μέγιστη απόλυτη τιμή οπτικής εκπομπής να είναι 30mW.

Operating Current (Iop) : Η ποσότητα του ορθού ρεύματος διέλευσης που χρειάζεται το διοδικό laser για να παράγει μια συγκεκριμένη τυπική οπτική ισχύ εξόδου σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία λειτουργίας.

Operating Voltage (Vop) : Η ορθή τάση στα άκρα του διοδικού laser όταν αυτό εκπέμπει μία τυπική οπτική ισχύ σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Photodiode Dark Current (ID(PD)) : Το ανάστροφο ρεύμα που διέρχεται την φωτοδίοδο όταν η δίοδος laser δεν εκπέμπει.

Positional Accuracy (Δx Δy Δz) : Ακρίβεια Σημείου Εκπομπής. Αυτοί οι χαρακτηρισμοί προσδιορίζουν την ακρίβεια σημείου εκπομπής της δίοδου laser συναρτήσει της συσκευασίας της. Τα Δx και Δy μετρούνται από το επίπεδο εκτόπισμα του τσιπ, στους φυσικούς άξονες της συσκευής. Το Δz μετριέται κάθετα στην επιφάνεια εξόδου. Οι προδιαγραφές μπορεί να αναφέρουν το γωνιακό σφάλμα εκφρασμένο σε μοίρες και το γραμμικό σφάλμα σε μικρά.

Rise Time : Ο χρόνος που απαιτείται για να βρεθεί η οπτική ισχύς εξόδου από το 10% στο 90% της μέγιστης τιμής της

Slope Efficiency (SE) or (η) : Απόδοση κλίσης ή διαφορική απόδοση. Είναι ο μέσος όρος αύξησης της μεταβολής της οπτικής ισχύος συναρτήσει της αύξησης του ορθού ρεύματος όταν η συσκευή λειτουργεί στην περιοχή της καμπύλης οπτικής ισχύος/ρεύματος του κατασκευαστή.

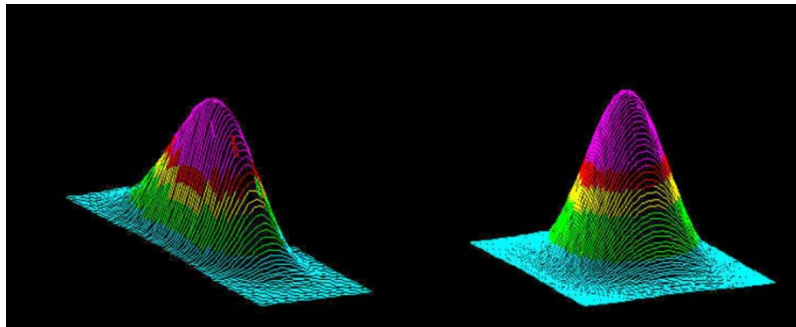
Threshold Current (Ith) : Ρεύμα Κατωφλίου. Το σύνορο μεταξύ αυθόρμητης εκπομπής και εξαναγκασμένης εκπομπής το οποίο εμφανίζεται στο διάγραμμα οπτικής ισχύος εξόδου vs ορθού ρεύματος. Κάτω από το σημείο του ρεύματος κατωφλίου η οπτική έξοδος είναι παρόμοια με την ασυνάρτητη εκπομπή ενός LED. Πάνω από το ρεύμα κατωφλίου η συσκευή ξεκινά να εκπέμπει την ακτινοβολία laser. Από την στιγμή που το ρεύμα ξεπεράσει το κατώφλι επιτυγχάνεται εξαναγκασμένη εκπομπή και η οπτική ισχύς αυξάνεται ραγδαία σε σχέση μια μικρή αύξηση του ορθού ρεύματος.

Wavelength (λp) : Είναι το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτός.

2.1.3 Όροι περιγραφής οπτικών χαρακτηριστικών

Aspect Ratio (AR) : Λόγος Διαστάσεων. Η σχέση μεταξύ των αποκλίνουσων γωνιών, θ_{\perp} (κάθετος) και $\theta_{//}$ (παράλληλος) της διόδου laser. Μια δίοδος με 27° κάθετη απόκλιση και 9° παράλληλη απόκλιση εκπέμπει μια ελλειπτική ακτίνα με aspect ratio 3:1.

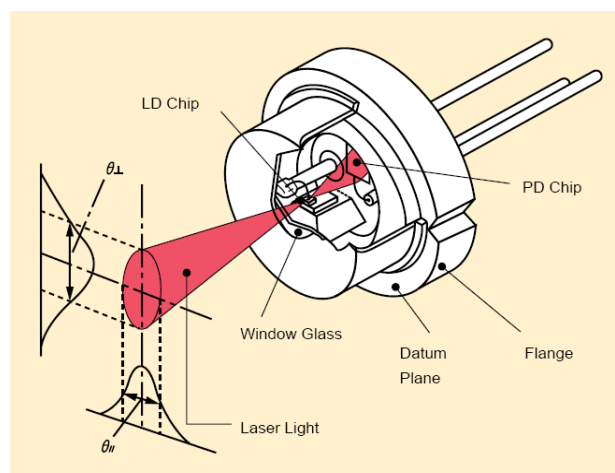
Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται δύο 3D εικόνες στις οποίες φαίνεται η διαφορά μεταξύ μιας σχεδόν κυκλικής ακτίνας και μιας τυπικής ελλειπτικής.



Σχήμα 2.1 : Μια ελλειπτική ακτίνα με aspect ratio $\sim 3.5:1$ αριστερά, και μια εστιασμένη ακτίνα με aspect ratio $\sim 1.3:1$ δεξιά.

Astigmatism (As) or (ΔA_s) : Αστιγματισμός. Η ακτίνα laser εμφανίζεται να έχει διαφορετικά σημεία πηγής για την διεύθυνση παράλληλου και κάθετου στο επίπεδο σύνδεσης. Η αστιγματική απόσταση ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στα δύο φαινομενικά σημεία. Μια laser δίοδος με μεγάλο ποσό αστιγματισμού θα πρέπει να διαθέτει αστιγματική διόρθωση (ή μείωση) αν η οπτική έξοδος θα πρέπει να είναι “νεταρισμένη”, αλλιώς η κατάληξη της ακτίνας θα είναι αστιγματική.

Beam Divergence (θ_{\perp}) and ($\theta_{//}$) : Απόκλιση Ακτίνας. Επίσης συναντάται και ως “γωνίες ακτινοβολίας”. Η απόκλιση ακτίνας μετριέται ως η πλήρη γωνία στο σημείο ημιμέγιστης έντασης, γνωστό και ως FWHM (Full Width Half Maximum). Οι γωνιακές προδιαγραφές για τον παράλληλο και τον κάθετο άξονα παρέχονται από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 2.2 : Οι αποκλίσεις ακτίνας θ_{\perp} και $\theta_{//}$.

Coupling Efficiency : Απόδοση Σύνδεσης. Η ακτίνα της διόδου laser αποκλίνει όπως ορίζουν οι προδιαγραφές απόκλισης ακτίνας. Συνδέοντας την ευρέως αποκλίνουσα δέσμη των διόδων laser με φακούς εστίασης ή άλλες συσκευές όπως οπτικές ίνες, το αποτέλεσμα είναι η μεταφορά οπτικής ισχύος κάτω από 100%. Έτσι Απόδοση Σύνδεσης ορίζεται το ποσοστό της ολικής οπτικής ισχύος που εξέρχεται από την laser δίοδο, το οποίο εισέρχεται στην εξωτερική συσκευή (φακοί, οπτική ίνα) αποτελεσματικά.

Far Field Pattern (FFP) : Μοντέλο Μακρινού Πεδίου. Είναι το προφίλ της εντάσεως της ακτίνας όταν αυτή μετρείται σε απόσταση από την μπροστινή άποψη του τσιπ της διόδου laser.

Multimode Diodes : Πολύτροπική Δίοδος. Οι laser διόδοι χωρίζονται σε μονοτροπικές και πολυτροπικές ανάλογα την διαμήκη εκπομπή τους. Για μια πολυτροπική δίοδο το φάσμα εκπομπής της αποτελείται από αρκετές μεμονωμένες φασματικές γραμμές με μία κυρίαρχη γραμμή (αυτή με την μέγιστη ένταση) να απαντά στο ονομαστικό μήκος κύματος της συσκευής. Οι πολυτροπικές διόδοι laser προτιμώνται περισσότερο καθώς τα προβλήματα με mode hops είναι μειωμένα. Συνεπώς οι πολυτροπικές διόδοι έχουν γενικά καλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο.

Near Field Pattern (NFP) : Μοντέλο Κοντινού Πεδίου. Είναι το προφίλ της εντάσεως της ακτίνας όταν αυτή μετρείται στην επιφάνεια του τσιπ της διόδου laser.

Numerical Aperture (NA) : Αριθμητικό Άνοιγμα. Το Αριθμητικό Άνοιγμα περιγράφει την ιδιότητα των φακών να συλλέγουν το φως από μια πηγή τοποθετημένη στο επίκεντρό τους. Η μέγιστη επιτρεπτή γωνία θ , μετρείται από τον κεντρικό άξονα του κώνου του φωτός, προς το εξωτερικό της επιφανείας του κώνου.

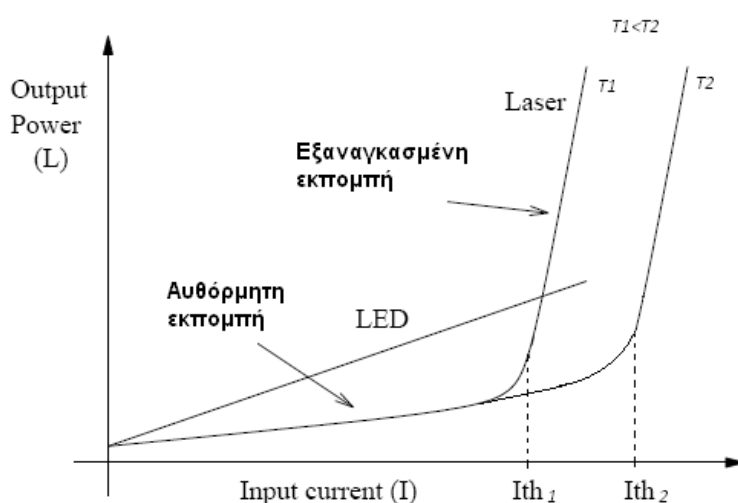
Polarization Ratio : Λόγος Πόλωσης. Η έξοδος από ένα μονής κοιλότητας ημιαγωγικό laser είναι γραμμικά πολωμένη παράλληλα με την laser ένωση. Αυθόρμητη εκπομπή με μια τυχαία πόλωση και/ή με μια πόλωση κάθετη στην laser επαφή είναι επίσης παρόν. Ο Λόγος Πόλωσης ορίζεται ως η παράλληλη συνιστώσα διαιρεμένη με την κάθετη συνιστώσα. Για μια δίοδο που λειτουργεί κοντά στην μέγιστη ισχύ ο λόγος είναι τυπικά μεγαλύτερος από 100:1. Όταν λειτουργεί κοντά στο σημείο κατωφλίου, ο λόγος θα είναι αρκετά χαμηλότερος καθώς η αυθόρμητη εκπομπή γίνεται πιο σημαντική.

Single-mode Diodes : Μονοτροπική Δίοδος. Οι laser διόδοι χωρίζονται σε μονοτροπικές και πολυτροπικές ανάλογα την διαμήκη εκπομπή τους. Για μια μονοτροπική laser δίοδο το φάσμα εκπομπής της αποτελείται από μία ενιαία φασματική γραμμή που απαντά στο ονομαστικό μήκος κύματος της συσκευής. Σε επίπεδα εξόδου κοντά στο κατώφλι μπορεί να εμφανιστούν πολλαπλές φασματικές γραμμές στο φάσμα εκπομπής, ωστόσο αυτές μειώνονται όταν αυξηθεί η οπτική ισχύς.

2.2 Απαιτήσεις οδήγησης ενός διοδικού laser

Παρατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά και κατανοώντας τις φυσικές ιδιότητες των διοδικών laser, μας βοηθά να τις χειριστούμε σωστά και με ασφάλεια.

Όσον αφορά την οδήγηση των διοδικών laser, ξεδιαλώνεται ένα μεγάλο μέρος του μυστηρίου γύρω από την οδήγησή τους αν τηρήσουμε λίγους απλούς κανόνες βασισμένους στις ιδιότητές τους. Κάτω από το ρεύμα κατωφλίου η δίοδος laser εκπέμπει ακτινοβολία LED με αυθόρμητη εκπομπή. Από το ρεύμα κατωφλίου και πάνω ξεκινά να παράγει ακτινοβολία laser και η οπτική ισχύς εξόδου αυξάνεται απότομα με την αύξηση του ρεύματος λειτουργίας της δίοδου. Ο συσχετισμός μεταξύ οπτικής ισχύος εξόδου και ρεύματος δίοδου είναι γραμμικός μέχρι την μέγιστη ισχύ και αποκαλείται διαφορική απόδοση.



Σχήμα 2.3 : Το διάγραμμα ενός LED και μια δίοδου laser. Η οπτική ισχύς εξόδου του laser εξαρτάται από το ρεύμα διέλευσης, το σημείο του ρεύματος κατωφλίου και την θερμοκρασία T .

Ένας κρίσιμος παράγοντας που συχνά αγνοείται στον χειρισμό των δίοδων laser είναι η επιρροή της θερμοκρασίας στην σχέση μεταξύ της οπτικής ισχύος και του ρεύματος λειτουργίας. Το ρεύμα κατωφλίου αυξάνεται με τη θερμοκρασία ενώ η οπτική ισχύς εξόδου και η διαφορική απόδοση μειώνεται. Κατά συνέπεια το κύκλωμα οδήγησης θα πρέπει να έχει χαρακτηριστικά ασφαλείας ούτως ώστε μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας να μην καταστρέψει το laser.

Οποιοδήποτε κύκλωμα οδήγησης για δίοδους laser θα πρέπει να περιλαμβάνει όσο το δυνατόν καλά φιλτραρισμένη τροφοδοσία, φραγμούς για επαγωγικά φορτία και άλλες πηγές παρεμβολής. Η τροφοδοσία με μπαταρίες παρακάμπτει το πρόβλημα αλλά δεν αποτελεί επιλογή για βιομηχανικές εφαρμογές. Κρατώντας σε κοντινή απόσταση τις συνδέσεις μεταξύ της laser δίοδου και του κυκλώματος οδήγησης βοηθά γενικά στην μείωση των παρεμβολών.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης προσφέρουν μια ποικιλία λειτουργιών και μέτρων ασφαλείας και απαιτούν λίγα επιπλέον εξαρτήματα. Συνήθως μια απλή μεταβλητή αντίσταση ορίζει το ρεύμα λειτουργίας. Είναι σημαντικό οι δίοδοι laser να έχουν σταθεροποιημένη οδήγηση, με λειτουργία είτε αυτόματου έλεγχου ρεύματος είτε

αυτόματου έλεγχου ισχύος. Το τροφοδοτικό εργαστηρίου δεν είναι κατάλληλο για απ' ευθείας οδήγηση.

Το μήκος κύματος των διοδικών laser εξαρτάται από την θερμοκρασία. Για μια τυπική GaAlAs δίοδο ο λόγος είναι $0,25\text{nm}/\text{C}^\circ$ και η μεταβολή γίνεται βαθμοτά με ξαφνικές μεταβολές. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται mode hopping.

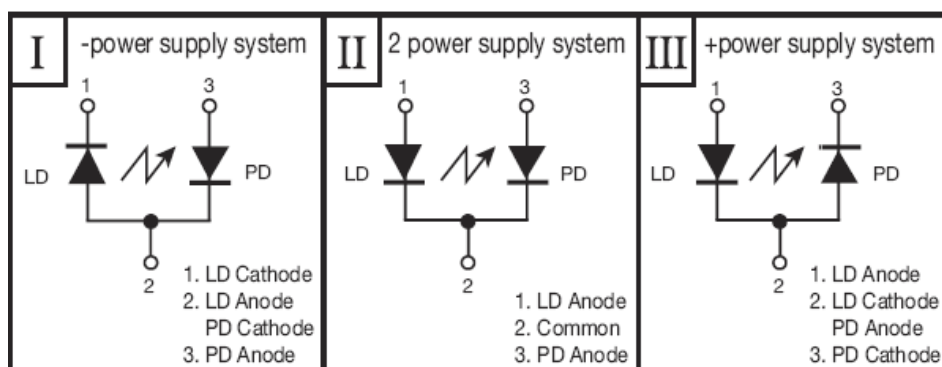
Στη λειτουργία αυτόματου ελέγχου ρεύματος, ο ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας της δίοδου laser αποφέρει την καλύτερη σταθερότητα της οπτικής ισχύς εξόδου. Εξ αιτίας όμως της θερμικής εξάρτησης της δίοδου, η θερμοκρασία πρέπει να σταθεροποιηθεί για να διατηρηθεί σταθερή οπτική έξοδος και να μην ξεπεραστούν οι κρίσιμες τιμές.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές όπως φραγμοί φωτός, αισθητήρες μέτρησης απόστασης, όπου το περιβάλλον θερμοκρασίας ποικίλει, τα συστήματα αυτόματου ελέγχου ισχύος προσφέρουν απλότητα στην λειτουργία. Συμβατικά αυτόματου ελέγχου ισχύος κυκλώματα οδήγησης, περιλαμβάνουν επίσης διατάξεις ομαλής εκκίνησης (soft start), φίλτρα αιχμών, υπερτάσεων και άλλων μεταβάσεων.

Ο σταθεροποιητής ισχύος εγγυάται σταθερή έξοδο. Όταν η θερμοκρασία παραμένει ασταθεροποίητη, μπορεί να επέλθει μετατόπιση στάθμεων μήκους κύματος. Ακόμα και σε εφαρμογές που το φαινόμενο mode hopping δεν αποτελεί πρόβλημα, θα πρέπει να υπάρχει σημαντική θερμική σπατάλη, γιατί χωρίς αυτή, με την αύξηση της θερμοκρασίας στην δίοδο laser συνεπάγεται και μείωση της αποδοτικότητάς της. Το σταθεροποιημένο κύκλωμα αντισταθμίζει ένα διαρκώς αυξανόμενο ρεύμα δίοδου laser στην προσπάθεια να κρατήσει σταθερή οπτική έξοδο. Χωρίς περιοριστή ρεύματος ή διακοπή ασφαλείας, η laser δίοδος μπορεί να πάθει ζημιά ή και να καταστραφεί.

Ο αυτόματος έλεγχος ισχύος χρησιμοποιεί μια φωτοδίοδο ενσωματωμένη στην συσκευασία της laser δίοδου για ανάδραση. Τα laser με ενσωματωμένες φωτοδιόδους είναι διαθέσιμα σε τρεις σχηματισμούς, όλοι με τον κοινό ακροδέκτη συνδεδεμένο στην μεταλλική συσκευασία του laser, ο οποίος είναι συνήθως συνδεδεμένος στη γείωση. Η έξοδος από μια ενσωματωμένη φωτοδίοδο ελέγχου δεν είναι κατάλληλη για βαθμονόμηση. Για μια δοθείσα ισχύς εξόδου, το ρεύμα της φωτοδίοδου ελέγχου μπορεί να ποικίλει για ένα παράγοντα του 10 από laser σε laser.

Πρέπει να δοθεί σημασία στην σύνθεση των laser δίοδων όταν πρόκειται να διαλέξουμε κύκλωμα οδήγησης, διότι κάθε τύπος χρειάζεται διαφορετικές αρχές οδήγησης.



Σχήμα 2.4 : Οι τρεις συνδυασμοί laser-φωτοδίοδου στα διοδικά laser.

Ο τύπος I απαιτεί κύκλωμα οδήγησης εξόδου αρνητικής τροφοδοσίας τάσης και αρνητικής αναφοράς είσοδο ρεύματος φωτοδιόδου. Ο τύπος II απαιτεί διπολική τροφοδοσία με κύκλωμα οδήγησης θετικής αναφοράς και ρεύμα φωτοδιόδου αρνητικής αναφοράς. Ο τύπος III απαιτεί κύκλωμα οδήγησης εξόδου θετικής τροφοδοσίας με την είσοδο της φωτοδιόδου συνδεδεμένη στο θετικό δυναμικό. Κάθε μια από τις τρεις παραλλαγές χρειάζεται το δικό της βελτιστοποιημένο κύκλωμα οδήγησης. Μερικές συσκευές οδήγησης περιλαμβάνουν συνδέσεις για δύο ή και για τις τρεις παραλλαγές. Παρ' όλα αυτά, ο μόνος περιορισμός ότι ο κοινός ακροδέκτης πρέπει να συνδέεται στη γείωση δεν εφαρμόζεται πάντα όπως αναφέρεται στην παραπάνω επεξήγηση.

2.3 Μέθοδοι μέτρησης των χαρακτηριστικών ενός ημιαγωγικού laser

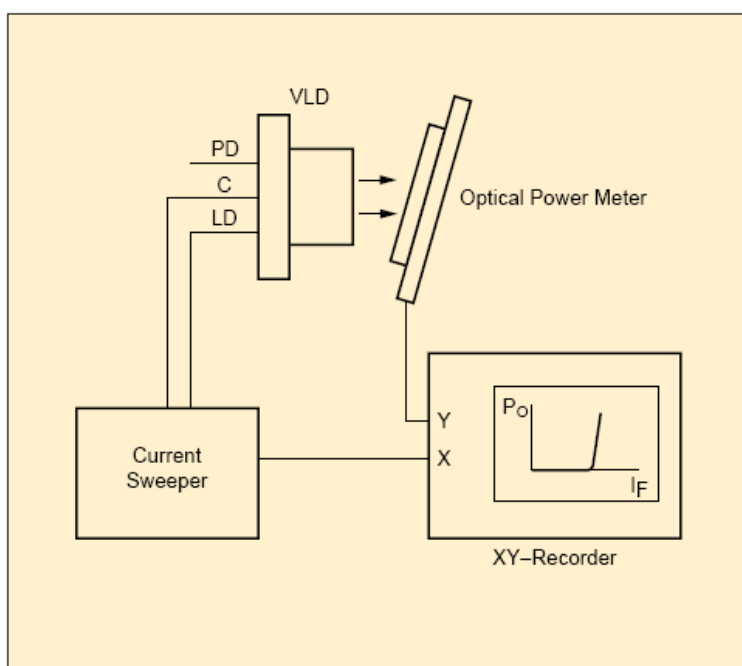
Πριν προχωρήσει κάποιος στην υλοποίηση μιας συσκευής οδήγησης ενός ημιαγωγικού laser, θα πρέπει να είναι σε θέση να εξάγει τα βασικά χαρακτηριστικά του. Καθώς η παρακολούθησή τους παίζει βασικό παράγοντα στην ασφάλεια και την σωστή λειτουργία του laser, και στην επίδοση της όλης διάταξης οδήγησης.

2.3.1 I-P Γράφημα

Εξοπλισμός :

Οπτικός μετρητής ισχύος (με αναλογική έξοδο)
Σαρωτής ρεύματος
XY – Καταγραφέας
Θερμικός ελεγκτής

Η καμπύλη I-P είναι ένα γράφημα του ορθού ρεύματος διέλευσης της διόδου laser, συναρτήσεως της οπτικής ισχύος εξόδου. Υποδεικνύει το ρεύμα κατωφλίου και το ρεύμα λειτουργίας της VLD (Visible Laser Diode). Η καμπύλη I-P εξάγεται τροφοδοτώντας με ρεύμα το διόδικο laser και μετρώντας το αποτέλεσμα της οπτικής ισχύος εξόδου. Με την βοήθεια ενός θερμικού ελεγκτή μπορούμε να παρατηρήσουμε την εξάρτηση της καμπύλης από την θερμοκρασία και με αυτό το δεδομένο να παρατηρήσουμε την εξάρτηση του ρεύματος κατωφλίου από την θερμοκρασία θήκης του laser.



Σχήμα 2.5 : Διάταξη εξαγωγής καμπύλης I-P

Σημείωση : Τον οπτικό μετρητή ισχύος τον τοποθετούμε μπροστά από το laser υπό γωνία για να μην έχουμε επιστροφή ανακλώμενης δέσμης στο laser και την φωτοδίοδο, με αποτέλεσμα απόκλιση στις μετρήσεις μας λόγω παρεμβολής.

2.3.2 Ρεύμα φωτοδίοδου συναρτήσει οπτικής ισχύος εξόδου

Εξοπλισμός :

Οπτικός μετρητής ισχύος (με αναλογική έξοδο)

Σαρωτής ρεύματος

Πηγή τάσης πόλωσης

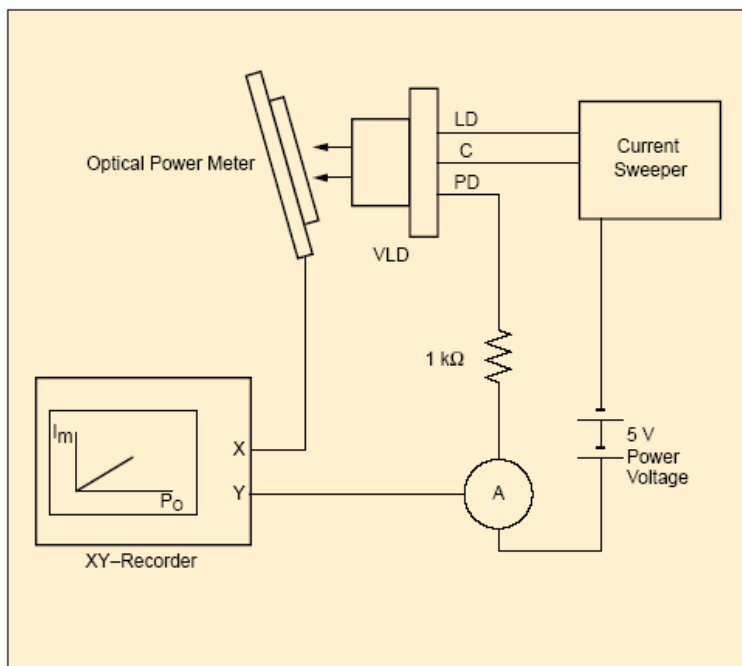
1KΩ αντίσταση

Αμπερόμετρο (με αναλογική έξοδο)

XY – Καταγραφέας

Το ρεύμα φωτοδίοδου (ή και ρεύμα ελέγχου) είναι αποτέλεσμα του φωτός που προσπίπτει στην εσωτερική φωτοδίοδο από την πίσω όψη του διοδικού laser. Με την φωτοδίοδο ανάστροφα πολωμένη από μια εξωτερική πηγή πόλωσης, το ρεύμα φωτοδίοδου

μετρείται χρησιμοποιώντας ένα αμπερόμετρο και έναν XY- καταγραφέα του ρεύματος συναρτήσει της οπτικής ισχύος εξόδου που δημιουργείται.



Σχήμα 2.6 : Διάταξη εξαγωγής καμπύλης Ισχύος-Φωτορεύματος

2.3.3 Ρεύμα διέλευσης συναρτήσει της τάσης στα άκρα του laser

Εξοπλισμός :

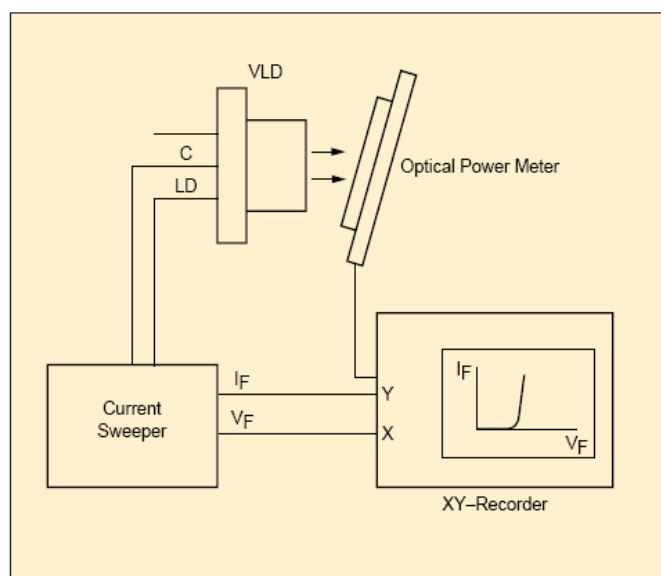
Οπτικός μετρητής ισχύος

Σαρωτής ρεύματος

XY – Καταγραφέας

Θερμικός ελεγκτής

Η πτώση τάσης στα άκρα της δίοδου laser μετρείται μεταξύ του κοινού ακροδέκτη (Common) και του ακροδέκτη LD, καθώς το ρεύμα διέρχεται για να φέρει την δίοδο laser στην ονομαστική της ισχύ. Χρησιμοποιώντας έναν θερμικό ελεγκτή, η θερμοκρασία μπορεί να μεταβληθεί και να καταγράψουμε μεταβολή στην τιμή της πτώσης τάσης.



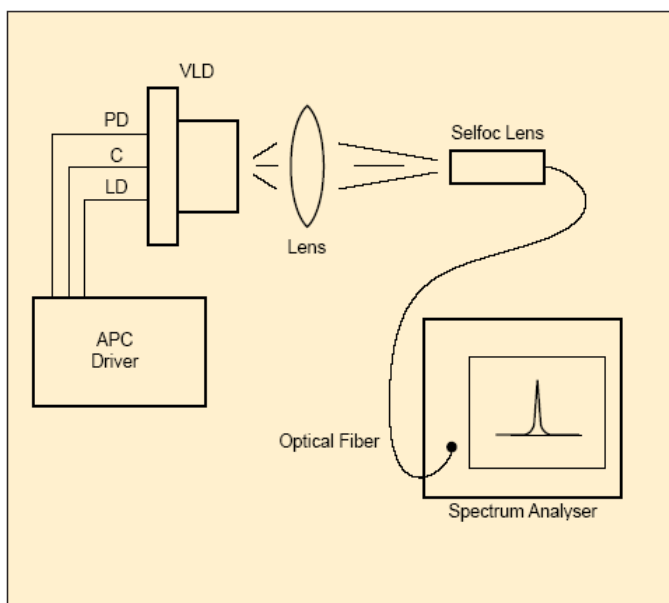
Σχήμα 2.7 : Διάταξη εξαγωγής καμπύλης τάσης και ρεύματος πόλωσης

2.3.4 Φάσμα ακτινοβολίας laser

Εξοπλισμός :

APC κύκλωμα οδήγησης
Φακοί εστίασης
Οπτική ίνα
Αναλυτής φάσματος

Με την δίοδο laser να λειτουργεί σε κατάσταση Αυτομάτου Ελέγχου Ισχύος (APC), η εκπεμπόμενη ακτίνα εστιάζεται στην είσοδο μιας οπτικής ίνας. Στην συνέχεια το φάσμα αυτού του φωτός μπορεί να παρατηρηθεί μέσω ενός αναλυτή φάσματος.



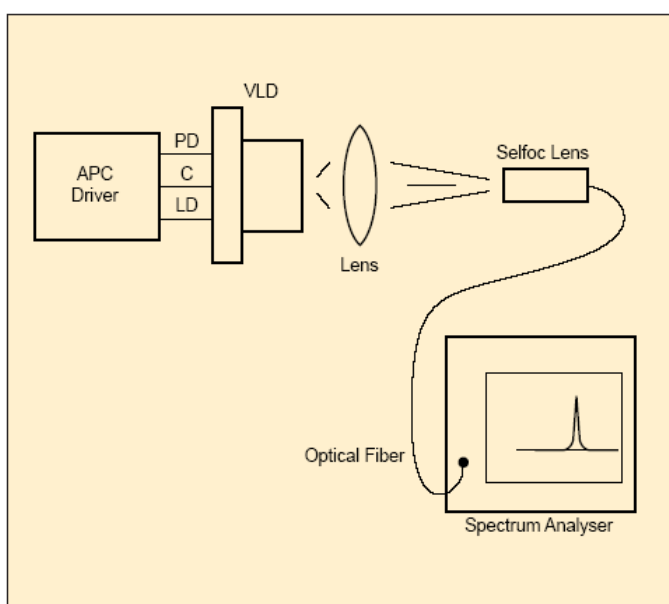
Σχήμα 2.8 : Μέτρηση του φάσματος ακτινοβολίας

2.3.5 Θερμοκρασία θήκης συναρτήσει του μήκους κύματος εκπομπής

Εξοπλισμός :

APC κύκλωμα οδήγησης
Φακοί εστίασης
Οπτική ίνα
Αναλυτής φάσματος
Θερμικός ελεγκτής

Το διοδικό laser θα πρέπει να οδηγείται από κύκλωμα APC. Η εκπεμπόμενη ακτίνα εστιάζεται στην είσοδο μιας οπτικής ίνας και το φάσμα της εξόδου παρατηρείται από έναν αναλυτή φάσματος. Κατά την διάρκεια παρατήρησης του φάσματος η θερμοκρασία της θήκης θα πρέπει να μεταβάλλεται από έναν θερμικό ελεγκτή. Καθώς η θερμοκρασία του laser αυξάνεται, το μήκος κύματος θα μεταβάλλεται κλιμακωτά, γνωστό και ως φαινόμενο mode hopping.



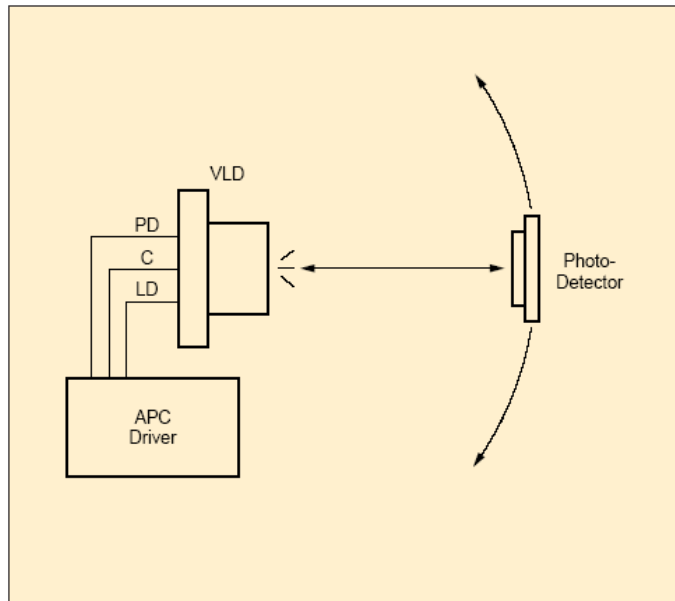
Σχήμα 2.9 : Μέτρηση μεταβολών του μήκους κύματος λόγω θερμοκρασίας

2.3.6 Ίχνος μακρινού πεδίου

Εξοπλισμός :

APC κύκλωμα οδήγησης
Φωτοδίοδος (σε
περιστρεφόμενους άξονες)

Καθώς το laser εκπέμπει σε κατάσταση APC, η φωτοδίοδος ανίχνευσης μετακινείται διαγράφοντας τοξοειδή τροχιά, παράλληλα και κάθετα στην εκπεμπόμενη δέσμη. Η ένταση της οπτικής εξόδου καταγράφεται σε κάθε γωνία.



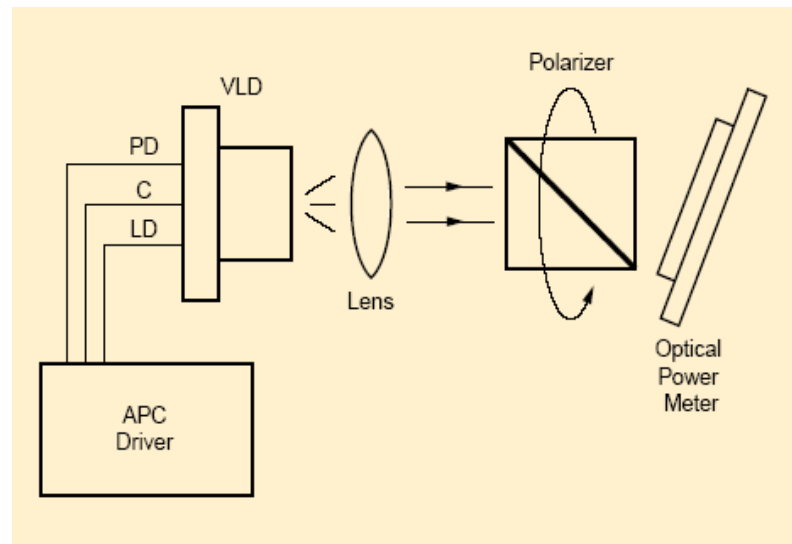
Σχήμα 2.10 : Μέτρηση FFP (Far Field Pattern)

2.3.7 Λόγος πόλωσης συναρτήσει της οπτικής ισχύος εξόδου

Εξοπλισμός :

APC κύκλωμα οδήγησης
Φακός εστίασης
Gram-Thompson πρίσμα
Οπτικός μετρητής ισχύος

Ο λόγος πόλωσης ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος σε Εγκάρσια Ηλεκτρική (TE) και Μαγνητική (TM) κατάσταση. Καθώς οι δύο καταστάσεις είναι κάθετες μεταξύ τους, μπορούν να διαχωριστούν μέσω ενός πρίσματος Gram-



Σχήμα 2.11 : Μέτρηση του λόγου πόλωσης

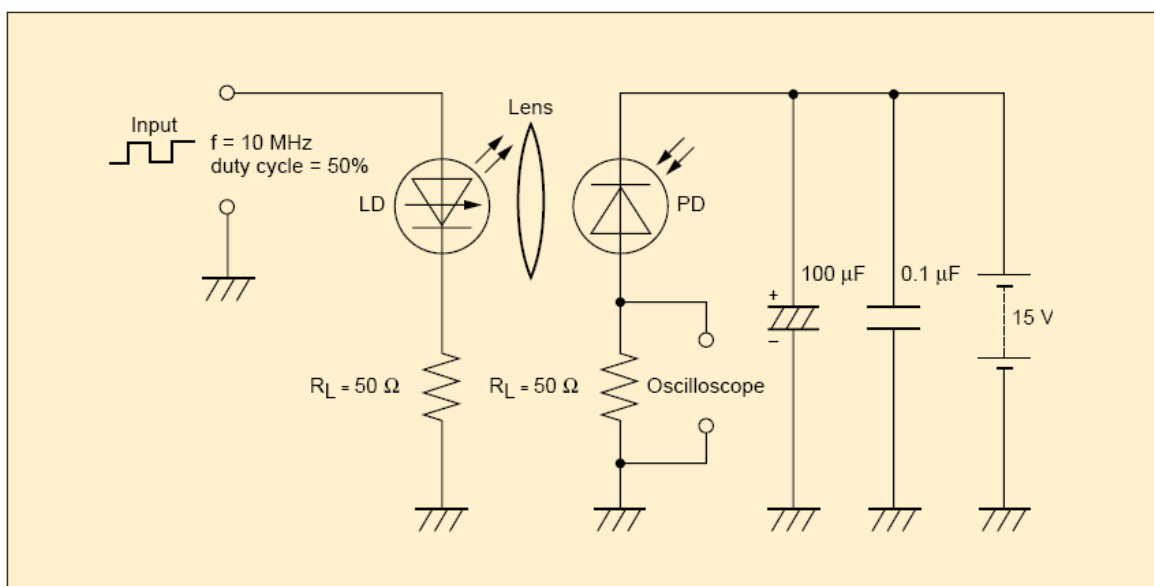
Thompson και οι αντίστοιχες μπορούν να καταγραφούν, υπολογίζοντας έτσι τον λόγο. Η τιμή του λόγου πόλωσης εξαρτάται από το αριθμητικό άνοιγμα των φακών εστίασης.

2.3.8 Χρόνοι ανόδου-καθόδου

Για την μέτρηση των χρόνων ανόδου και καθόδου, η διόδος laser εκπέμπει σε παλμική λειτουργία μέσω μιας γεννήτριας παλμών στη συχνότητα των 10 MHz και κύκλο εργασίας 50%.

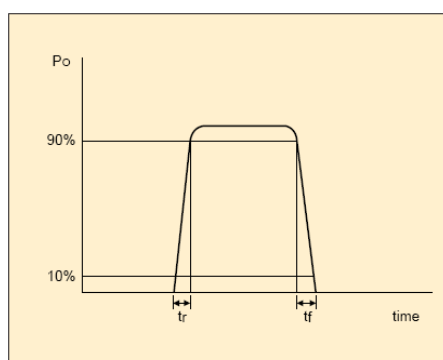
Η οπτική έξοδος της διόδου laser εστιάζεται σε έναν φωτοανιχνευτή υψηλής συχνοτικής απόκρισης.

Η έξοδος του φωτοανιχνευτή παρατηρείται μέσω παλμογράφου.



Σχήμα 2.12 : Διάταξη παρατήρησης χρόνων ανόδου-καθόδου

Χρησιμοποιώντας τον παλμογράφο, μετράμε το χρόνο που χρειάζεται για να μεταβεί η οπτική έξοδος της διόδου laser από το 10% στο 90% και από το 90% στο 10% της μέγιστης οπτικής ισχύς.



Σχήμα 2.13 : Παρατήρηση του κύκλου εργασίας

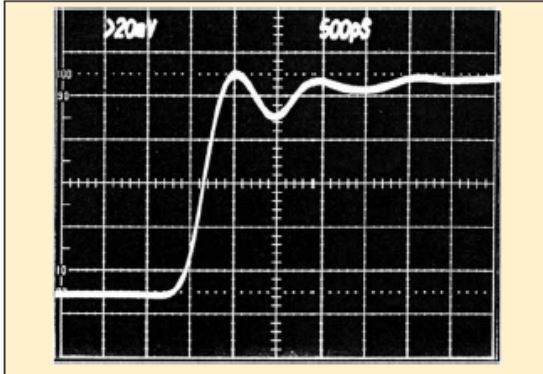
Εάν η DC συνιστώσα (pre-bias) είναι μικρότερη από το ρεύμα κατωφλίου ή αν δεν χρησιμοποιείται DC συνιστώσα, τότε εμφανίζεται μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών οδήγησης και των εκπεμπόμενων παλμών.

Αυτός ο χρόνος καθυστέρησης μπορεί να παρατηρηθεί μέσω ενός αισθητηρίου ρεύματος στο ορθό ρεύμα πόλωσης της διόδου laser.

Στο Σχήμα 2.14 εμφανίζονται δύο εργοστασιακές μετρήσεις με DC συνιστώσα και χωρίς, πάνω σε δύο διοδικά laser της Toshiba. Επίσης στο Σχήμα 2.15 σημειώνονται κάποιες τυπικές τιμές χρόνων ανόδου και καθόδου.

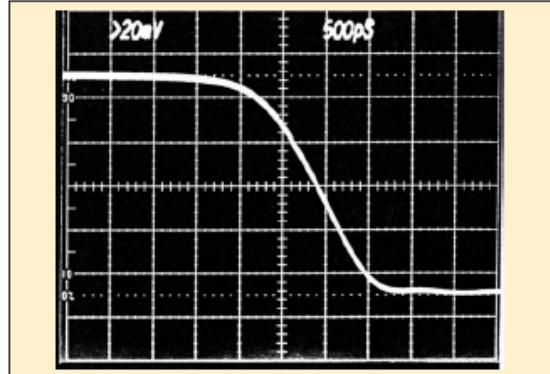
Sample Data: TOLD9451MB/MC

P_o = 5 mW, with no pre-bias



t_r = 0.3 ns

Fig. 21

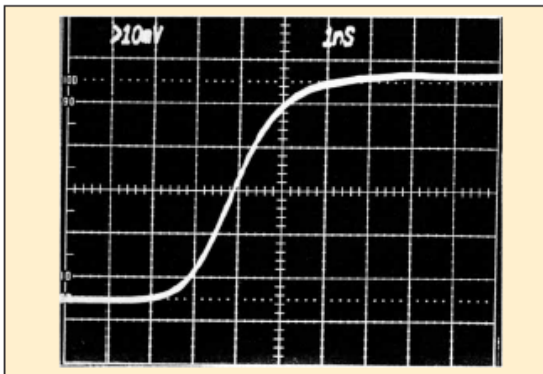


t_f = 1.2 ns

Fig. 22

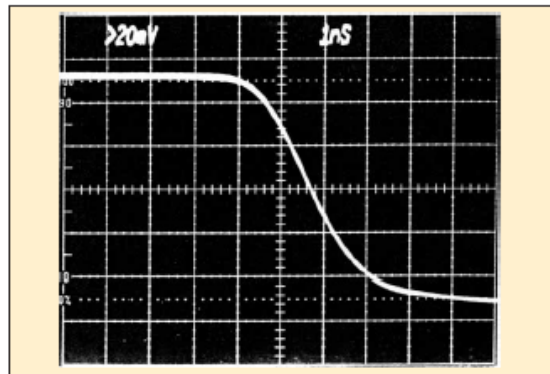
Sample Data: TOLD9451MB/MC

P_o = 5 mW, with pre-bias 0.5 mW



t_r = 2 ns

Fig. 23



t_f = 2.4 ns

Σχήμα 2.14 : Χρόνοι ανόδου-καθόδου με DC συνιστώσα (κάτω) και χωρίς (πάνω)

Typical value:

Type	Test Power P _o (mW)	Test Conditions	Rise Time t _r (ns)	Fall Time t _f (ns)
TOLD9231M	5	f = 10 MHz duty cycle = 50% t _r = 2 ns t _f = 2 ns	0.5	1.5
TOLD9221M	5		0.5	1.5
TOLD9225M	10		0.5	1.5
TOLD9441MC/MD	5		0.5	1.5
TOLD9442M/MC	5		0.5	1.5
TOLD9443MC/MD	10		0.5	1.5
TOLD9445M/MC	10		0.5	1.5
TOLD9451MB/MC	30		0.5	1.5

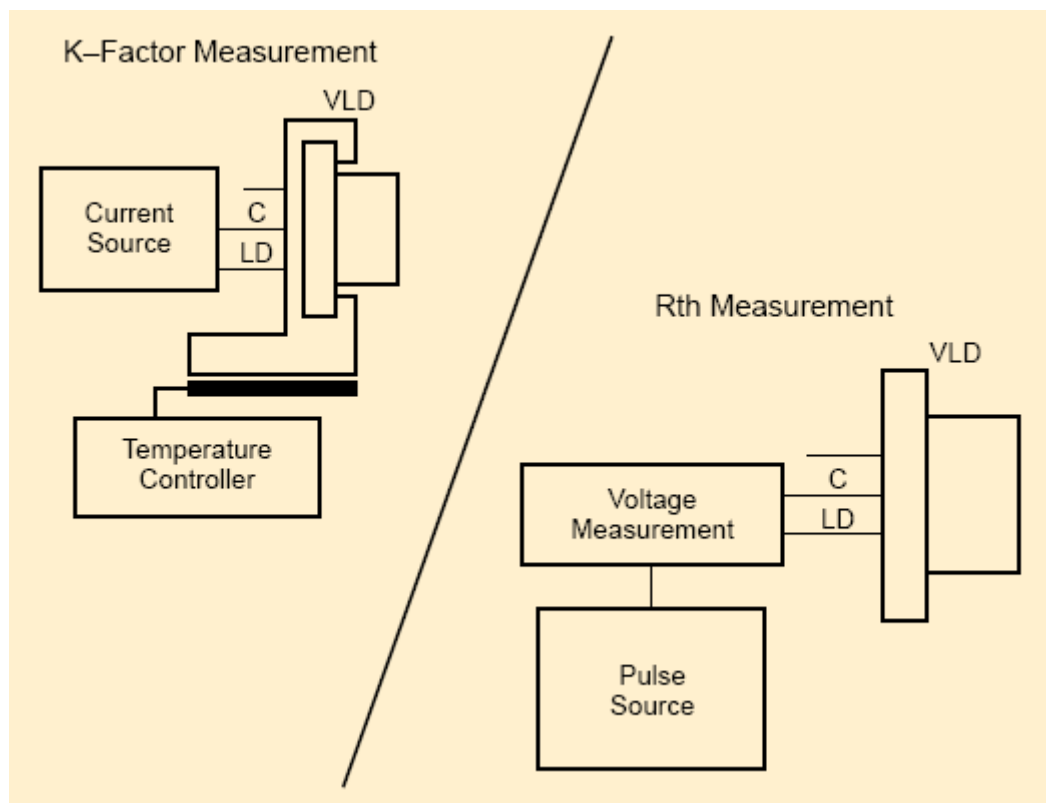
* Data measured with no pre-bias

Table 2

Σχήμα 2.15 : Χρόνοι ανόδου-καθόδου για ορισμένα χαμηλής ισχύος διοδικά laser της Toshiba

Σημείωση : Είναι σημαντικό ο παλμογράφος και ο φωτοανιχνευτής να έχουν μεγάλη συχνοτική απόκριση, επίσης το σύστημα του πειράματος να έχει σχεδιαστεί ώστε να αποτρέπει την οδήγηση εκτός ορίων της διόδου laser (συνιστάται η χρήση μικροκυματικών γραμμών)

2.3.9 Θερμική αντίσταση (R_{th})



Σχήμα 2.16 : Μέτρηση της θερμικής αντίστασης R_{th} και εύρεση του K-Factor

Ορισμός : $R_{th} = \frac{\Delta mV \frac{1}{K}}{V_F I_F}$

R_{th} : Θερμική αντίσταση (C°/W)

ΔmV : Η διαφορά μεταξύ V_{f1} και V_{f2}

K : Σταθερά (κλίση μεταξύ $V_F - T_C$)

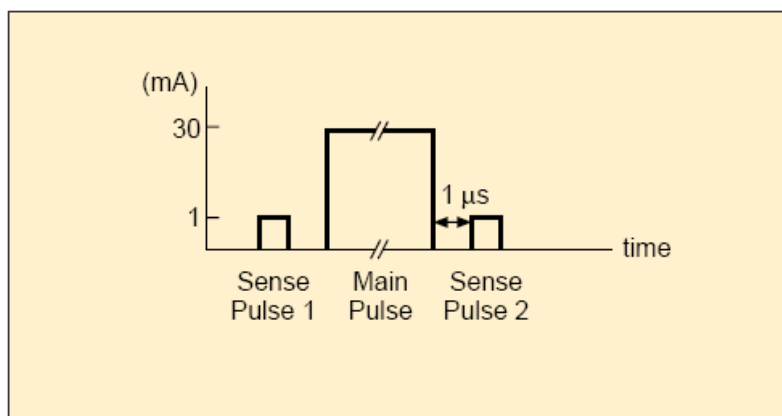
I_F : Ορθό ρεύμα κατά την διάρκεια του κύριου παλμού

V_F : Ορθή τάση (μέση) κατά την διάρκεια του κύριου παλμού

Η σταθερά K , που συσχετίζει αλλαγές στην V_F όταν μεταβάλλεται η T_C , πρέπει να αξιολογηθεί πρώτα. Χρησιμοποιώντας ρεύμα διέλευσης 1mA μετράμε την πτώση τάσης στα άκρα της διόδου laser. Μέσω ενός θερμικού ελεγκτή, μετριέται ο λόγος μεταβολής της τάσης V_F σε σχέση με την θερμοκρασία T_C (κλίση K).

Στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε την δοκιμή αποσυνδέοντας τον θερμικό ελεγκτή. Στέλνουμε ένα ασθενή παλμό ορθού ρεύματος 1mA και μετράμε την τάση V_{f1} . Στη

συνέχεια εφαρμόζουμε τον κυρίως παλμό έντασης 30mA στην διάρκεια του οποίου μετράμε την τάση V_F . Μετά τον κυρίως παλμό ακολουθεί ακόμα ένας ασθενής εντάσεως 1mA στην διάρκεια του οποίου καταγράφουμε την τάση V_{f2} .

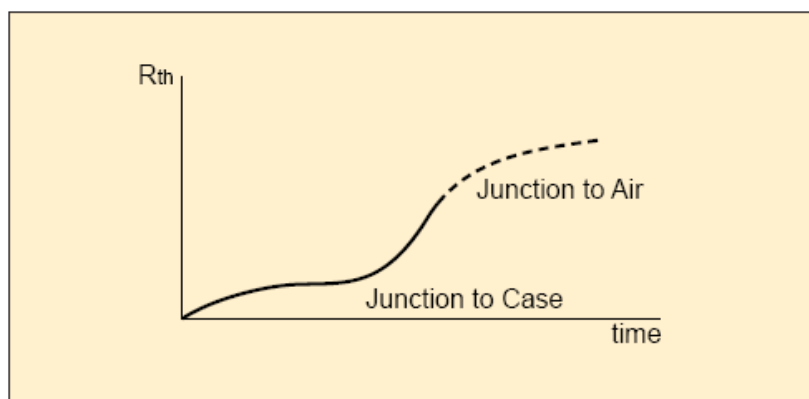


Σχήμα 2.17 : Η ακολουθία παλμών ρεύματος για την μέτρηση των V_{f1} , V_F και V_{f2} .

Η αύξηση της θερμοκρασίας του laser που ήρθε σαν αποτέλεσμα της εφαρμογής του κυρίως παλμού μπορεί να υπολογισθεί παίρνοντας την διαφορά των τάσεων κατά την διάρκεια των ασθενών παλμών $\Delta mV (V_{f1} - V_{f2})$ και διαιρώντας με την σταθερά K .

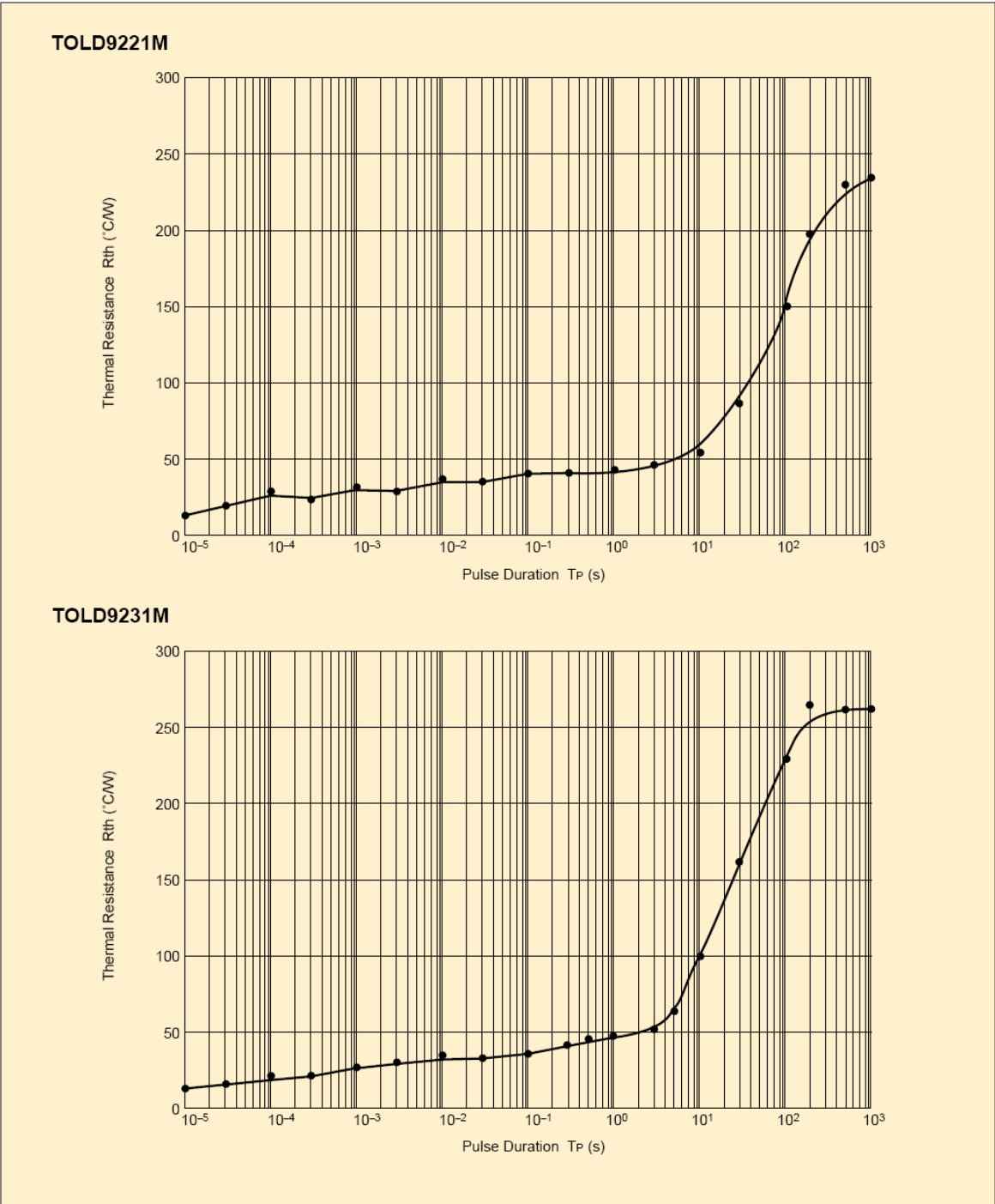
Η Θερμική Αντίσταση στη συνέχεια ορίζεται ως η μεταβολή θερμοκρασίας προς την ισχύ εισόδου ($V_F * I_F$).

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται με κύριους παλμούς διάφορης χρονικής διάρκειας (10 ms, 20 ms, 50 ms,...)



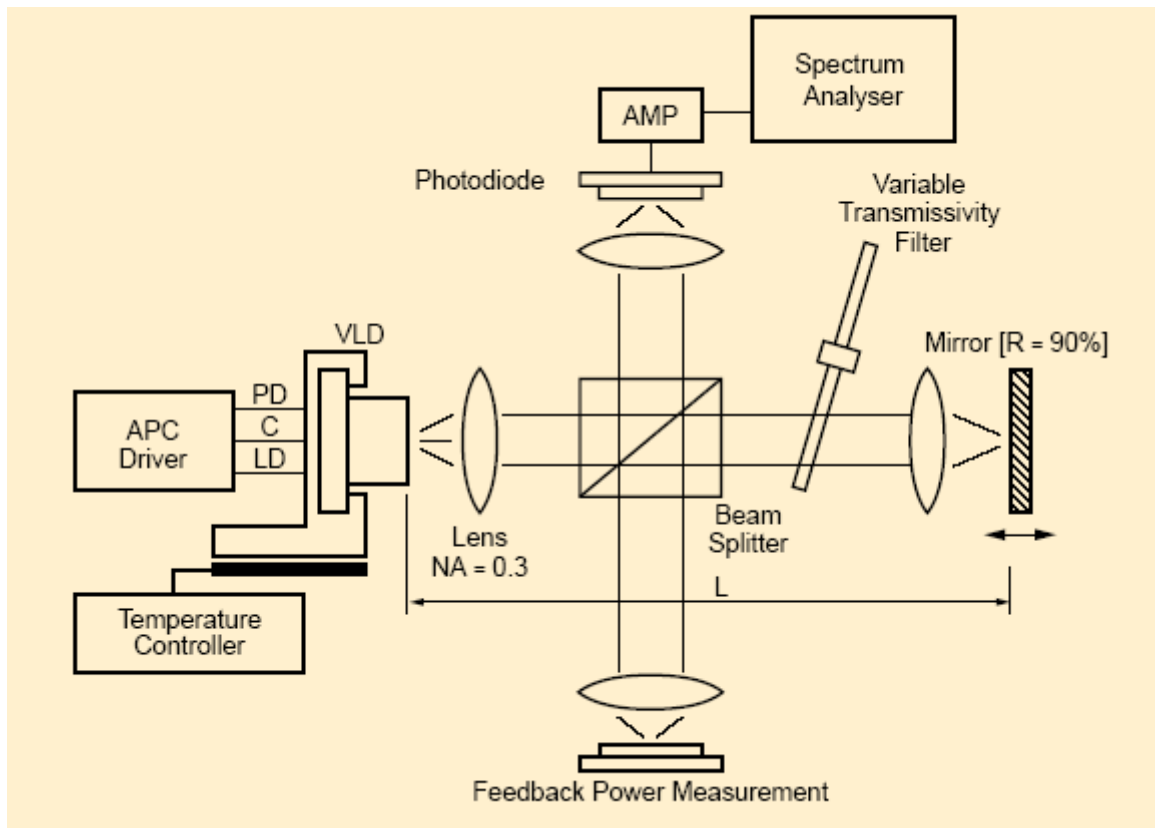
Σχήμα 2.18 : Η θερμική αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση του εύρους του παλμού

Στο Σχήμα 2.19 επισυνάπτω εργοστασιακές μετρήσεις μεταβολής της θερμικής αντίστασης συναρτήσεως της χρονικής διάρκειας του παλμού για δύο τυπικά διοδικά laser της Toshiba.



Σχήμα 2.19 : Η θερμική αντίσταση συναρτήσει του εύρους παλμού

2.3.10 Θόρυβος σχετικής έντασης RIN



Σχήμα 2.20 : Διάταξη εξαγωγής θορύβου σχετικής έντασης RIN

Ορισμός :
$$RIN = \frac{(P_{AC})^2}{(P_{DC})^2} \cdot \frac{1}{BW}$$

RIN : Θόρυβος σχετικής έντασης (Hz^{-1})

P_{AC} : AC μετρούμενη ισχύς

P_{DC} : DC μετρούμενη ισχύς

BW : Μετρούμενο εύρος ζώνης

Συνθήκες πειράματος :

P_0 (APC) : 5 mW

NA : 0.3

L : 50 mm

f : 1 MHz

BW : 10 kHz

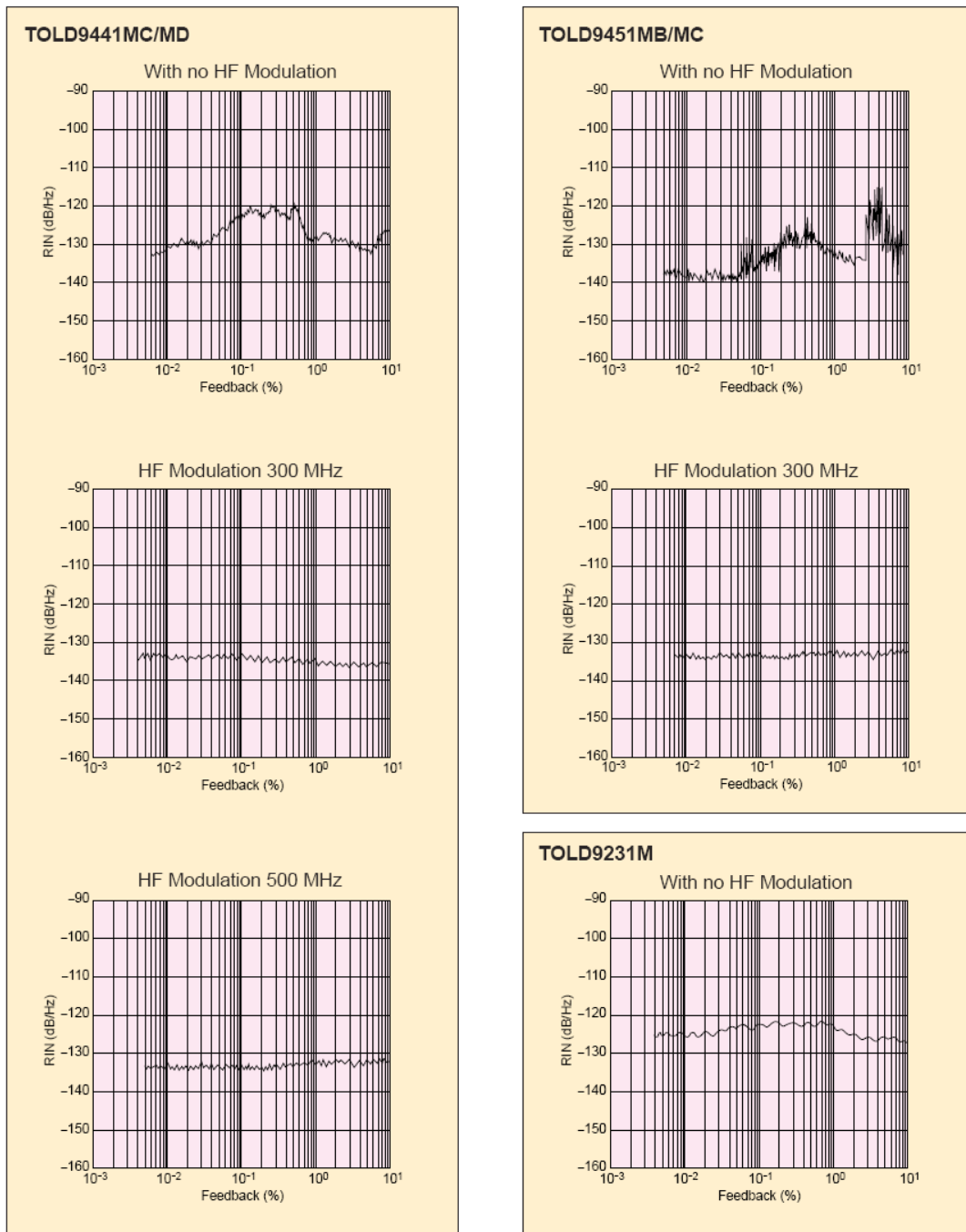
Feedback : 0.001 to 10%

Καθώς η δίοδος laser εκπέμπει οδηγούμενη από ένα APC κύκλωμα, η δέσμη εκπομπής διαχωρίζεται μέσω ενός διαχωριστή δέσμης (beam splitter). Ένα μέρος της δέσμης κατευθύνεται ευθεία σε ένα δονούμενο καθρέπτη επικάλυψης 90% και ανακλάται πίσω προς το laser. Στην επιστροφή το φως διαχωρίζεται πάλι από τον διαχωριστή δέσμης για να επιτραπεί η μέτρηση του ποσού της δέσμης που ανατροφοδοτείται. Το ποσοστό της

δέσμης που ανατροφοδοτείται μπορεί να ρυθμιστεί από το φίλτρο μεταβλητής μετάδοσης (variable transmissivity filter).

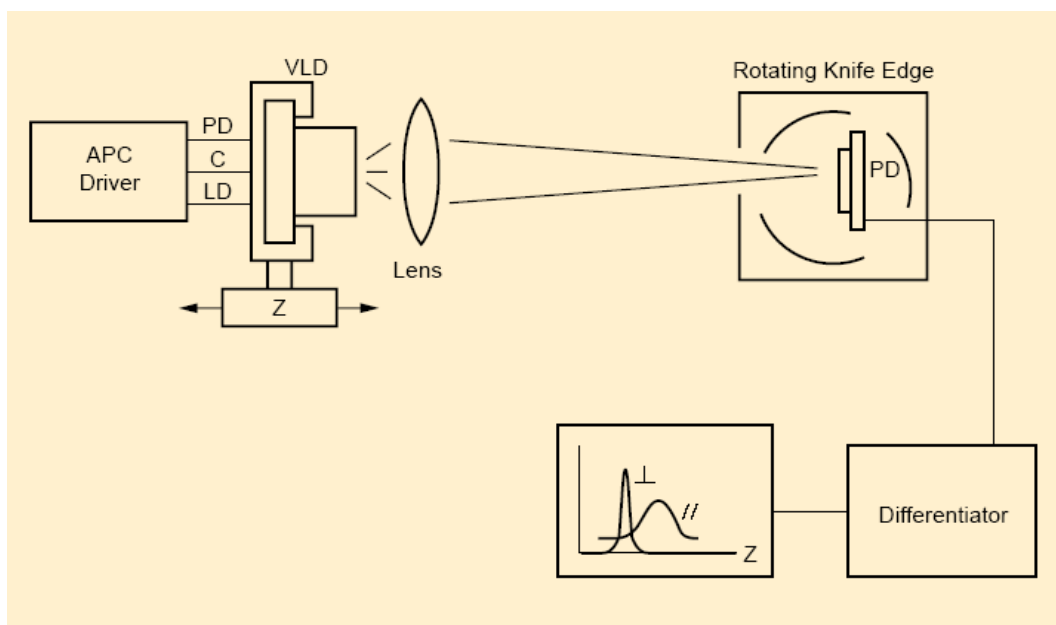
Καθώς ποικίλλει το ποσοστό της ανάδρασης, ο θόρυβος σήματος μετριέται από τον αναλυτή φάσματος και τα ελάχιστα και μέγιστα επίπεδα θορύβου καταγράφονται. Εναλλακτικά μεταβάλλοντας την θερμοκρασία λειτουργίας της διόδου laser μπορεί να μετρηθεί ο θόρυβος του φαινομένου mode-hopping.

Στο Σχήμα 2.21 εμφανίζονται χαρακτηριστικές θορύβου σχετικής έντασης συναρτήσει του ποσοστού ανάδρασης της ανακλώμενης δέσμης.



Σχήμα 2.21 : Ο θόρυβος σχετικής έντασης για διάφορα διαδικα laser της Toshiba

2.3.11 Αστιγματισμός (As)

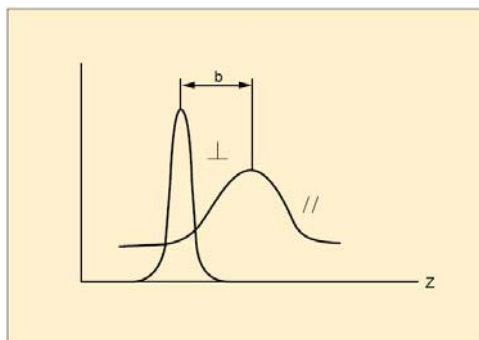


Σχήμα 2.22 : Διάταξη μέτρησης Αστιγματισμού

Ορισμός:
$$A_S = - \frac{b}{M^2 + \frac{M \cdot b}{f}}$$

- A_S : Αστιγματισμός
- M : Μεγέθυνση
- f : Μήκος εστίασης
- b : Διαφορά μεταξύ εστιακών σημείων

Οδηγώντας το διοδικό laser με διάταξη APC εστιάζουμε την εκπεμπόμενη δέσμη πάνω σε μια φωτοδίοδο. Το φως διακόπτεται από την αιχμή μιας περιστρεφόμενης λεπίδας μπροστά από την φωτοδίοδο. Καθώς η θέση της δίοδου μεταβάλλεται (z-διεύθυνση) το μέγεθος της κουκκίδας που πέφτει στην φωτοδίοδο αλλάζει. Διαφοροποιώντας την έξοδο της φωτοδίοδου, μπορεί να μετρηθεί η κλίση της μετάβασης από το ελάχιστο φως που εισέρχεται στην φωτοδίοδο (η λεπίδα μπλοκάρει την δέσμη εξ ολοκλήρου) στο μέγιστο (η λεπίδα δεν παρεμποδίζει την δέσμη). Το σημείο που η κλίση βρίσκεται στο μέγιστο εκπροσωπεί το μικρότερο μέγεθος κουκκίδας φωτός και είναι το εστιακό σημείο του φωτός.



Σχήμα 2.23 : Η απόσταση μεταξύ κορυφών παραλλήλου και κάθετου

Αλλάζοντας την κατεύθυνση περιστροφής της λεπίδας κάθετα και παράλληλα στην διεύθυνση της δέσμης, μπορούν να μετρηθούν τα πραγματικά κάθετα και παράλληλα εστιακά σημεία της ακτίνας.

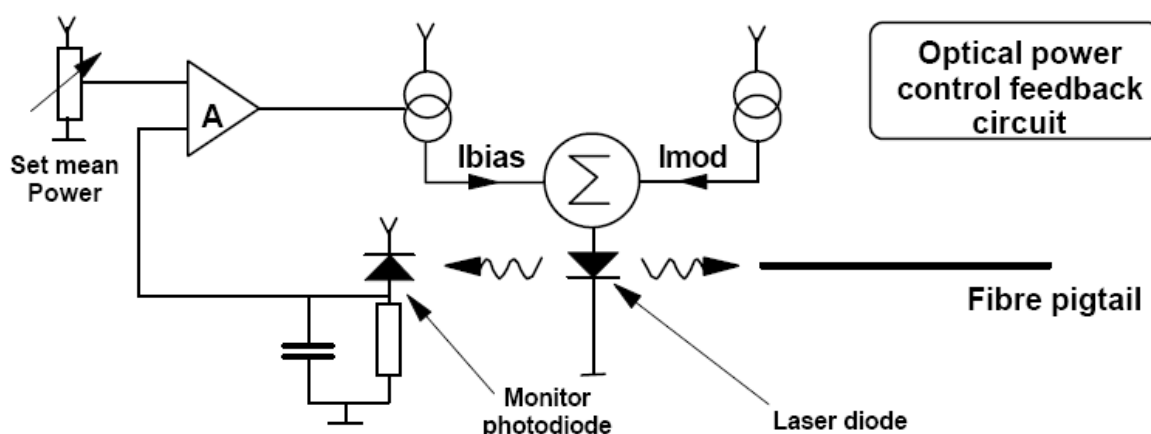
Λαμβάνοντας υπ' όψη την μεγέθυνση των φακών η παραπάνω εξίσωση μας δίνει την τιμή του αστιγματισμού, όπου b είναι η απόσταση που εμφανίζεται στο Σχήμα 2.23.

2.4 Τρόποι οδήγησης ημιαγωγικών laser

Τα διοδικά laser θα πρέπει πάντα να λειτουργούν με κυκλώματα είτε σταθερού ρεύματος ACC είτε με αυτόματο έλεγχο ισχύος APC. Για λόγους λιτότητας ένα APC κύκλωμα οδήγησης είναι γενικά προτιμώμενο, ειδικά αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος παρουσιάζει διακυμάνσεις. Τυπικά τέτοια κυκλώματα περιλαμβάνουν διατάξεις ομαλής έναρξης (slow-start) και προλαμβάνουν αιχμές τάσεως, κυματώσεις και άλλες υπερτάσεις. Ανεξάρτητα από πιο κύκλωμα επιλεγθεί, το ρεύμα δεν θα πρέπει να υπερβεί την απόλυτη τιμή της διόδου laser.

2.4.1 Οδήγηση με αυτόματο έλεγχο ισχύος (Automatic Power Control)

Κύκλωμα οδήγησης διοδικού laser βασισμένο σε βρόγχο ανατροφοδότησης μέσω φωτοδιόδου, η οποία παρακολουθεί την οπτική έξοδο και παρέχει ένα σήμα ελέγχου στη δίοδο, με σκοπό την διατήρηση ενός σταθερού επιπέδου οπτικής ισχύος. Το APC κύκλωμα οδήγησης αποκλείει την πιθανότητα να αυξηθεί η οπτική ισχύς εξόδου στην περίπτωση που μειωθεί η θερμοκρασία της διόδου laser. Η βασική ιδέα ενός κυκλώματος APC φαίνεται στο Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24 : Αυτόματος έλεγχος ισχύος με οπτική ανάδραση

Η δίοδος laser εκπέμπει λόγο του ρεύματος διέλευσης (I_{bias}) και διαμορφώνεται από το ρεύμα διαμόρφωσης (I_{mod}). Το I_{bias} ελέγχεται από την μεταβλητή αντίσταση στο ένα άκρο του ενισχυτή οδήγησης η οποία ελέγχει την στάθμη στην μία διαφορική είσοδο του ενισχυτή. Τώρα το φως που πέφτει στην φωτοδίοδο δημιουργεί ένα ρεύμα, ελεγχόμενης σημασίας από την αντίσταση στην άνοδο της φωτοδιόδου, το οποίο ρεύμα εισέρχεται στην άλλη διαφορική είσοδο του ενισχυτή και έτσι κλείνει ο βρόγχος ανάδρασης.

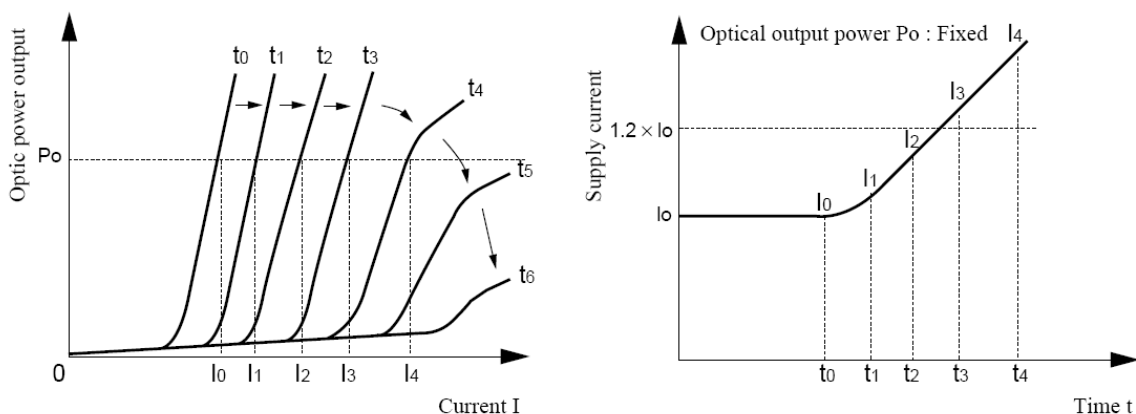
2.4.2 Η ανάγκη ενός κυκλώματος APC

Α) Όπως γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά εξόδου της διόδου laser επηρεάζονται κατά μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία και την επίδραση της ηλικίας, τα οποία μεταβάλλουν κυρίως το κατώφλι ρεύματος και την διαφορική κβαντική απόδοση.

Η μεταβολή του ρεύματος κατωφλίου (I_{th}) είναι εκθετική ως προς την μεταβολή της θερμοκρασίας και εκφράζεται από την σχέση $I_{th} = I_{th0} e^{T/T_0}$ (όπου I_{th0} το ρεύμα κατωφλίου για θερμοκρασία T_0 και T η θερμοκρασία λειτουργίας). Είναι προφανές ότι το I_{th} θα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι αν το ρεύμα οδήγησης (DC ρεύμα + ρεύμα διαμόρφωσης) είναι μικρό, είναι πιθανό η αλλαγή της θερμοκρασίας να κάνει το ρεύμα οδήγησης μικρότερο του ρεύματος κατωφλίου με αποτέλεσμα την διακοπή εκπομπής ακτινοβολίας laser.

Β) Η σχέση μεταξύ διαφορικής κβαντικής απόδοσης της διόδου laser (Y_d) και της θερμοκρασίας εκφράζεται από την σχέση $Y_d = Y_0 e^{-T/T_0}$ (όπου Y_0 η διαφορική κβαντική απόδοση για θερμοκρασία T_0), το οποίο σημαίνει ότι η διαφορική κβαντική απόδοση μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Αυτό επιδεικνύεται στην P-I καμπύλη της διόδου laser. Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία τόσο μικρότερη η κλίση και το ρεύμα διέγερσης του laser για την μεταβολή απόδοσής του.

Γ) Επιπλέον, από την καμπύλη ζωής της διόδου laser, είναι φανερό ότι ακόμα και αν το ρεύμα λειτουργίας είναι σταθερό, αν η δίοδος laser λειτουργεί για ορισμένο χρονικό διάστημα και εισέλθει στην περίοδο απώλειας, η αύξηση του ρεύματος κατωφλίου και η μείωση της κλίσης της καμπύλης P-I, μπορούν να κάνουν την δίοδο laser ανίκανη να λειτουργήσει σωστά. Στο Σχήμα 2.25 βλέπουμε τις καμπύλες οπτικής ισχύος συναρτήσει της θερμοκρασίας και ρεύματος κατωφλίου συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 2.25 : Η επίδραση της θερμοκρασίας και της γήρανσης στο ρεύμα κατωφλίου

Έτσι συνήθως στις ψηφιακές επικοινωνίες μέσω οπτικής ίνας είναι σημαντικό το κύκλωμα του πομπού να απαρτίζεται από APC διάταξη οδήγησης.

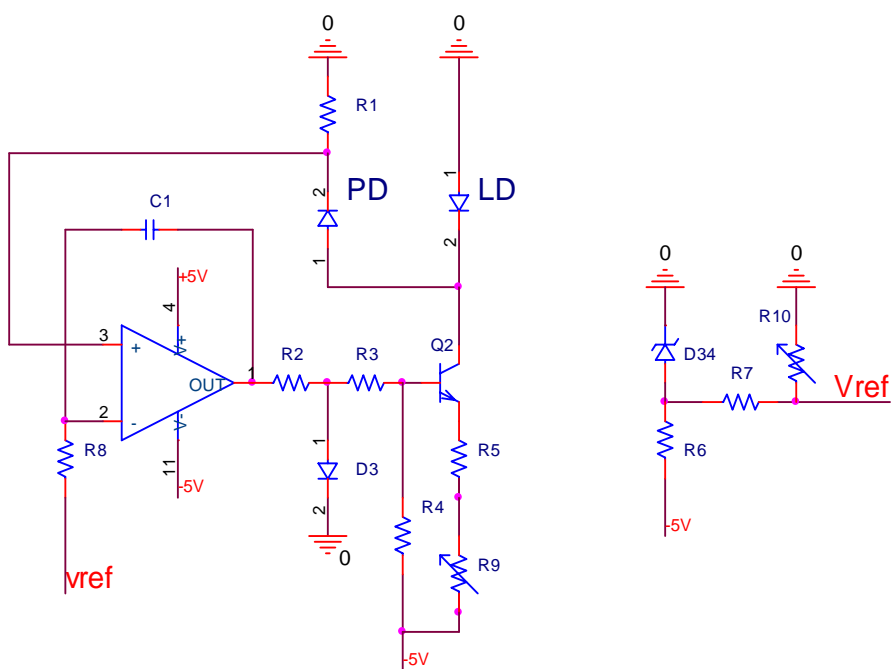
2.4.3 Η σχεδιαστική μέθοδος ενός κυκλώματος APC

Για τον ακριβή έλεγχο της οπτικής ισχύος εξόδου, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη δύο παραμέτρους : 1) τον έλεγχο του ρεύματος διέλευσης έτσι ώστε να ανιχνεύει αυτόματα τις αλλαγές στο ρεύμα κατωφλίου για τα λειτουργεί το διοδικό laser πάντα στην επιθυμητή περιοχή. 2) τον έλεγχο της ενίσχυσης του παλμορεύματος που διαμορφώνει το διοδικό laser, έτσι ώστε να ανιχνεύει αυτόματα τις αλλαγές στην διαφορική κβαντική απόδοση και ως εκ τούτου να διατηρεί το πλάτος του παλμού σταθερό. Από την στιγμή που η διαφορική κβαντική απόδοση δεν είναι τόσο ευαίσθητη στις μεταβολές τις θερμοκρασίας και λαμβάνοντας υπ' όψη το κόστος και την απλότητα του κυκλώματος οδήγησης, μπορούμε να επικεντρωθούμε στις αλλαγές του ρεύματος κατωφλίου.

Ένας απλός και αποδοτικός τρόπος σταθεροποίησης τις οπτικής ισχύος εξόδου είναι η προσαρμογή της DC στάθμης του ρεύματος διέλευσης της διόδου laser έτσι ώστε αν το κατώφλι ρεύματος αλλάξει, η DC στάθμη να μεταβληθεί ανάλογα διατηρώντας την οπτική ισχύς εξόδου σταθερή κάτω από το ίδιο σήμα διαμόρφωσης.

Υπάρχουν πολυάριθμοι APC μέθοδοι αλλά όλοι μπορούν να ταξινομηθούν σαν κυκλώματα ανοιχτού και κλειστού βρόγχου. Τα κυκλώματα APC αντιστάθμισης θερμοκρασίας ανοιχτού βρόγχου, χρησιμοποιούν τα θερμικά χαρακτηριστικά της τάσης εκπομπού-βάσης ενός τρανζίστορ πυριτίου για την αντιστάθμιση του ρεύματος κατωφλίου.

Παρακάτω (Σχήμα 2.26) θα αναλύσουμε ένα κύκλωμα APC κλειστού βρόγχου το οποίο χρησιμοποιεί οπτική ανάδραση για την σταθεροποίηση την οπτική ισχύ εξόδου. Η φωτοδίοδος ανιχνεύει μια οπτική ισχύ, η οποία απεικονίζει γραμμικά την αλλαγή στην οπτική ισχύ εξόδου του laser, και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα, με συνέπεια μέσω της αρνητικής ανάδρασης να ελέγχεται αυτόματα το ρεύμα διέλευσης (I_b) του διοδικού laser.



Σχήμα 2.26 : Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος APC

1) Το ληφθέν σήμα ανάδρασης :

Η φωτοδιόδος λειτουργεί μόνο όταν μια ανάστροφη τάση εφαρμόζεται στα άκρα της. Αυτή η ανάστροφη τάση παρέχεται από την ορθή τάση της διόδου laser (στη συγκεκριμένη περίπτωση η άνοδος της φωτοδιόδου και η κάθοδος του laser είναι κοινή). Το ρεύμα ανάδρασης της φωτοδιόδου μετατρέπεται σε τάση ανάδρασης μέσω της R_1 και στέλνεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Από την στιγμή που η ορθή τάση της διόδου laser είναι πάνω από 1.6V, η επιλογή της R_1 πρέπει να τηρεί δύο κανόνες για να εξασφαλίσουμε ανάστροφη τάση στα άκρα της φωτοδιόδου. Α) Όταν η διόδος laser λειτουργεί στο μέγιστο ρεύμα της, η φωτοδιόδος θα πρέπει να παραμένει ανάστροφα πολωμένη, γι' αυτό η R_1 δεν μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Β) Η επιλογή της R_1 θα πρέπει να διασφαλίζει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ευαισθησία για κύκλωμα APC, έτσι όταν το ρεύμα διέλευσης στο διοδικό laser αλλάζει, θα πρέπει να επακολουθείτε αρκετή μεταβολή τάσης στην R_1 . Έτσι η R_1 δεν μπορεί να είναι πολύ μικρή.

2) Ο καθορισμός του ρεύματος διέλευσης :

Το ρεύμα διέλευσης δημιουργείται μεταξύ βάσης και εκπομπού του τρανζίστορ Q_2 κατά συνέπεια εξαρτάται μόνο από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή, ενώ οι μεταβολές της ορθής τάσης της διόδου laser στον συλλέκτη δεν επηρεάζουν το ρεύμα διέλευσης. Έστω ότι απαιτούμε την στιγμή που το laser δεν διαμορφώνεται να υπάρχει ρεύμα διέλευσης 45mA (πάνω από το ρεύμα κατωφλίου με συνέπεια οποιοδήποτε ρεύμα διαμόρφωσης να φέρνει αλλαγή στην οπτική ισχύ εξόδου) και το μέσο ρεύμα λειτουργίας να είναι 60mA. Έτσι ο τελεστικός σε κανονικές συνθήκες διαμόρφωσης θα κάνει γραμμική ενίσχυση ενώ σε συνθήκες μη διαμόρφωσης θα λειτουργεί σαν συγκριτής έχοντας στην έξοδο μια θετική τάση. Κατά συνέπεια υπολογίζουμε την τιμή ασφαλείας της αντίστασης R_5 . Η R_9 είναι ένα ποτενσιόμετρο με σκοπό την διαμόρφωση του DC ρεύματος διέλευσης στην διόδο laser. Για να εξασφαλίσουμε ότι το APC κύκλωμα βρίσκεται σε μεγάλο εύρος ρύθμισης, τροφοδοτούμε τον τελεστικό με διπολική τροφοδοσία. Αν η τροφοδοσία ήταν μονοπολική τότε η τάση εισόδου δεν θα μπορούσε να φτάσει το 0V. Αλλά όταν δεν διέρχεται ρεύμα από την διόδο laser, τότε θα πρέπει η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο να είναι 0 πράγμα που θα έκανε τον τελεστικό να μην λειτουργεί σωστά.

3) Ρύθμιση του ρεύματος διέλευσης :

Το κύκλωμα APC βεβαιώνει την σταθερότητα της οπτικής ισχύος εξόδου ρυθμίζοντας το ρεύμα διέλευσης του laser. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι ο ρυθμός ενός πρακτικού σήματος διαμόρφωσης είναι κάποια gigabyte/sec, προσδοκάμε το APC κύκλωμα να ανταποκρίνεται στις πολύ πιο αργές μεταβολές της μέσης τιμής της οπτικής εξόδου. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε τον πυκνωτή C_1 μεταξύ της αναστρέφουσας εισόδου και της εξόδου του τελεστικού ενισχυτή

4) Ρύθμιση της μέσης ισχύος εξόδου :

Η V_{ref} στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή χρησιμεύει για την ρύθμιση της οπτικής ισχύος εξόδου. Όταν ο τελεστικός ενισχυτής δουλεύει σε κατάσταση γραμμικής ενίσχυσης, οι τάσεις στις εισόδους του είναι ίσες. Επομένως αν η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο δεν είναι ίση με την V_{ref} , υπάρχει ένα ρεύμα ανάμεσα στην

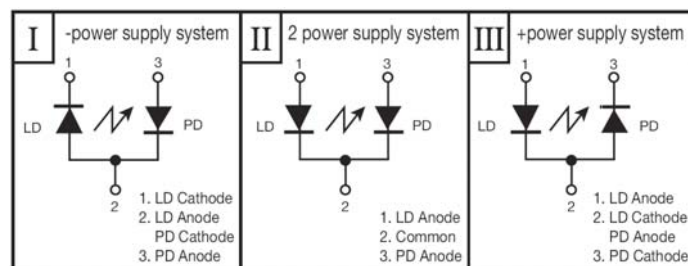
αναστρέφουσα είσοδο και την V_{ref} , το οποίο θα μεταβάλει την τάση εξόδου διότι ο C_1 θα φορτίζει ή θα εκφορτίζει με συνέπεια την μεταβολή του ρεύματος διέλευσης της δίοδου laser, δηλαδή και της οπτικής ισχύος εξόδου, και από την στιγμή που η τάση στην μη αναστρέφουσα είσοδο είναι η τάση ανάδρασης, θα μεταβληθεί και αυτή με τις μεταβολές της οπτικής ισχύος εξόδου, μέχρις ότου φτάσει στο ίδιο επίπεδο με την τάση στην αναστρέφουσα είσοδο δηλαδή την τάση V_{ref} . Με αυτό τον τρόπο η V_{ref} μπορεί να αποφασίσει την μέση τιμή της οπτικής ισχύος εξόδου. Η V_{ref} παρέχεται από ένα κύκλωμα τάσης αναφοράς που απαρτίζεται από την R_7 , R_6 και μία δίοδο zener, και ρυθμίζεται από την μεταβλητή αντίσταση R_{10} .

2.4.4 Παραδείγματα κυκλωμάτων APC

Παρακάτω εξετάζω διάφορα κυκλώματα Αυτόματου Ελέγχου Ισχύος τα οποία προτείνονται από εταιρείες κατασκευής ημιαγωγικών laser και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

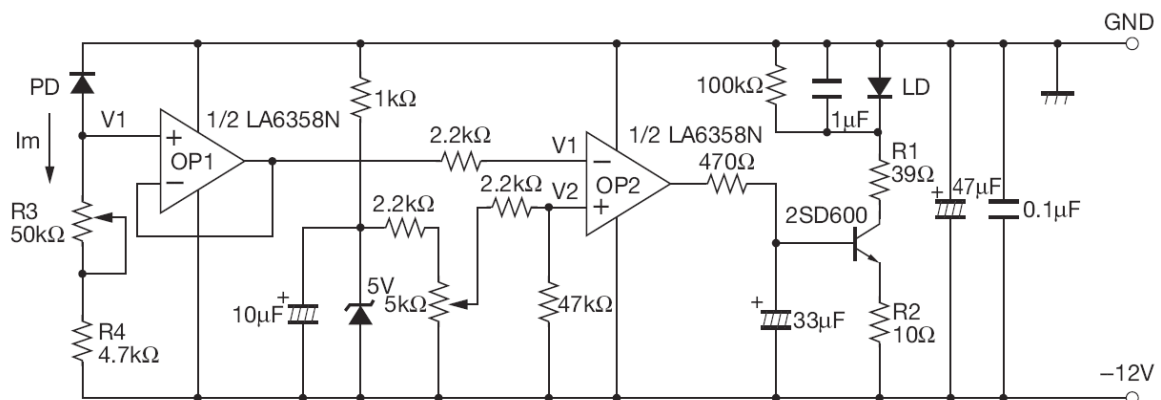
2.4.4.1 Η συλλογή κυκλωμάτων της SANYO

Τα παρακάτω κυκλώματα APC διαφοροποιούνται ως προς το pin-out του διοδικού laser που πρόκειται να οδηγηθεί. Γι' αυτό εμφανίζεται στο Σχήμα 2.27 ο πίνακας προσανατολισμού των τύπων των laser της εταιρείας.



Σχήμα 2.27 : Οι συνδυασμοί σύνδεσης φωτοδίοδου-διοδικού laser

A) APC κύκλωμα 1



Σχήμα 2.28 : APC κύκλωμα αρνητικής τροφοδοσίας

Το συγκεκριμένο κύκλωμα για διοδικά laser τύπου I.

Όταν η δίοδος laser (LD) εκπέμπει φως, ένα φωτορεύμα (I_m) ανάλογο της οπτικής ισχύος εξόδου ρέει στην φωτοδίοδο (PD) και μια τάση $V_1 = I_m(R_3+R_4)$ δημιουργείται. Αυτή η τάση στέλνεται μέσω ενός ακολουθητή τάσης OP1 στον τελεστικό ενισχυτή OP2. Η τάση αναφοράς V_2 η οποία λαμβάνεται από την δίοδο zener και ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο των 5KΩ στέλνεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του OP2. Ο τελεστικός OP2 συγκρίνει τις δύο τάσεις και μεταβάλλει το ρεύμα τάσης του τρανζίστορ, ενώ ταυτόχρονα ελέγχει το ρεύμα που ρέει στην δίοδο laser έτσι ώστε η V_1 και V_2 να είναι ίσες. Έτσι λαμβάνουμε σταθερή οπτική ισχύ.

<Ρύθμιση>

- 1) Θέτουμε το ποτενσιόμετρο R_3 στην μέγιστή του τιμή και ρυθμίζουμε το ποτενσιόμετρο της τάσης αναφοράς έτσι ώστε $V_2=0$.
- 2) Συνδέουμε την δίοδο laser έχοντας την τροφοδοσία αποσυνδεδεμένη.
- 3) Τροφοδοτούμε το κύκλωμα και στρέφουμε το ποτενσιόμετρο των 5KΩ στη μέση μετρώντας την οπτική ισχύ εξόδου. Σε αυτό το σημείο η οπτική ισχύς πρέπει να είναι στο 1/2 του καθορισμένου επιπέδου. Αν η απόκλιση είναι σημαντική τότε κλείνουμε την τροφοδοσία και ρυθμίζουμε τις αντιστάσεις R_3 και R_4 .
- 4) Ρυθμίζουμε την R_3 ώστε να φτάσουμε στο επιθυμητό επίπεδο εκπομπής.

<Διαδικασία ρύθμισης $R_1 - R_4$ >

1) Καθορίζουμε το εύρος εκπομπής ισχύος από τα δεδομένα χαρακτηριστικών του κατασκευαστή της δίοδος laser και μετά κάνουμε χρήση του παρακάτω πίνακα για τον καθορισμό του σωστού ρεύματος λειτουργίας και ρεύματος φωτοδίοδου για ορισμένη οπτική ισχύ.

Light output power	Operating current	Monitoring output current
P_{max}	I_{max}	$I_m \max$
P_{min}	I_{min}	$I_m \min$

2) Θέτουμε τις αντιστάσεις ισχύος R_1 και R_2 για I_{max} σύμφωνα με τον πίνακα παρακάτω.

Operating current range	0-100mA	0-200mA
R_1	39Ω	18Ω
R_2	10Ω	5Ω

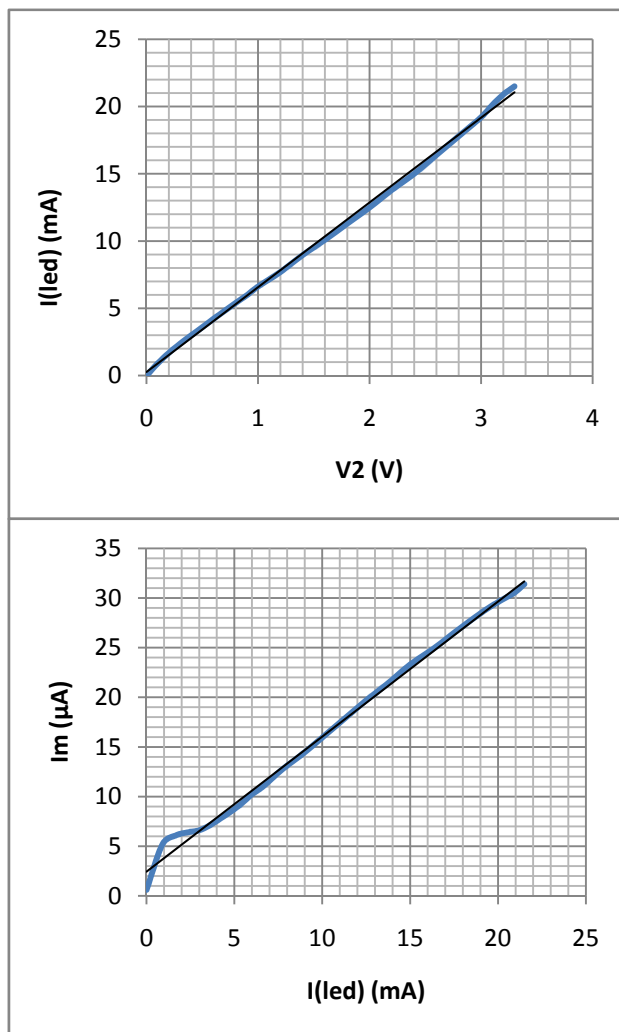
3) Μετά τις προηγούμενες ρυθμίσεις, η V_2 θα πρέπει να είναι περίπου 1.7V . Καθορίζουμε την αντίσταση R_4 έτσι ώστε $I_m \max * R_4 = 1.7V$. ($P_{max} = 4mW$ και $P_{min} = 1mW$ όταν η ισχύς θέλουμε να είναι 3mW)

Μετρήσεις :

Παρακάτω παραθέτω κάποιες μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, στο συγκεκριμένο κύκλωμα, χρησιμοποιώντας αντί του laser, ένα κόκκινο LED σε επαφή με μια φωτοδίοδο

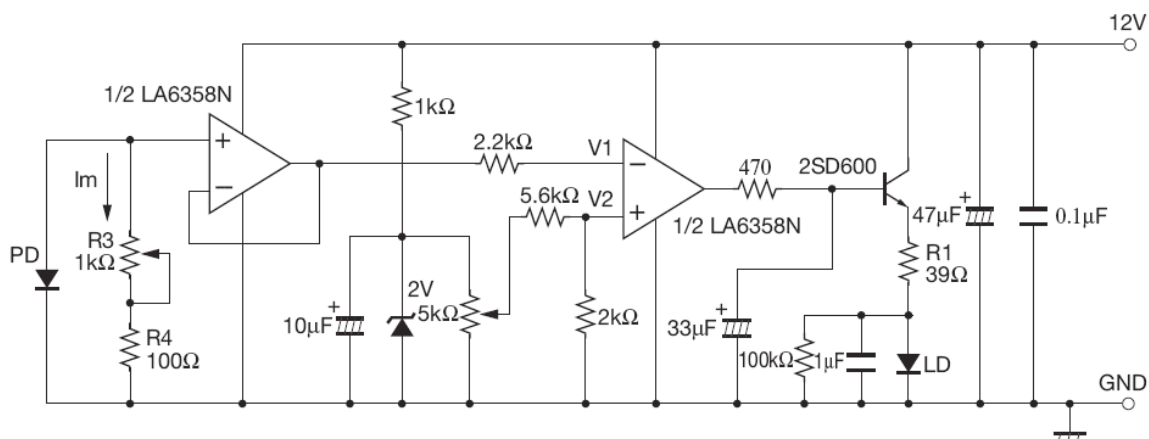
(BPW34). Οι μετρήσεις αναφέρονται στο ρεύμα του LED και της φωτοδιόδου I_m για διάφορες τιμές της V_2 .

V_2 (V)	$I(\text{led})$ (mA)	I_m (μA)
0	0	0,6
0,1	0,91	5,2
0,2	1,69	6,1
0,3	2,37	6,4
0,4	2,99	6,6
0,5	3,6	7,1
0,6	4,22	7,8
0,7	4,81	8,5
0,8	5,41	9,3
0,9	5,98	10,2
1	6,62	11
1,2	7,7	12,7
1,4	8,96	14,4
1,6	10,1	16,1
1,8	11,3	17,9
2	12,5	19,7
2,2	13,8	21,5
2,4	15	23,3
2,6	16,4	25
2,8	17,8	26,9
3	19,2	28,7
3,1	20,1	29,7
3,2	20,9	30,5
3,3	21,5	31,4



Μπορούμε να διακρίνουμε την γραμμική συσχέτιση των ρευμάτων των δύο στοιχείων με την τάση V_2 , καθώς και το υπάρχον ρεύμα I_m , όταν $V_2=0$ λόγω του περιβάλλοντος του εργαστηρίου.

Β) APC κύκλωμα 2



Σχήμα 2.29 : APC κύκλωμα θετικής τροφοδοσίας

Το συγκεκριμένο κύκλωμα οδήγησης αναφέρεται σε διοδικά laser τύπου II . Η αρχή λειτουργίας και η διαδικασία ρύθμισης είναι ίδιες με το APC κύκλωμα 1, εκτός του ότι οι αντιστάσεις R3 και R4 καθορίζονται διαφορετικά.

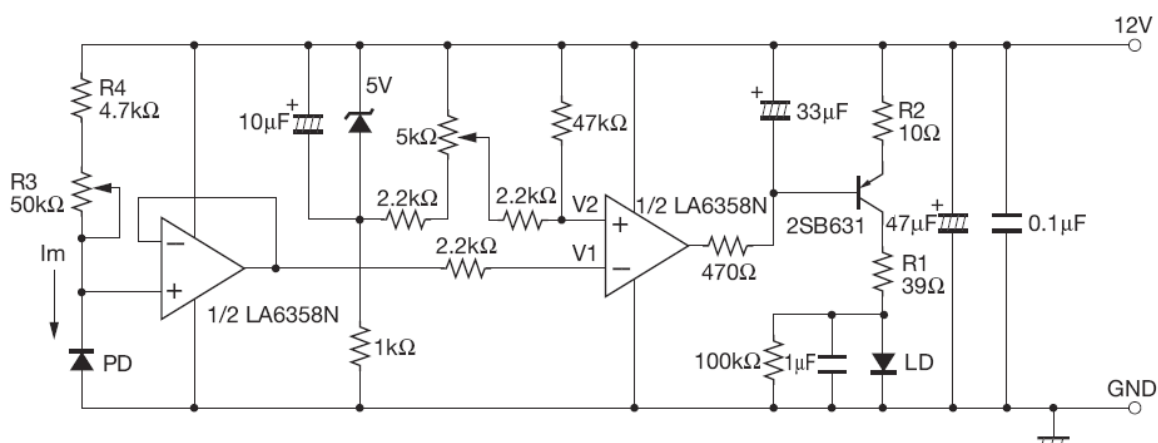
<Διαδικασία ρύθμισης R1 – R4>

1) Η V2 σ' αυτό το κύκλωμα είναι περίπου 0.26V, γι' αυτό καθορίζουμε την αντίσταση R4 έτσι ώστε $I_{m \max} * R4 = 0.26V$.

2) Ορίζουμε την αντίσταση R3 έτσι ώστε $I_{m \min} * (R3 + R4) = 0.26V$.

(Προσέχουμε στην ρύθμιση της R3 έτσι ώστε το δυναμικό V1 να είναι μικρότερο από 0.5V διότι δεν εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση στην φωτοδίοδο)

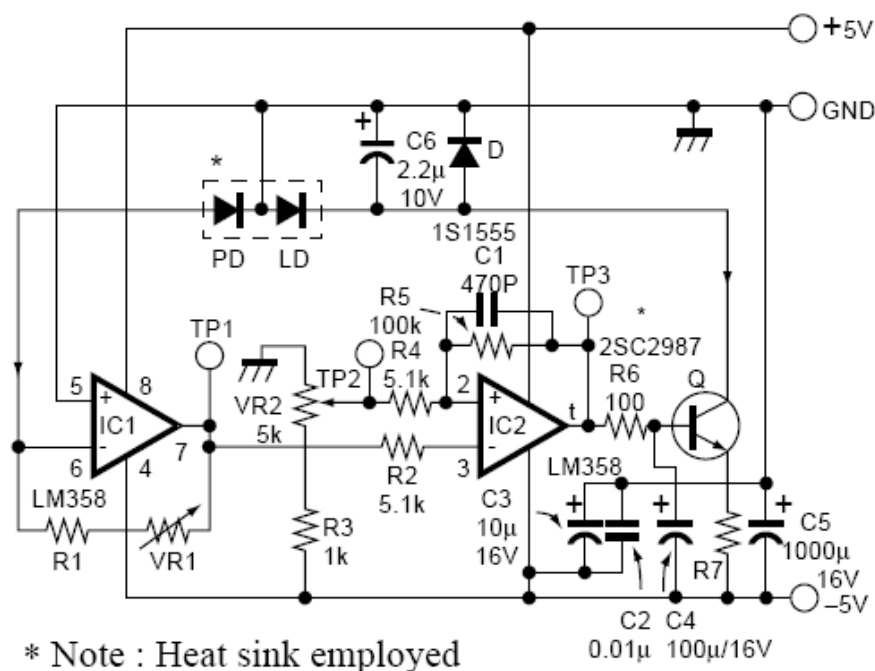
Γ) APC κύκλωμα 3



Σχήμα 2.30 : APC κύκλωμα διπολικής τροφοδοσίας

2.4.4.2 Το APC κύκλωμα της SONY

Καθώς τα χαρακτηριστικά οπτικής εξόδου εν συγκρίσει ορθού ρεύματος μιας laser διόδου εξαρτώνται από την θερμοκρασία, ένα APC κύκλωμα χρησιμοποιείται συνήθως για να έχουμε σταθερή οπτική έξοδο καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται. Στο Σχήμα 2.32 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα APC κυκλώματος για τη σειρά laser διόδων SLD200 και SLD300 της SONY.



Σχήμα 2.32 : APC κύκλωμα οδήγησης της Sony

Στο κύκλωμα χρησιμοποιείται παροχή ισχύος +/-5V χωρίς θόρυβο. Αν χρησιμοποιηθεί σταθεροποιητής τάσης, θα πρέπει να ελεγχθεί για τυχόν υπαρκτό θόρυβο στην έξοδο. Καθώς η χρονική απόκριση των διόδων laser είναι εξαιρετικά μεγάλη (της τάξης των GHz) σε συνδυασμό με την χαμηλή αντίσταση, μπορούν να πάθουν ζημιά με ένα μικρό ποσό στιγμιαίου θορύβου. Γι' αυτό ο C6 και D συνδέονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην laser δίοδο.

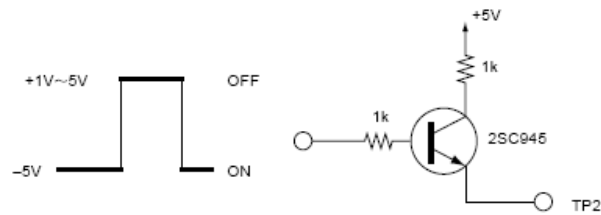
Η VR1 αντισταθμίζει την ευαισθησία της φωτοδίοδου και η VR2 καθιερώνει την στάθμη της οπτικής ισχύος στην έξοδο. Η ρύθμιση ξεκινά τοποθετώντας την VR2 στο -5V δυναμικό και ρυθμίζοντας τη VR1 ώστε να πετύχουμε μέγιστη οπτική ισχύ. Στην συνέχεια ρυθμίζουμε την VR1 στο επιθυμητό επίπεδο οπτικής ισχύος.

Τώρα θα γίνει εξήγηση της βασικής λειτουργίας του κυκλώματος. Ένα ρεύμα αντίστοιχο της οπτικής εξόδου ρέει από την φωτοδίοδο PD προς τη laser δίοδο LD. Αυτό το ρεύμα μετατρέπεται σε τάση μέσω του I-V μετασχηματιστή IC1 στο σημείο TP1. Η τάση αυτή στη συνέχεια ενισχύεται ανάστροφα από τον IC2 χρησιμοποιώντας την στάθμη της VR2 που έχει ρυθμιστεί στην επιθυμητή οπτική ισχύ. Η έξοδος του IC2 (TP3) είναι είσοδος για το τρανζίστορ Q του οποίου το ρεύμα οδηγεί τη laser δίοδο.

Σ' αυτό το σημείο η laser δίοδος λειτουργεί σε κανονική στάθμη εκπομπής. Αν η έξοδος αυξηθεί για οποιοδήποτε λόγο, το ρεύμα φωτοδίοδου θα αυξηθεί με συνέπεια την πτώση της τάσης στο σημείο TP1. Από την στιγμή που η έξοδος TP1 στέλνεται στη μη-αναστρέφουσα είσοδο του IC2, η τάση στο TP3 επίσης πέφτει. Ακολουθώντας την, το ρεύμα βάσης του Q πέφτει και το ρεύμα που ρέει στη laser δίοδο μειώνεται με συνέπεια την μείωση της οπτικής ισχύος. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στην οπτική ισχύ να είναι σταθερή ρυθμίζοντας την στάθμη της μέσω της VR2.

Το ρεύμα συλλέκτη του τρανζίστορ οδήγησης θα πρέπει να είναι ικανό να οδηγήσει το laser πέρα από το ρεύμα λειτουργίας και το hFE του θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 100μ.

Για να αναβοσβήσουμε την δίοδο laser ON/OFF (παλμική οδήγηση σε εύρος των Hz), επισυνάπτουμε ένα κύκλωμα παρόμοιο με αυτό του Σχήματος 2.33, στη σημείο TP2 του αρχικού κυκλώματος.



Σχήμα 2.33 : Κύκλωμα εφαρμογής παλμού

Για πάμε τη LD σε κατάσταση

OFF, η είσοδος στο TP2 θα πρέπει να είναι 1V ή περισσότερο. Στην κατάσταση ON το αφήνουμε ανοιχτό.

Η σταθερά χρόνου των C4 και R6 του κυκλώματος είναι 10 msec το οποίο είναι κατάλληλο για αργές εκκινήσεις. Για μεγαλύτερες ταχύτητες (εκατοντάδες KHz) το κύκλωμα ON/OFF δεν είναι αποτελεσματικό εκτός και αν η σταθερά χρόνου μειωθεί. Εντούτοις η μικρή σταθερά χρόνου κάνει το κύκλωμα ευαίσθητο στο θόρυβο.

1) Προετοιμασίες πριν συνδέσουμε την τροφοδοσία.

VR1 : Η τιμή της αντίστασης στη VR1 θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγάλη.

VR2 : Ρύθμιση στο δυναμικό της γης.

2) Ρύθμιση για μέγιστη οπτική ισχύ εξόδου.

α) Έχοντας αναφορά το μετρητή οπτικής ισχύος εξόδου, περιστρέφουμε την VR2 ώστε το δυναμικό στο TP2 γίνει αρνητικό και μια σταθερή οπτική ισχύς επιτευχθεί.

β) Αν δεν μπορεί να επιτευχθεί μια σταθερή οπτική έξοδος στο α) , ρυθμίζουμε τη VR1. Η ρύθμιση της VR1 έχει ολοκληρωθεί. Αν το ρεύμα σταματήσει να ρέει, φέρνουμε το TP2 στο αρνητικό δυναμικό μεταβάλλοντας τη VR2.

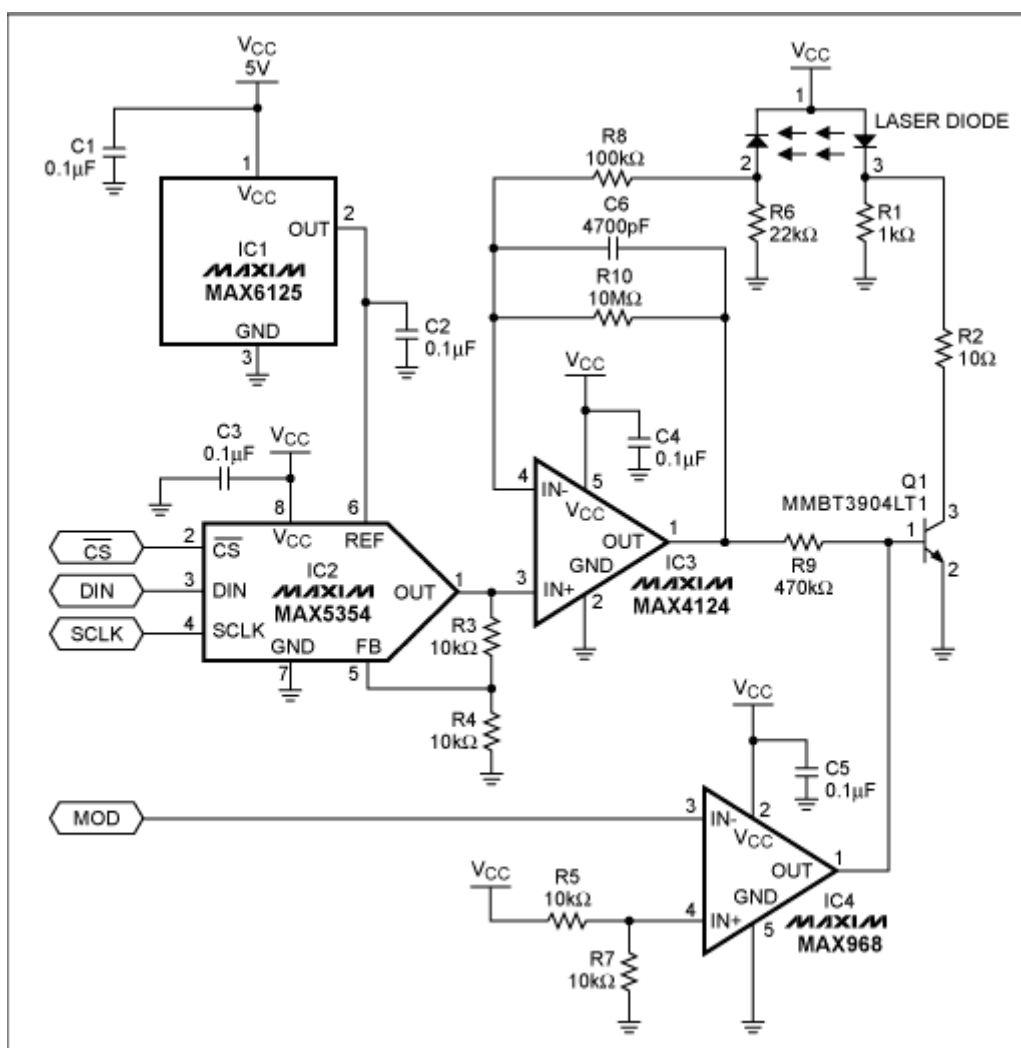
3) Προσοχή, δεν επιτρέπεται η οπτική ισχύς εξόδου να υπερβεί την απόλυτη μέγιστη τιμή κατά την διάρκεια της παραπάνω διαδικασίας.

Στο παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές για τα R1, R7 και VR1 για διάφορες laser δίοδους της SONY :

Model No.	R1	R7	VR1
SLD201	7.5k	7.2(0.5W)	200k
SLD202	6.2k	7.2(0.5W)	200k
SLD201-3	3k	7.2(0.5W)	100k
SLD202-3	3k	7.2(0.5W)	100k
SLD301/SLU301	10k	5(2W)	100k
SLD302	5.1k	3(2W)	50k
SLD322	2k	1(3W)	20k
SLD304/SLD323	1k	0.5(3W)	10k
SLD324	650k	0.3(6W)	3k

2.4.4.3 Το APC κύκλωμα της MAXIM με ψηφιακά ελεγχόμενη διαμόρφωση ισχύος

Το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος περιλαμβάνει ένα 10-bit μετατροπέα από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC) τριών σειριακών καναλιών εισόδου, που λειτουργεί και διατηρεί ένα διοδικό laser σε μια μέση σταθερή οπτική ισχύ. Ένα ξεχωριστό κανάλι ψηφιακής εισόδου (MOD) ενεργοποιεί έναν συγκριτή με έξοδο ανοιχτής άντλησης (IC4) για την εφαρμογή ψηφιακής επικοινωνίας στη δίοδο laser παλμικά μέσω του τρανζίστορ Q1.



Σχήμα 2.34 : APC κύκλωμα οδήγησης της Maxim με ψηφιακή διαμόρφωση

Όπως γνωρίζουμε τα περισσότερα διοδικά laser περιλαμβάνουν μια ενσωματωμένη φωτοδίοδο για την παραγωγή ενός ρεύματος ελέγχου της οπτικής ισχύος εξόδου. Παρ' όλα αυτά οι περισσότερες φωτοδιόδους έχουν χαμηλή συχνотική απόκριση και δεν μπορούν να ανιχνεύσουν την αιχμή της οπτικής ισχύος ενός τυπικού διαμορφούμενου laser. Αντ' αυτού τα κυκλώματα οδήγησης γι' αυτές τις συσκευές ελέγχουν το laser ανιχνεύοντας την σχετική μέση τιμή της οπτικής ισχύος εξόδου.

Η αντίσταση R6 μετατρέπει το ρεύμα φωτοδίοδου σε τάση, η οποία εφαρμόζεται στην αναστρέφουσα είσοδο ενός ολοκληρωτή εκροής βασισμένο σε έναν υψηλής ταχύτητας τελεστικό ενισχυτή IC3. Ο ολοκληρωτής εξομαλύνει διακυμάνσεις της διαμόρφωσης και αποτρέπει τον βρόγχο ανάδρασης να προσπαθήσει να ρυθμίσει τους παλμούς του laser. Ο ολοκληρωτής έχει μετατραπεί σε ολοκληρωτή εκροής μέσω της αντίστασης R10 για να διασφαλίσει την αντιστάθμιση των μεταβολών της μέσης ισχύος.

Κατά συνέπεια ο ολοκληρωτής δημιουργεί ένα σήμα σφάλματος και οδηγεί την βάση του τρανζίστορ Q1 ελέγχοντας την τάση στα άκρα της R6 και συγκρίνοντάς την με την προκαθορισμένη τάση εξόδου του μετατροπέα DAC. Η τάση αναφοράς του DAC (από τον IC1) είναι 2.5V, αλλά η τάση εξόδου του απομονωτή έχει μια απολαβή 2V/V, δίνοντας έτσι στον DAC ένα εύρος ρύθμισης εξόδου από 0 έως 5V. Με την ονομαστική τάση βάσης να καθορίζεται από την έξοδο του DAC, το τρανζίστορ Q1 ελέγχει την οπτική ισχύ ρυθμίζοντας το ρεύμα διέλευσης της δίοδου laser.

Η αντίσταση R9 παρέχει απομόνωση και βοηθά στην σταθεροποίηση του IC3 όταν η βάση του Q1 διαμορφώνεται από την είσοδο MOD. Διατηρώντας ένα μικρό ρεύμα διέλευσης στην δίοδο laser κατά την διάρκεια των off περιόδων της ψηφιακής διαμόρφωσης, η αντίσταση R1 προλαμβάνει ακόμα ένα πρόβλημα : Ο χρόνος εκκίνησης μιας δίοδου laser αυξάνεται πάρα πολύ αν το ρεύμα διέλευσης φτάσει το 0. Έτσι η R1 εξασφαλίζει ότι το ρεύμα διέλευσης σε κατάσταση off είναι μικρότερο από το ρεύμα κατωφλίου, αλλά αρκετά υψηλό για να έχουμε ένα αποδεκτό χρόνο εκκίνησης για σωστή μετάδοση.

2.4.5 Οδήγηση με σταθερό ρεύμα (Automatic Current Control)

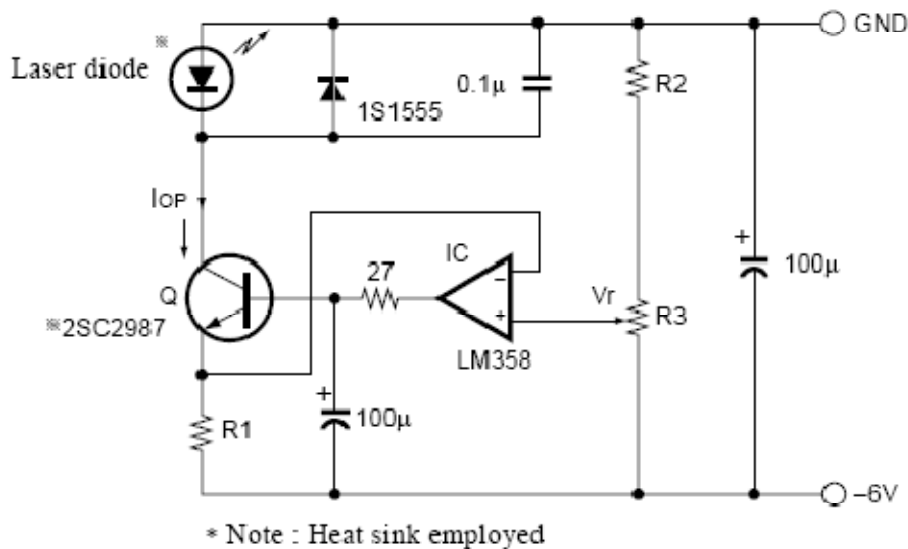
Κύκλωμα οδήγησης διοδικού laser που λειτουργεί χωρίς βρόγχο ανάδρασης μέσω της φωτοδίοδου. Η οδήγηση της δίοδου laser γίνεται απλά με σταθερό ρεύμα.

Η οδήγηση με σταθερό ρεύμα σε συνδυασμό με τον ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας της δίοδου είναι γενικώς ο καλύτερος τρόπος λειτουργίας του laser. Η μέθοδος σταθερού ρεύματος παρέχει γρηγορότερο βρόγχο ελέγχου και πιστότερη αναφορά ρεύματος για ακριβέστερο έλεγχο του ρεύματος λειτουργίας. Παρ' όλα αυτά δεν συνιστάται η λειτουργία σταθερού ρεύματος χωρίς έλεγχο θερμοκρασίας, διότι μια πτώση της θερμοκρασίας του laser θα οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της οπτικής εξόδου και το laser εύκολα θα καταστραφεί.

2.4.5.1 Το ACC κύκλωμα της SONY

Ένα κύκλωμα σταθερού ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.35.

Χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει σταθερό ρεύμα διέλευσης στη δίοδο laser. Αυτό το κύκλωμα είναι γνωστό και ως τύπου άντλησης πηγή σταθερού ρεύματος.



Σχήμα 2.35 : Το κύκλωμα οδήγησης σταθερού ρεύματος της Sony

Το ρεύμα I_{op} το οποίο ρέει στη δίοδο laser καθορίζεται από την τάση αναφοράς V_r και την αντίσταση R_3 από την εξίσωση:

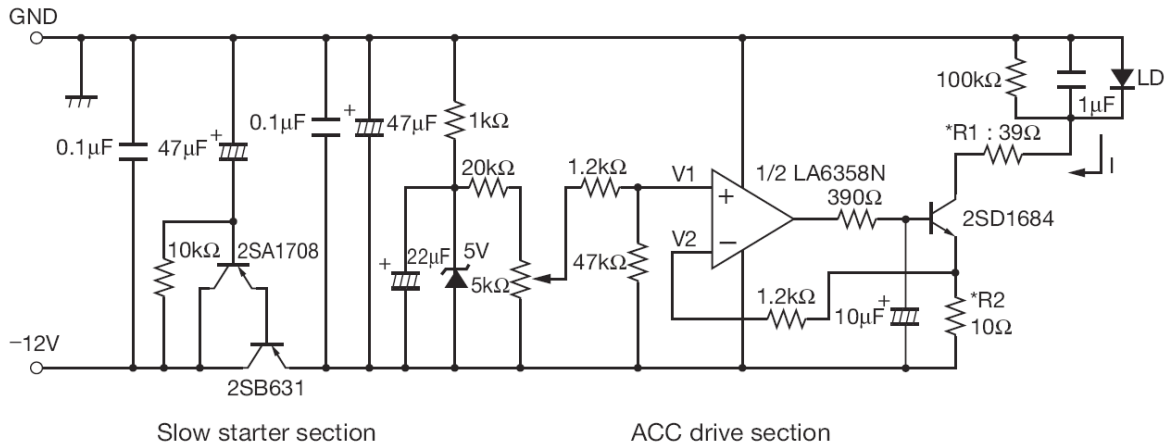
$$I_{op} = (V_r + 6) / R_3 \quad (1)$$

Αυξάνοντας το δυναμικό V_r αυξάνεται το ρεύμα.

Για να στηθεί το κύκλωμα, πρώτα υπολογίζουμε την R_3 για το επιθυμητό I_{op} από την σχέση $R_3 = 6 / I_{op}$ και στη συνέχεια ορίζουμε τις R_2 και R_3 για να επιτύχουμε την επιθυμητή V_r σύμφωνα με την σχέση (1). Ένα τρανζίστορ οδήγησης το οποίο να μπορεί να παρέχει ρεύμα συλλέκτη μεγαλύτερο του ρεύματος λειτουργίας της δίοδου laser και με h_{FE} μεγαλύτερο του 100, είναι αναγκαίο.

2.4.5.2 Το ACC κύκλωμα της SANYO

Στο Σχήμα 2.36 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα οδήγησης διόδου laser σταθερού ρεύματος. Αποτελείται από την κυρίως βαθμίδα οδήγησης και από μία βαθμίδα αργής εκκίνησης (slow starter section) για την ομαλή εκκίνηση του κυκλώματος τη στιγμή που το βάζουμε στην τροφοδοσία.



Σχήμα 2.36 : Το κύκλωμα οδήγησης σταθερού ρεύματος της Sanyo με βαθμίδα αργής εκκίνησης

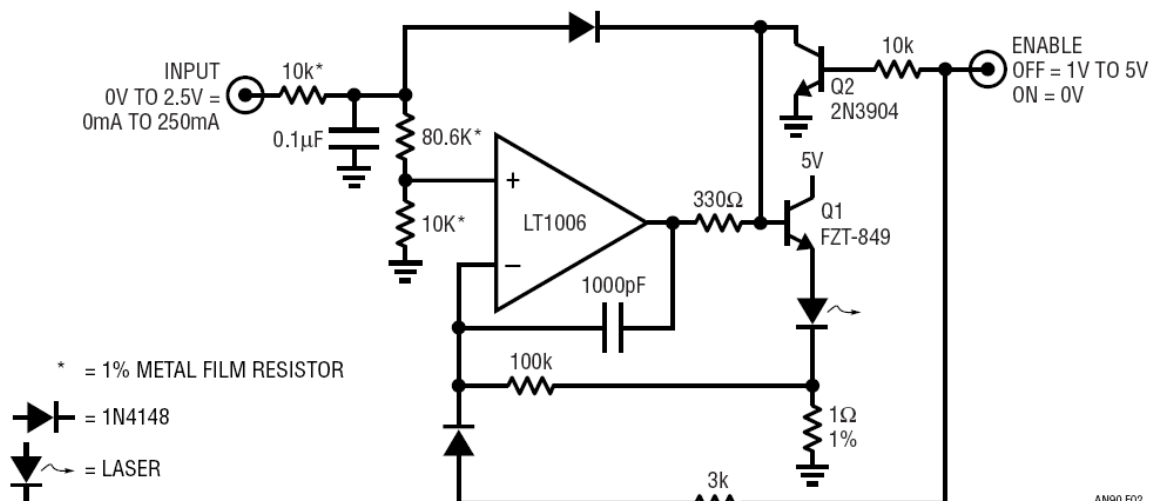
Το ρεύμα διέλευσης της διόδου laser ρέει μέσω της αντίστασης R1 στο τρανζίστορ και δημιουργεί ηλεκτρικό δυναμικό $V2 = I * R2$. Ένας τελεστικός ενισχυτής συγκρίνει την τάση V2 με την τάση αναφοράς V1, για να οδηγήσει στην συνέχεια το τρανζίστορ, διατηρώντας συνεχώς την τάση V2 ίση με την V1. Σαν αποτέλεσμα έχουμε $I = V2/R2 = V1/R2 =$ σταθερό ρεύμα. Το ρεύμα ορίζεται από το ποτενσιόμετρο των 5KΩ.

Οι αντιστάσεις R1 και R2 εξαρτώνται από το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του laser και παίρνουν τις παρακάτω τιμές.

Operating current range	0-100mA	0-200mA
R1	39Ω	18Ω
R2	10Ω	5Ω

2.4.5.3 Μια βασική πηγή ρεύματος της Linear Technology

Στο Σχήμα 2.37 εμφανίζεται μια βασική πηγή ρεύματος για διοδικό laser, η οποία προμηθεύει ρεύμα έως και 250mA μέσω του τρανζίστορ Q1.

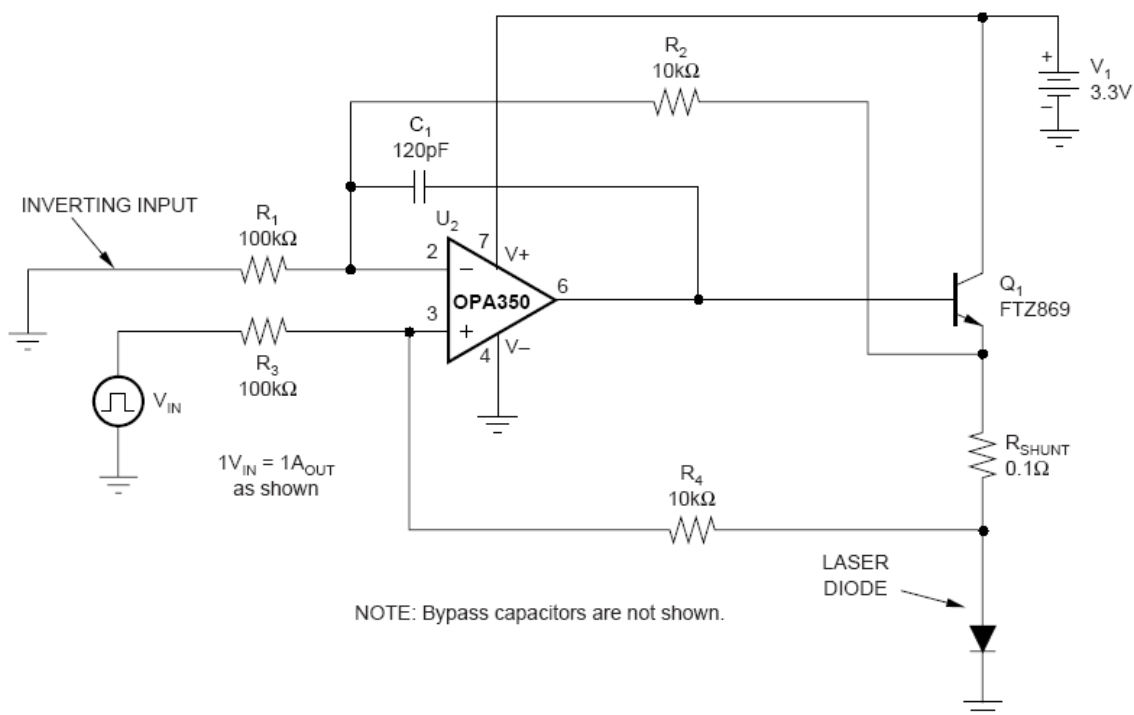


Σχήμα 2.37 : Πηγή ρεύματος για laser με αιωρούμενα άκρα

Το συγκεκριμένο κύκλωμα απαιτεί να αιωρούνται και τα δύο άκρα του laser. Ο ενισχυτής ελέγχει το ρεύμα του laser διατηρώντας την τάση στα άκρα της αντίστασης των 1Ω σε δυναμικό ορισμένο από την είσοδο INPUT. Η συχνотική αντιστάθμιση στον ενισχυτή σταθεροποιεί τον βρόγχο και ο πυκνωτής των 0.1μF τις φιλτράρει εντολές εισόδου. Αυτές οι προφυλάξεις αποτρέπουν υπερτάσεις λόγω της εισόδου ελέγχου. Η είσοδος ενεργοποίησης (ENABLE) κλείνει την πηγή ρεύματος γειώνοντας την βάση του Q1, «λιμοκτονώντας» την μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού και πολώνοντας την αναστρέφουσα είσοδο ψηλά, ταυτόχρονα. Αυτός ο συνδυασμός εξασφαλίζει επίσης την ομαλή μετάβαση του ενισχυτή στην επιθυμητή οπτική ισχύ όταν η είσοδος ENABLE μεταβεί στην θέση ON. Η είσοδος ENABLE πρέπει να ελέγχεται από εξωτερικό ρολόι το οποίο το οποίο ενεργοποιεί το κύκλωμα αφού βεβαιωθεί ότι η τάση τροφοδοσίας βρίσκεται μέσα στα όρια λειτουργίας. Επειδή το εξωτερικό κύκλωμα ελέγχου της εισόδου ENABLE μπορεί να τροφοδοτείται από την ίδια τροφοδοσία με την πηγή ρεύματος, το κατώφλι ενεργοποίησης έχει ορισθεί στα 1V. Το κατώφλι των 1V βεβαιώνει ότι η είσοδος ENABLE θα ελέγχει την έξοδο της πηγής ρεύματος με χαμηλή τάση τροφοδοσίας την στιγμή που δίνει την εντολή ON.

2.4.5.4 Μια πηγή ρεύματος της Texas Instruments

Μια μονοτερματική πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.38. Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί με μονοπολική τροφοδοσία +3.3V και μπορεί να οδηγήσει ένα διοδικό laser με ρεύμα 0A έως 2A με είσοδο 0V έως 2V από ένα μετατροπέα από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC). Μπορεί επίσης να δεχθεί είσοδο 0V έως -2V.



Σχήμα 2.38 : Πηγή σταθερού ρεύματος της Texas

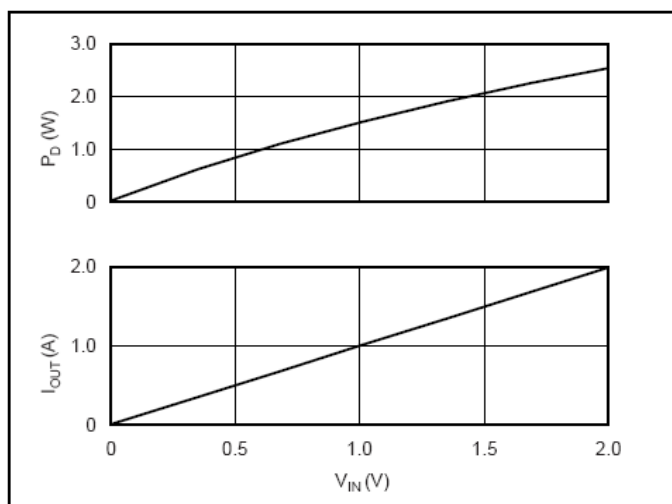
Αυτός ο απλός γραμμικός οδηγός παρέχει καθαρότερο ρεύμα οδήγησης στο διοδικό laser απ' ότι ένας οδηγός διαμόρφωσης παλμικού εύρους.

Το βασικό κύκλωμα είναι αυτό μιας πηγής ρεύματος Howland με έναν ενισχυτή ρεύματος (Q_1) στην έξοδο ενός τελεστικού ενισχυτή (U_2). Το ρεύμα της διόδου laser ανιχνεύεται μετρώντας την πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης R_{SHUNT} που βρίσκεται σε σειρά με το laser. Το ρεύμα εξόδου ελέγχεται από την τάση εισόδου V_{IN} η οποία αποτελείται είτε από αναλογικό σήμα είτε από την έξοδο ενός DAC. Ο συντελεστής κλίμακας είναι 1A έξοδος για 1V είσοδο.

Ο συντελεστής κλίμακας (V_{IN}/I_{OUT}) μπορεί να ορισθεί για άλλες τιμές διαλέγοντας τις κατάλληλες αντιστάσεις σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\frac{V_{IN}}{I_{OUT}} = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_{SHUNT} \quad \text{και} \quad R_1 = R_3, \quad R_2 = R_4$$

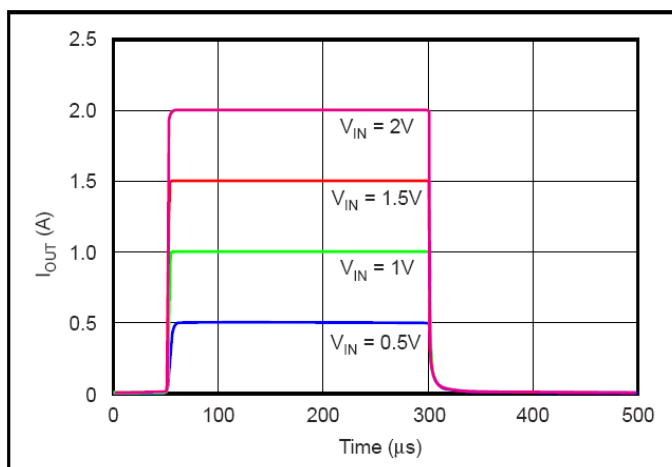
Μετά από εξομοίωση που έγινε στο P-spice πάνω στην τάση εισόδου V_{IN} μεταβάλλοντας την τιμή της από 0V σε 2V, λάβαμε την σχέση μεταξύ του ρεύματος διέλευσης της διόδου laser και της οπτικής ισχύς της, συναρτήσε της τάσης εισόδου.



Σχήμα 2.39 : Ρεύμα εξόδου (I_{OUT}) και κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ Q_1 (P_D), συναρτήσει της τάσης εισόδου

Στο Σχήμα 2.39 διακρίνεται η κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ Q_1 . Με τροφοδοσία +3.3V το τρανζίστορ Q_1 καταναλώνει περίπου 1.5W για έξοδο 1A.

Ο έλεγχος του P-slice για μεταβατική απόκριση του ρεύματος εξόδου φαίνεται στο Σχήμα 2.40. Το πλάτος της παλμικής τάσης εισόδου διακυμάνθηκε από 10mV σε 500mV σε 10mV και σε 2V, και στη συνέχεια σχεδιάστηκε η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου (Σχήμα 43).



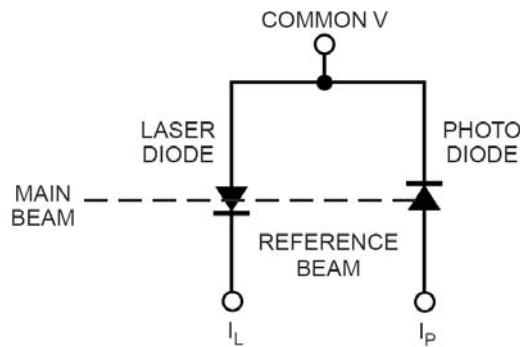
Σχήμα 2.40 : Η μεταβατική απόκριση του κυκλώματος οδήγησης

Το κύκλωμα παρουσιάζει καλή απόκριση και στους δύο χρόνους, ανόδου και καθόδου. Αλλάζοντας την αντίσταση R_{SHUNT} ή τον συντελεστή κλίμακας του κυκλώματος, καθίσταται αναγκαία και η αλλαγή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 . Πρέπει να εξακριβωθεί ότι το κύκλωμα είναι σταθερό πριν τη σύνδεση ενός ακριβούς διοδικού laser.

Αν υπάρχει διαθέσιμη αρνητική τάση ελέγχου, τότε αυτή μπορεί να εφαρμοστεί στην αντίσταση R_1 και γειώνοντας την R_3 , έτσι έχουμε μετατρέψει τον ενισχυτή σε αναστρέφον ενισχυτή.

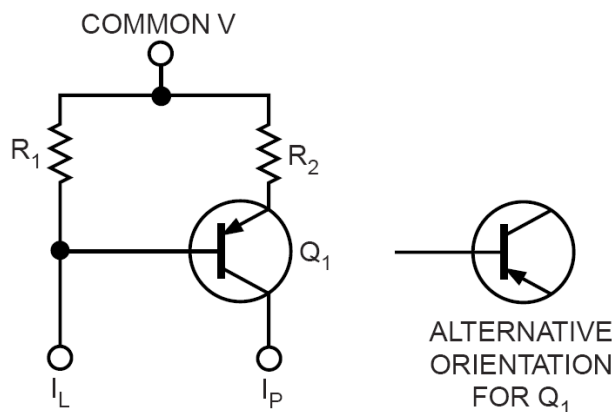
2.5 Το πειραματικό μοντέλο εξομοίωσης ενός διοδικού laser

Τα διοδικά laser μπορούν εύκολα να καταστραφούν μέσα σε μερικά nsec. Γι' αυτό ο έλεγχος ενός κυκλώματος οδήγησης με οπτική ανάδραση μπορεί να αποβεί δαπανηρός. Καθώς η συσκευασία του διοδικού laser εμπεριέχει και μια φωτοδίοδο δημιουργείται ένα ρεύμα φωτοδίοδου I_P το οποίο προκύπτει από την πτώση φωτός πάνω στην φωτοδίοδο, και μεταβάλλεται γραμμικά (πάνω από το κατώφλι ρεύματος) με την οπτική έξοδο του laser. Ενώ κάτω από το ρεύμα κατωφλίου το I_P είναι μικρό όπως και η εκπομπή.



Σχήμα 2.41 :Τυπική συνδεσμολογία διοδικού laser

Ένας προσομοιωτής θα πρέπει να απεικονίζει αυτά τα χαρακτηριστικά και το κύκλωμα του Σχήματος 2.42 περιλαμβάνει μια βασική πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση, που παρουσιάζει ένα κατώφλι. Βασισμένο σε ένα PNP τρανζίστορ και δύο αντιστάσεις μπορεί να αντικαταστήσει το διοδικό laser μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του κυκλώματος. Μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά διαφόρων διοδικών laser.



Σχήμα 2.42 : Κύκλωμα εξομοίωσης διοδικού laser με ένα τρανζίστορ

Στην πράξη το κύκλωμα οδήγησης τραβά ρεύμα I_L και δημιουργεί μια τάση V_S στα άκρα της R_1 . Όταν η V_S ξεπεράσει την τάση V_{BE} του τρανζίστορ Q_1 , τότε το Q_1 δημιουργεί ένα φωτορεύμα I_P μέσω της ανάδρασης ελέγχου του κυκλώματος. Καθώς αυξάνεται το I_L , αυξάνεται σε γραμμική αναλογία και το I_P .

Σαν ένα σχεδιαστικό παράδειγμα, θα αναλογιστούμε ένα τυπικό διοδικό laser με ρεύμα κατωφλίου (I_{TH}) των 10mA, ρεύμα λειτουργίας πλήρους οπτικής ισχύος (I_{LMAX}) των 30mA

και ένα ρεύμα φωτοδιόδου των 100μΑ σε πλήρη ισχύ. Τότε η R_1 θα πρέπει να είναι ίση με V_{BE}/I_{TH} , ή 560mV/10mA συνεπάγοντας μια τιμή των 56Ω για την R_1 . Στη συνέχεια η R_2 ισούται με $((I_{LMAX} * R_1) - V_{BE})/I_{PMAX}$ ή περίπου 11KΩ. Χρησιμοποιώντας τα 560mV για την τάση V_{BE} έχουμε την καλύτερη πρακτική σχέση μεταξύ I_L και I_P .

Αναστρέφοντας το τρανζίστορ Q_1 έτσι ώστε να γίνει εναλλαγή στις συνδέσεις του συλλέκτη και του εκπομπού, παράγουμε μια πιο απότομη μεταγωγή της τάσεως κατωφλίου στα περίπου 500mV αλλά μειώνεται η κλίση του I_P σε σχέση με το I_L . Σε αυτό το παράδειγμα η αναστροφή του τρανζίστορ απαιτεί την μείωση της τιμής της R_2 στα 7.5KΩ.

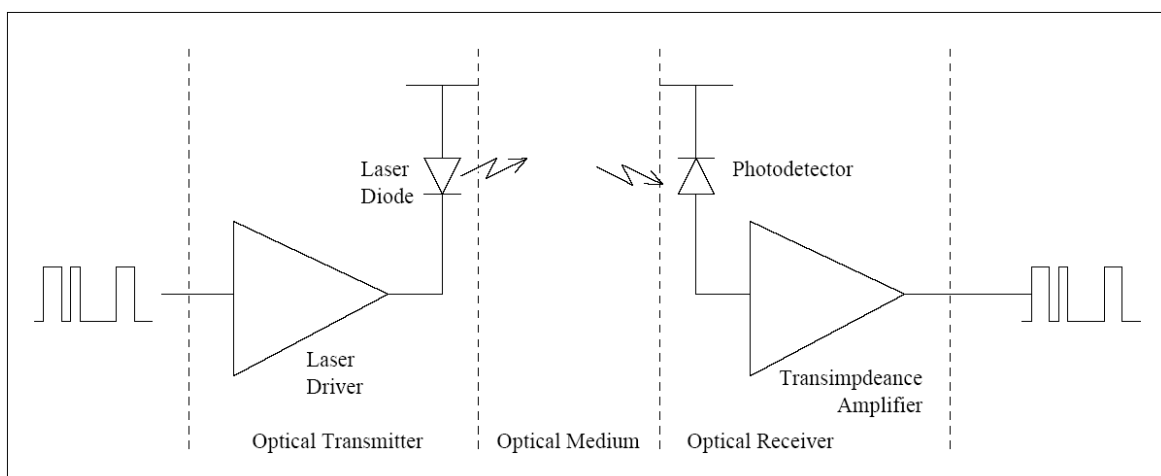
Η συνδεσμολογία ανεστραμμένου τρανζίστορ παρέχει αιχμηρότερο κατώφλι και έτσι πιο ρεαλιστική εξομοίωση, ακόμα κι αν χρειάζεται κάποιος πειραματισμός με τις τιμές των αντιστάσεων για βέλτιστες επιδόσεις. Μπορεί να γίνει χρήση σχεδόν οποιουδήποτε PNP τρανζίστορ διπολικής επαφής.

Τα διοδικά laser εμφανίζουν μια πτώση τάσης περίπου 2V στα άκρα τους, έτσι το κύκλωμα εξομοίωσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει αυτή την τάση στο μέγιστο ρεύμα. Επίσης το κύκλωμα εξομοίωσης έχει πιο αργή απόκριση από τα διοδικά laser, αλλά μιας και το κύκλωμα ανατροφοδότησης είναι ακόμα πιο αργό, η αργή απόκριση του εξομοιωτή δεν αποτελεί πρόβλημα.

Αν υπάρχει επαρκής ισχύς τροφοδοσίας, τότε μπορούμε να συνδέσουμε ένα LED σε σειρά με τον ακροδέκτη I_L για να παρέχεται οπτική ένδειξη λειτουργίας. Συνδέοντας έναν παλμογράφο στα άκρα της R_1 μας επιτρέπει την παρακολούθηση των ρευμάτων οδήγησης και διαμόρφωσης.

2.6 Διαμόρφωση του διοδικού laser για οπτική μετάδοση

Το διάγραμμα ενός συστήματος οπτικής ζεύξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.43. Αποτελείται από ένα οπτικό πομπό, την πηγή φωτός, το οπτικό μέσο, τον φωτοανιχνευτή και τον οπτικό δέκτη.



Σχήμα 2.43 : Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα οπτοηλεκτρονικής ζεύξης

Από την πλευρά εκπομπής, ο οπτικός πομπός μετατρέπει το σήμα εισόδου σε ρεύμα για την διαμόρφωση της πηγής φωτός. Το εκπεμπόμενο φως διαδίδεται μέσω του οπτικού μέσου το οποίο μπορεί να είναι μια οπτική ίνα, ο ελεύθερος χώρος ή συχνά ένας κυματοδηγός. Το σήμα φωτός συλλέγεται από το οπτικό μέσο με την βοήθεια ενός φωτοανιχνευτή ο οποίος παράγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα. Ο οπτικός δέκτης μετατρέπει και ενισχύει το φωτορεύμα σε ψηφιακό σήμα.

Αν και η τοπολογία του παραπάνω συστήματος έχει αλλάξει τα τελευταία χρόνια, ο σχεδιασμός των επιμέρους επιπέδων είναι περίπου ίδιος.

2.6.1 Το εύρος ζώνης διαμόρφωσης ενός διοδικού laser

Ένα από τα πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικά των διοδικών laser στις οπτικές επικοινωνίες είναι η μέγιστη ταχύτητα διαμόρφωσής του. Η απόκριση μικρού σήματος του διοδικού laser λαμβάνεται γραμμικοποιώντας τις εξισώσεις ρυθμού. Το αποτέλεσμα για την διαμόρφωση μικρού σήματος είναι μια συνάρτηση μεταφοράς 2^{ης} τάξης.

$$\frac{\Delta P}{\Delta J} = \frac{P_0 + \beta/\tau_s}{\left[\frac{1}{\tau_p} \left(\sigma_s P_0 + \beta/\tau_s \right) - \omega^2 \right] + j\omega \left[\frac{1}{\tau_p} + \sigma_s P_0 \right]}$$

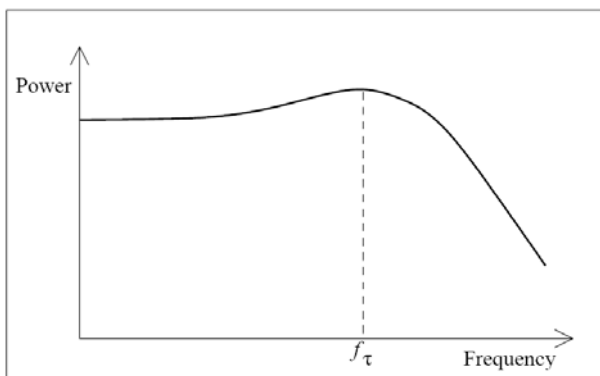
Όπου P η πυκνότητα φωτονίου στην κοιλότητα του laser, σ_s μια συλλογή σταθερών που περιγράφουν την ισχύ της οπτικής αλληλεπίδρασης, τ_s ο χρόνος ζωής των φορέων αυθόρμητης επανασύνδεσης, τ_p ο χρόνος ζωής του φωτονίου, ο οποίος είναι ο μέσος χρόνος παραμονής στην κοιλότητα, P_0 η πυκνότητα φωτονίου στην σταθερή κατάσταση και β το κλάσμα της αυθόρμητης εκπομπής που ξεκινά την ακτινοβολία laser. Σε μεγάλες συχνότητες ο όρος ω^2 του παρονομαστή επικρατεί και η απόκριση μικρού σήματος του laser πέφτει ραγδαία μετά από μια κρίσιμη συχνότητα. Έτσι η κρίσιμη συχνότητα για διαμόρφωση έρχεται όταν ο παρονομαστής ελαχιστοποιείται.

$$f_\tau \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma_s P_0}{\tau_p}} = \sqrt{\frac{u_g g_0 \Gamma \eta_i (I - I_{th})}{qV}}$$

Όπου η_i η εσωτερική κβαντική απόδοση, Γ ο συντελεστής οπτικού περιορισμού, u_g η ταχύτητα ομάδας του φωτός, q το φορτίο του ηλεκτρονίου, V ο όγκος της ενεργούς περιοχής, $(I - I_{th})$ το ρεύμα διέλευσης πάνω από το κατώφλι και g_0 το διαφορικό κέρδος.

Το εύρος διαμόρφωσης του laser είναι ίσο με f_τ . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.44, η οπτική ισχύς που διαμορφώνεται από το ρεύμα, είναι επίπεδη σε χαμηλή συχνότητα, αλλά εμφανίζει αιχμή κοντά στην f_τ . Ο συντονισμός στην διαμόρφωση του laser, γνωστός και ως ταλάντωση χαλάρωσης, προκύπτει από την σύζευξη μεταξύ της έντασης και της πληθυσμιακής αναστροφής μέσω διεγερόμενης εκπομπής. Τέτοιες ταλαντώσεις

προκαλούν παραμόρφωση του εκπεμπόμενου παλμού και χρειάζεται κάποιος χρόνος για να αποκατασταθεί.



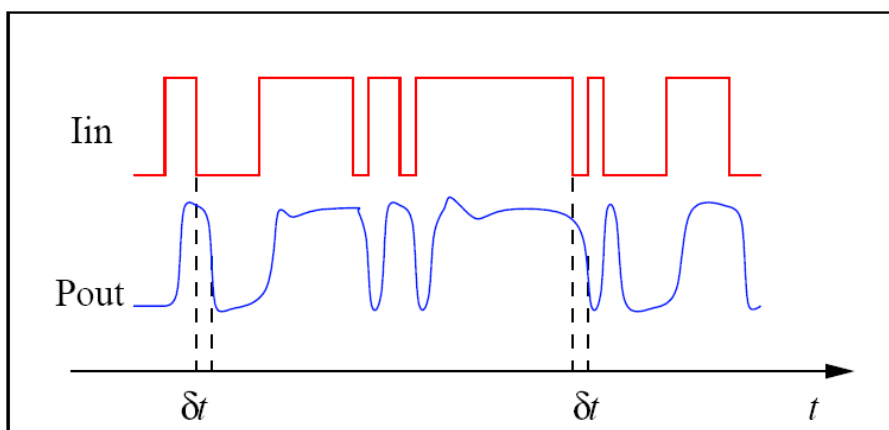
Σχήμα 2.44 : Ισχύς εξόδου συναρτήσει της συχνότητας και f_τ η συχνότητα χαλάρωσης

Η προηγούμενη σχέση προτείνει τρεις τρόπους για την αύξηση του εύρους διαμόρφωσης του laser. Ο ένας είναι η αύξηση του συντελεστή οπτικού κέρδους σ_s , ο άλλος αυξάνοντας την πυκνότητα φωτονίου P_0 και ο τρίτος η μείωση του χρόνου ζωής τ_p του φωτονίου.

Ο συντελεστής του κέρδους μπορεί να αυξηθεί ψύχοντας το διοδικό laser από θερμοκρασία δωματίου σε -196°C . Για να αυξήσουμε την πυκνότητα των φωτονίων πρέπει να αυξηθεί η ανακλαστικότητα της κοιλότητας του διοδικού laser, το οποίο οδηγεί σε μικρότερο ρεύμα κατωφλίου. Ο τρίτος τρόπος αύξησης του εύρους διαμόρφωσης είναι η μείωση του μήκους της κοιλότητας του laser. Παρ' όλα αυτά η μέγιστη συχνότητα αυξάνεται παίρνοντας την τετραγωνική ρίζα των αλλαγών, έτσι δεν είναι εύκολο να κάνουμε δραματικές αλλαγές στην απόκριση συχνότητας.

2.6.2 Η καθυστέρηση διέγερσης

Όταν το διοδικό laser ενεργοποιείται, ξεκινά η παραγωγή φωτονίων με αυθόρμητη εκπομπή μέχρις ότου ο φορέας πυκνότητας φτάσει σε ένα κατώφλι. Τότε προκύπτει εξαναγκασμένη εκπομπή μετά από μια καθυστέρηση. Αυτή η καθυστέρηση απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.45 και προκαλεί το τρέμουλο στην έξοδο.



Σχήμα 2.45 : Η επίδραση της καθυστέρησης στα laser

Για ένα εφαρμοζόμενο παλμορεύμα έντασης I_p η χρονοκαθυστέρηση δίνεται από την σχέση :

$$\tau_d = \tau_{th} \left(\frac{I_p}{I_p + I_b - I_{th}} \right)$$

Όπου I_b το ρεύμα διέλευσης, I_{th} το ρεύμα κατωφλίου και τ_{th} η καθυστέρηση στο κατώφλι. Η σχέση αυτή υποδηλώνει ότι ο χρόνος καθυστέρησης θα μειωθεί αν χρησιμοποιήσουμε μεγάλο ρεύμα διαμόρφωσης σε διοδικό laser με μικρό ρεύμα κατωφλίου. Έτσι για γρήγορη απόκριση θα πρέπει το διοδικό laser να πολώνεται λίγο πάνω από το ρεύμα κατωφλίου για την αποφυγή αυτής ακριβώς της χρονοκαθυστέρησης διέγερσης.

2.6.3 Μετατόπιση συχνότητας

Καθώς οι παλμοί γίνονται στενότεροι με την αύξηση του bit rate, η χρωματική διασπορά, δηλαδή η αλλαγή του δείκτη διάθλασης με το μήκος κύματος, γίνεται σημαντική και παίζει συγκεκριμένο ρόλο στον περιορισμό της απόδοσης ενός συστήματος οπτικής επικοινωνίας. Όταν το ρεύμα διέλευσης του διοδικού laser διαμορφώνεται, διαμορφώνεται επίσης και το μήκος κύματος μέσω της ισχύος εξόδου του laser. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μετατόπιση συχνότητας. Η κύρια συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι η διεύρυνση του φάσματος του φωτός, οδηγώντας σε αξιόλογη διασπορά στις οπτικές ίνες που μεταφέρουν τέτοια σήματα, και με αυτό τον τρόπο την δημιουργία διασυμβολικών παρεμβολών. Αυτή η διεύρυνση του φάσματος σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των οπτικών ινών, περιορίζει την απόσταση μετάδοσης στις υψηλές συχνότητες. Παρακάτω δίνεται μια προσεγγιστική εξίσωση για την μετατόπιση :

$$\Delta\nu(t) = \frac{\alpha}{4\pi} \left(\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} + \kappa P(t) \right)$$

Όπου $\kappa = 2\Gamma\epsilon/V\eta_d h\nu$, με η_d την διαφορική κβαντική απόδοση, h την σταθερά του Planck, ν την οπτική συχνότητα, α ο συντελεστής εύρους γραμμής εμπλουτισμού και ϵ ο συντελεστής μη γραμμικού κέρδους. Η σχέση αυτή υποδηλώνει ότι η μετατόπιση συχνότητας $\Delta\nu(t)$ ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της οπτικής ισχύος εξόδου $\frac{dP(t)}{dt}$.

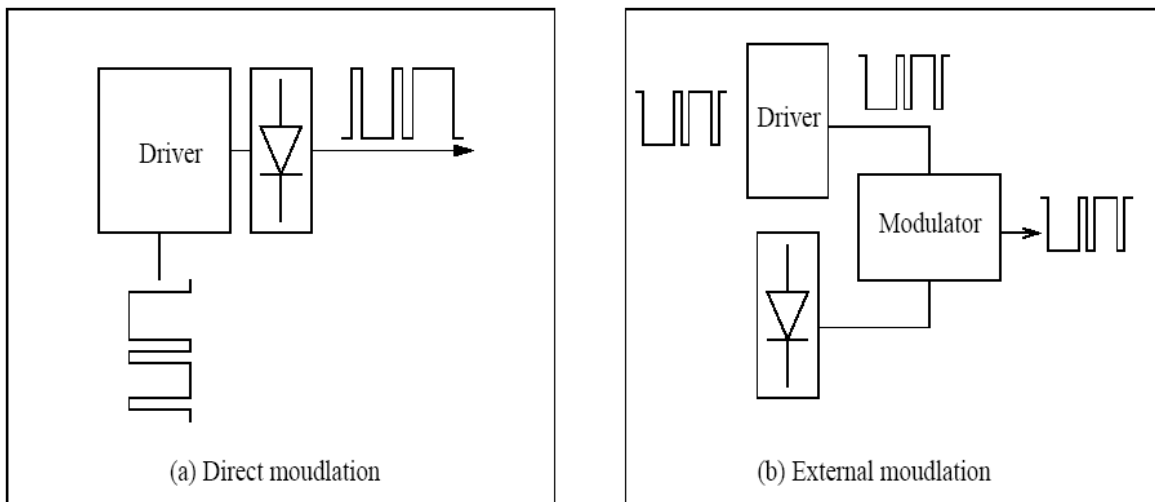
2.6.4 Πομπός laser

Σαν πομπός ενός διοδικού laser μπορεί να θεωρηθεί ένας απλός διακόπτης ρεύματος που ανταποκρίνεται σε ένα σήμα εισόδου διαμορφωμένο από μια ακολουθία δεδομένων. Όπως γνωρίζουμε η οπτική έξοδος ενός διοδικού laser εξαρτάται από το

ρεύμα εισόδου και όχι τόσο από την τάση, προσθέτοντας και το πλεονέκτημα ταχύτητας του διακόπτη ρεύματος, καταλήγουμε να οδηγούμε τα διοδικά laser με ρεύμα.

Γενικά, στα περισσότερα οπτικά συστήματα, η ηλεκτρο-οπτική διασύνδεση είναι ο παράγοντας περιορισμού της μέγιστης ταχύτητας του συστήματος. Επομένως οι οδηγοί laser και οι οπτικοί δέκτες είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την επίδοση του οπτικού συστήματος. Μια από τις προκλήσεις του κυκλώματος οδήγησης του laser είναι να εξαπολύει δεκάδες mA ρεύματος με πολύ μικρούς χρόνους ανόδου και καθόδου, μιας και το εύρος ζώνης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος εξόδου.

Τα κυκλώματα οπτικών πομπών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με την μέθοδο διαμόρφωσης. Το ένα είναι ο πομπός άμεσης διαμόρφωσης και αποτελείται από το laser και το κύκλωμα οδήγησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.46(a) τα δεδομένα εισόδου διαμορφώνονται κατευθείαν από το κύκλωμα οδήγησης και το διοδικό laser εκπέμπει φως ανάλογα με το λογικό '1' ή '0'.



Σχήμα 2.46 : Σχεδιάγραμμα διαμόρφωσης: a) άμεση διαμόρφωση και b) εξωτερική διαμόρφωση

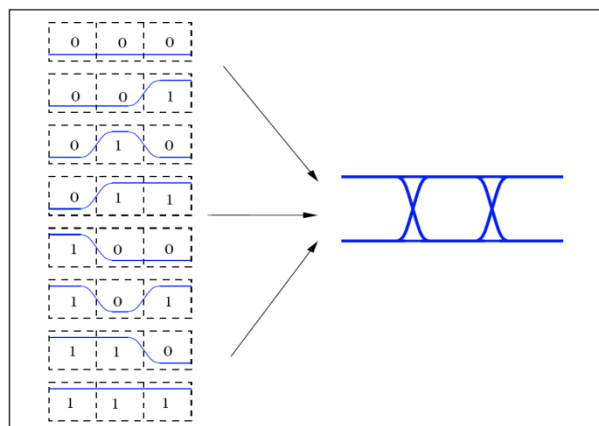
Καθώς όμως ο ρυθμός των δεδομένων αυξάνεται, το άμεσα διαμορφωμένο laser εμφανίζει ταλαντώσεις γνωστές και ως ταλαντώσεις χαλάρωσης.

Παρ' όλα αυτά ο σχεδιασμός έχει επικεντρωθεί στην άμεση διαμόρφωση λόγω των πλεονεκτημάτων που παρέχει, όπως το χαμηλό κόστος, η μικρή κατανάλωση ενέργειας και η απλή δομή. Επιπλέον πολλές τεχνικές για να ξεπεραστούν τα προβλήματα σχετικά με την άμεση διαμόρφωση έχουν αναφερθεί, όπως για την μείωση της μετατόπισης συχνότητας, και την καταστολή των ταλαντώσεων χαλάρωσης με την τροποποίηση του υλικού των laser. Έτσι για ένα σύστημα μετάδοσης με ρυθμό 10Gbps μικρής απόστασης, δίνεται έμφαση στην άμεση διαμόρφωση.

Ο άλλος τύπος του οπτικού πομπού διαμορφώνεται εξωτερικά και αποτελείται από το laser, το κύκλωμα οδήγησης και έναν εξωτερικό διαμορφωτή ο οποίος μπορεί να επιτύχει χαμηλότερη διακύμανση συχνότητας ή ακόμα και αρνητική διακύμανση για την υποστήριξη της διασποράς της οπτικής ίνας. Η εξωτερική διαμόρφωση μπορεί να έχει υψηλότερο κέρδος και χαμηλότερο θόρυβο ζεύξης αλλά χρειάζεται μεγαλύτερης ισχύος laser, μεγαλύτερη τάση τροφοδοσίας και είναι πιο δαπανηρό. Σε αυτό το σχέδιο διαμόρφωσης, απεικονιζόμενο και στο παραπάνω Σχήμα 2.46(b), το laser διατηρείται σε σταθερή εκπομπή ισχύος και ο εξωτερικός διαμορφωτής διαμορφώνει το ρεύμα εξόδου συναρτήσει μιας εξωτερικής τάσης.

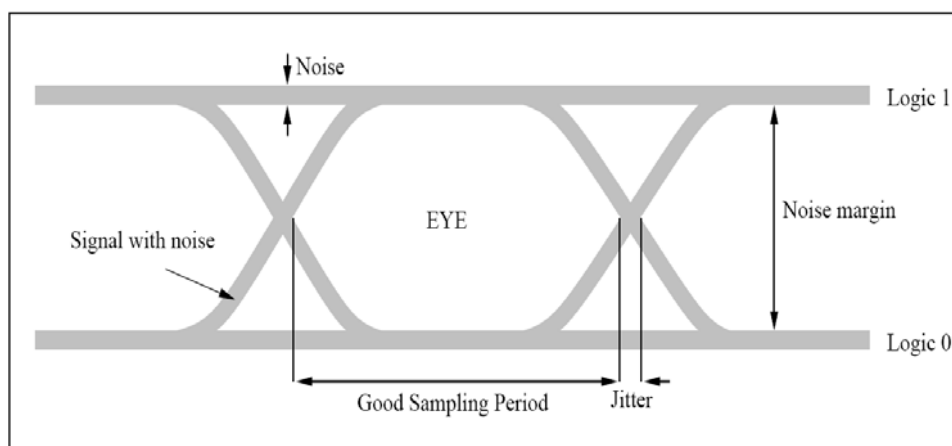
2.6.5 Το οφθαλμικό διάγραμμα μετάδοσης

Το οφθαλμικό διάγραμμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.47, είναι μια επικάλυψη πολλών μεταδιδόμενων μήκων κύματος, των οποίων η μορφή μοιάζει με ανθρώπινο μάτι. Χρησιμοποιώντας ένα σήμα ρολογιού για τον σκανδαλισμό της εισόδου του παλμογράφου, η μεταδιδόμενη κυματομορφή μπορεί να δειγματοληφθεί σε όλο το χνάρι δεδομένων παραγόμενο από την πομπή. Κατά συνέπεια όλες οι διάφορες bit ακολουθίες που συναντώνται μπορούν να δειγματοληφθούν για να αναπτυχθεί το οφθαλμικό διάγραμμα.



Σχήμα 2.47 : Διάφορες λογικές ακολουθίες και το αντίστοιχο οφθαλμικό διάγραμμα

Το οφθαλμικό διάγραμμα επομένως μπορεί να αναλύσει την σημαντική πληροφορία της μεταδιδόμενης εξόδου. Το ύψος του ανοίγματος του κεντρικού ματιού μετρά το περίγραμμα θορύβου, με συνέπεια αυτό το κατακόρυφο άνοιγμα να προσδιορίζει την ποιότητα του σήματος. Ένα πολύ καθαρό σήμα θα έχει ένα μεγάλο καθαρό μάτι και ένα θορυβώδες χαμηλής ποιότητας σήμα θα έχει ένα μικρότερο και κλειστό. Προφανώς όσο πιο ανοιχτό είναι το μάτι τόσο πιο εύκολο θα είναι για τον δέκτη ο καθορισμός των λογικών καταστάσεων.



Σχήμα 2.48 : Τα χαρακτηριστικά του οφθαλμικού διαγράμματος

Μετρώντας το πάχος της γραμμής του σήματος στην κορυφή και τον πάτο του ματιού, μπορούν να αναλυθούν η παραμόρφωση και ο θόρυβος του σήματος εξόδου. Η απόκλιση του σημείου διασταύρωσης από την ιδανική θέση στο χρόνο (jitter), είναι η αιτία το μάτι κλείνει στις οριζόντιες διευθύνσεις. Αυτό υπολογίζεται μετρώντας το πλάτος του σήματος στη γωνία του ματιού. Επίσης το οφθαλμικό διάγραμμα μπορεί να μετρήσει τους χρόνους ανόδου και καθόδου του σήματος, μετρώντας τον χρόνο μετάβασης από την κορυφή στην βάση του ματιού.

2.7 Οδήγηση με ολοκληρωμένα κυκλώματα IC (Integrated Circuits)

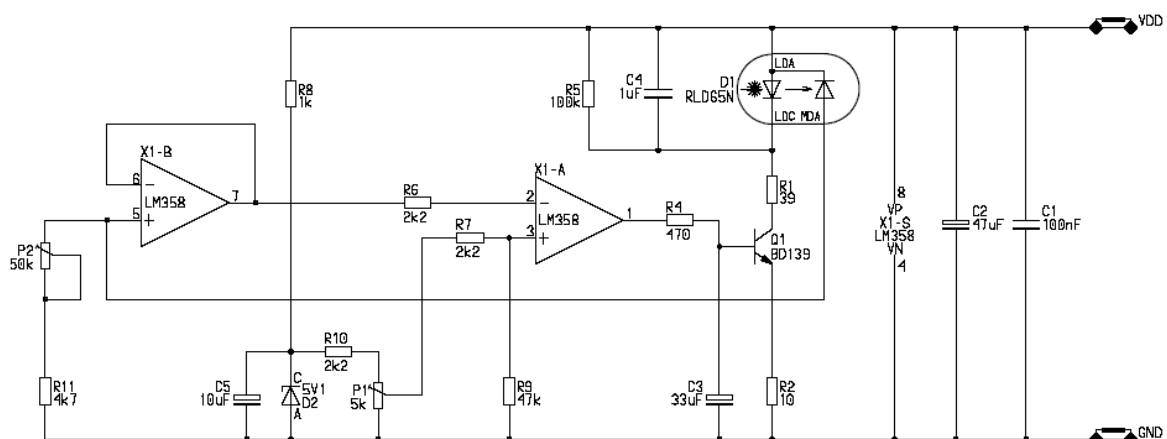
Στα διοδικά laser χαμηλής ισχύος, ο σχεδιαστής έχει την επιλογή ενός κλασικού κυκλώματος οδήγησης με διακριτά εξαρτήματα, ή την επιλογή ενός πλήρως ολοκληρωμένου κυκλώματος οδήγησης. Συχνά το κόστος των εξαρτημάτων είναι ο βασικός παράγοντας για την επιλογή του κυκλώματος οδήγησης χωρίς να εξεταστεί το συνολικό κόστος της σχεδίασής του, οδηγώντας έτσι στον έλεγχο και την συντήρησή του καθ' όλη την διάρκεια της ζωής του. Οι παράγοντες κλειδιά που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη είναι :

- Ευστάθεια της ισχύος εξόδου σε όλο το εύρος μεταβολών της τάσης και της θερμοκρασίας
- Αξιοπιστία
- Απαιτήσεις χώρου και προστασία του laser
- Κόστος συναρμολόγησης, ελέγχου και ρύθμισης
- Χρόνος σχεδίασης και ελέγχου του κυκλώματος
- Απόκτηση εξαρτημάτων και κόστος μεταφοράς
- Πιθανή εγγύηση με απαίτηση κόστους

Συχνά αγνοείται πως το πιο ακριβό εξάρτημα ενός συστήματος laser είναι το ίδιο το laser. Γι' αυτό η προστασία του είναι μια καλή επένδυση παρ' όλο το κόστος εξαρτημάτων που θα αποφέρει στο κύκλωμα οδήγησης.

2.7.1 Διακριτό κύκλωμα οδήγησης εναντίον ολοκληρωμένου

Πολλοί κατασκευαστές διοδικών laser παρέχουν εγχειρίδια εφαρμογών που προτείνουν κυκλώματα οδήγησης για τον έλεγχο των διοδικών τους laser. Στο Σχήμα 2.49 απεικονίζεται ένα τυπικό διακριτό APC κύκλωμα οδήγησης, με τάση τροφοδοσίας 6 με 12V για λειτουργία συνεχόμενου κύματος (CW).

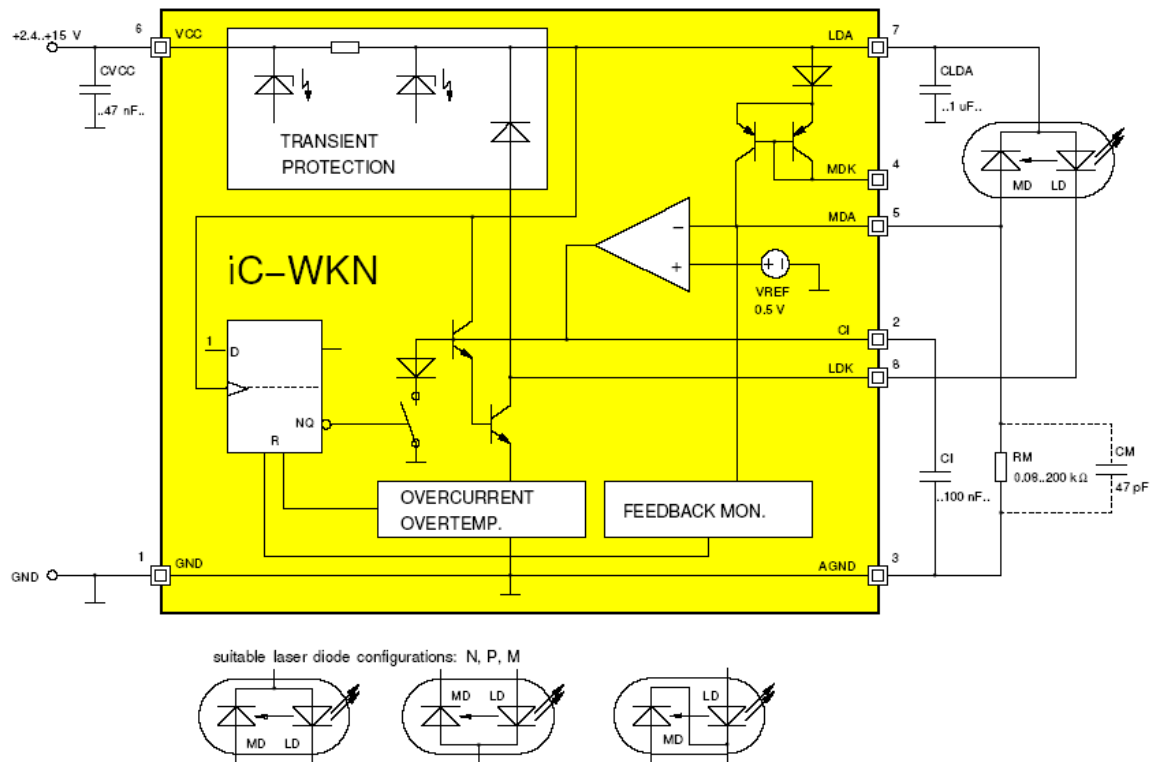


Σχήμα 2.49 : Τυπικό διακριτό κύκλωμα οδήγησης διοδικού laser

Σε αυτή την περίπτωση ο γενικής χρήσης τελεστικός ενισχυτής μαζί με την δίοδο zener, ένα τρανζίστορ και 17 παθητικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της οπτικής

ισχύος εξόδου. Το κύκλωμα απαιτεί περίπου 6 cm^2 χώρο σε μια πλακέτα και δεν παρέχει προστασία ανάστροφης πολικότητας και βλάβης του διοδικού laser. Ο χρόνος εκκίνησης στην προκειμένη περίπτωση είναι 20 ms.

Στο Σχήμα 2.50 παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο APC κύκλωμα οδήγησης (iC – WKN) της IC Haus για λειτουργία συνεχόμενου κύματος, με ρεύμα οδήγησης έως 300mA και τάση τροφοδοσίας από 2.4 έως 15V.

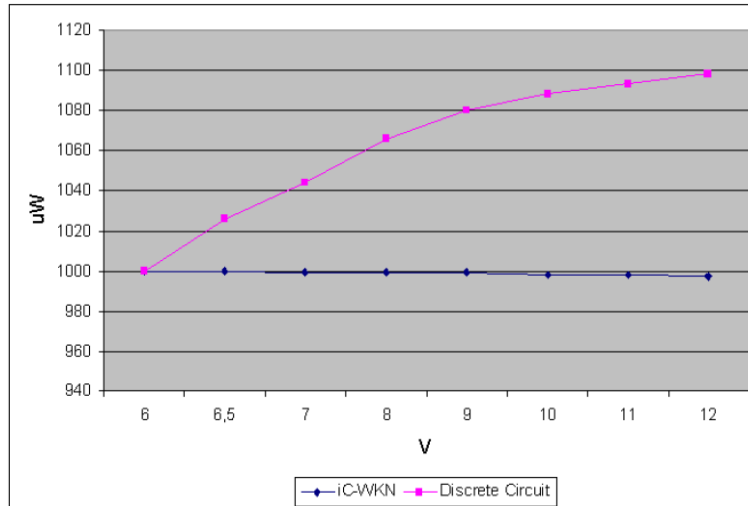


Σχήμα 2.50 : Ολοκληρωμένο κύκλωμα οδήγησης διοδικού laser

Απαιτούνται μόνο τέσσερα επιπλέον παθητικά στοιχεία για την υλοποίηση του ολόκληρου κυκλώματος οδήγησης.

Με περίπου 1.25 cm^2 απαιτούμενο χώρο στην πλακέτα, είναι 4 φορές μικρότερο από το διακριτό κύκλωμα οδήγησης. Περιλαμβάνει προστασία ανάστροφης πολικότητας, ενσωματωμένο κύκλωμα διακοπής λειτουργίας λόγω υπερέντασης και υπερθέρμανσης. Ακόμα περιλαμβάνει κύκλωμα ομαλής εκκίνησης με χρόνο 70μs. Επίσης προστατεύει το laser από παρεμβολές και κρατά την οπτική ισχύ σταθερή σε ένα ευρύ φάσμα τάσεως τροφοδοσίας και θερμοκρασίας.

Το διάγραμμα στο Σχήμα 2.51 είναι αποτέλεσμα μετρήσεων της σταθερότητας της οπτικής ισχύος εξόδου συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας (6 με 12V) και για τα δύο κυκλώματα.



Σχήμα 2.51 : Η παρέκκλιση της οπτικής ισχύος εξόδου για το διακριτό και το ολοκληρωμένο κύκλωμα

Το κύκλωμα με τα διακριτά στοιχεία έχει μια απόκλιση ισχύος εξόδου της τάξης του 10% για το δοθέν εύρος τάσης τροφοδοσίας, ενώ το ολοκληρωμένο κύκλωμα παρουσιάζει μια απόκλιση μικρότερη του 1.5%.

Για του λόγου το αληθές πρέπει αν λάβουμε υπ' όψη πως το διακριτό κύκλωμα απαιτεί 46 ενώσεις κόλλησης στην πλακέτα, ενώ το ολοκληρωμένο μόνο 17. Ο πάνω από το διπλάσιο αριθμός κολλήσεων και ο 4 φορές μεγαλύτερος αριθμός παθητικών στοιχείων, έχουν άμεσο αντίκτυπο στο διακριτό κύκλωμα. Συγκρίνοντας κάποιος το τελικό κόστος κατασκευής των δύο κυκλωμάτων, θα πρέπει να λάβει υπ' όψη τα εξής :

- Εξαρτήματα
- Συναρμολόγηση
- Ρύθμιση και έλεγχος
- Κόστος απόκτησης εξαρτημάτων
- Κόστος μεταφοράς
- Πιθανή εγγύηση με απαίτηση κόστους

Λαμβάνοντας υπ' όψη μόνο το κόστος των εξαρτημάτων που χρειάζονται, το ολοκληρωμένο κύκλωμα είναι δύο φορές πιο ακριβό απ' ότι το διακριτό. Αλλά ο μεγάλος αριθμός των στοιχείων στο διακριτό κύκλωμα αυξάνει το κόστος συναρμολόγησης, όπως και τα δύο ποτενσιόμετρα ρύθμισης της εξόδου. Σε αυτή την περίπτωση, συναρμολόγηση, ρύθμιση και έλεγχος ανεβάζουν το κόστος πολύ πιο πάνω απ' ότι το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Κατά συνέπεια το κόστος των δύο κυκλωμάτων αντισταθμίσει το ένα το άλλο. Παρ' όλα αυτά το κόστος του iC-WKN σε αξιοπιστία, σταθερότητα και προστασία του διοδικού laser, νικά κατά κράτος. Σημασία πρέπει επίσης να δοθεί και στην υψηλή ευαισθησία του διακριτού κυκλώματος στις πεδιακές παρεμβολές λόγω του μεγάλου αριθμού στοιχείων και κολλήσεων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορές στα δύο κυκλώματα.

Παράμετρος Σύγκρισης	Διακριτό κύκλωμα	Ολοκληρωμένο κύκλωμα
Σταθερότητα Ισχύος Οπτικής Εξόδου (6 – 12V)	περίπου 10%	< 1.5%
Αριθμός απαιτούμενων εξαρτημάτων	1 x Τελεστικός ενισχυτής 1 x zener 17 x παθητικά στοιχεία	1 x iC-WKN 4 x παθητικά στοιχεία
Απαιτούμενος χώρος στην πλακέτα	περίπου 6cm ²	περίπου 1.25cm ²
Σχετικό Κόστος		
Εξαρτήματα	1	2
Συναρμολόγηση	2	1
Ρύθμιση και έλεγχος	2	1
Προστασία ανάστροφης πολικότητας	OXI	NAI
Προστασία παρεμβολών	OXI	NAI
Διακοπή υπερέντασης	OXI	NAI
Διακοπή υπερθέρμανσης	OXI	NAI
Χρόνος εκκίνησης	περίπου 20ms	περίπου 70μs

2.7.2 Οδήγηση διοδικών laser με ολοκληρωμένα κυκλώματα της iC-Haus

Τα πλεονεκτήματα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων οδήγησης έναντι των διακριτών είναι προφανή. Στο Σχήμα 2.52 παρουσιάζονται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης διοδικών laser της εταιρείας iC-Haus. Τα οποία δε, προτείνονται από πολλές εταιρείες κατασκευής διοδικών laser για την οδήγησή του όπως η Laser Components, η Sanyo Electric κ.α.

Laser Diode Drivers		LD pinout	Package	OTR
Laser Switch, burst/transient protection, thermal shutdown, high-speed spike-free switching				
iC-HK iC-HKB	CW to 155 MHz, dual lowside current sink, dual enable inputs, 4 power levels adjustable up to 300 mAdc, 1.4 Apeak, tr/ft 1ns, 3.5 to 5.5 V (iC-HKB: for blue laser diodes)	N, M, P	S08Ntp, MSOP8tp	I
Digital Laser Power Calibration Potentiometer				
iC-HL	Logarithmic 1024-tap 350 Ω to 80 kΩ digital potentiometer with non-volatile memory, serial programming interfaces (1-wire, optical, up/down), 3.3 to 5 V		TSSOP8	C (+)
Power Controllers, adjustable averaging APC, soft-start, burst/transient protection, thermal shutdown, undervoltage lockout				
iC-NZ	CW to 155 MHz, adjustable peak-value APC (4 levels), 3x 100 mAdc, 3x 700 mApeak, tr/ft 1.5 ns, overcurrent reset, thermal shutdown, safety monitor diode input, single failure proof, self test, 3.5 to 5.5 V	N, M, P	QFN28 5x5	I
iC-VJ iC-VJZ	Pulse Transmitter, 1...200 kHz, duty cycle 50 %, laser current 250 mA, 5 V	N, M	S016N	I
iC-WJB	CW to 300 kHz, input watchdog, 100 mA, reverse polarity protection, 2.7 to 6 V	N, M	S08N, MSOP8	I
iC-WJ iC-WJZ	CW to 300 kHz, input watchdog, 250 mA, 5 V	N, M	S08N, MSOP8	I
CW Power Controllers, adjustable averaging APC, soft-start, burst/transient protection, thermal shutdown				
iC-WK iC-WKL	CW to 70 mA (to 4 A by ext. transistor), quick start, 1 % accuracy, fail-safe, overcurrent lockout, reverse polarity protection, 2.4 to 6 V	N, M, P	S08N, MSOP8	A
iC-WKM iC-WKN iC-WKP	CW to 350 mA, 3 % accuracy, fail-safe, overcurrent lockout, reverse polarity protection, low Rth package, 3.6 to 15 V	M, N, P N, M, P P, N	S08Ntp, DFN10 4x4	A

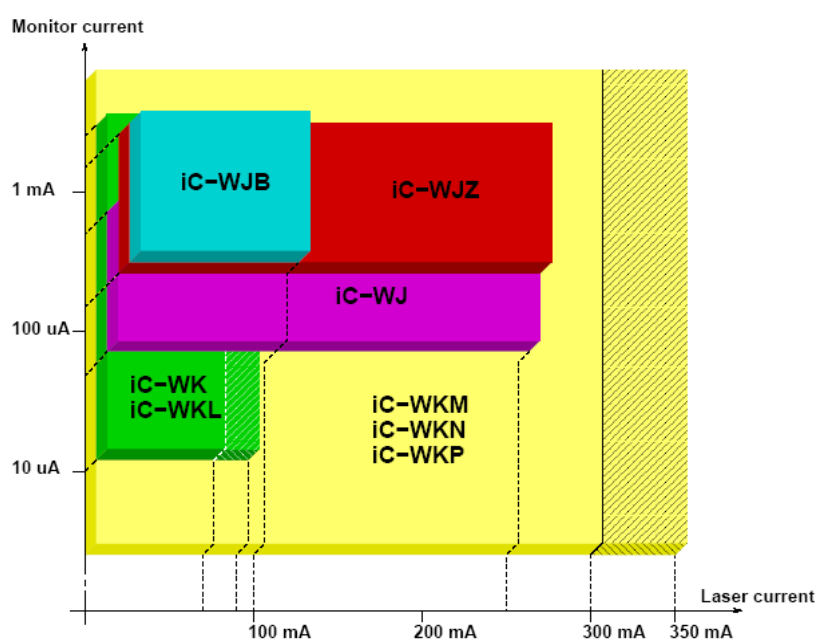
Σχήμα 2.52 : Ολοκληρωμένα κυκλώματα οδήγησης διοδικών laser της iC-Haus

Επιλέγοντας την κατάλληλη διάταξη οδήγησης για ένα διοδικό laser, πρέπει να λάβουμε υπ' όψη τα παρακάτω κριτήρια :

- Η ύπαρξη ενσωματωμένης φωτοδιόδου
- Το pin-out του διοδικού laser
- Το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας του laser
- Το εύρος του ρεύματος της φωτοδιόδου
- Λειτουργία συνεχόμενου κύματος (CW) ή παλμική
- Το εύρος της συχνότητας του παλμού
- Σταθερός ή μεταβλητός κύκλος εργασίας

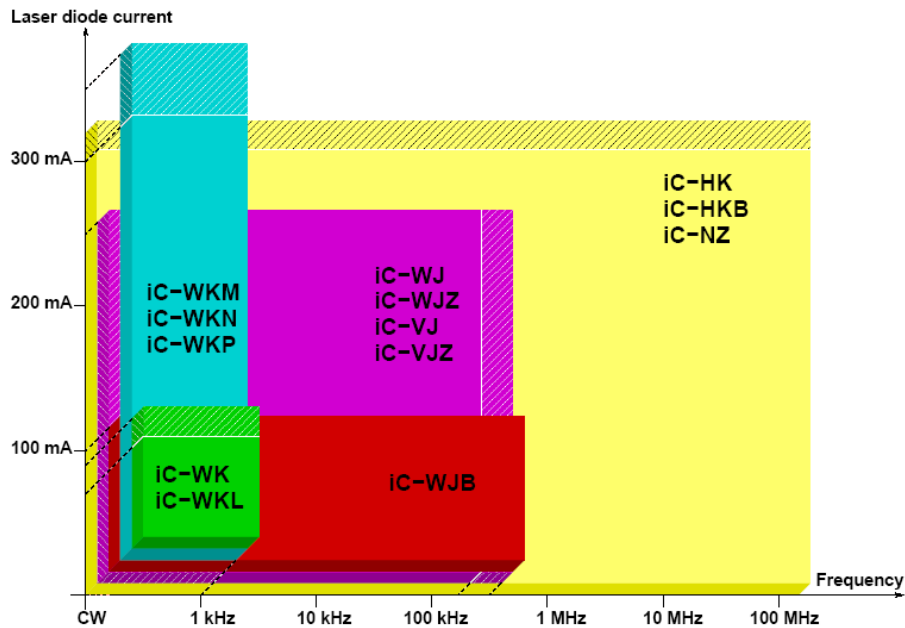
Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα της εταιρείας iC-Haus έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία APC με τον έλεγχο του φωτορεύματος της φωτοδιόδου, εκτός του ολοκληρωμένου κυκλώματος iC-HK το οποίο οδηγεί μόνο την δίοδο laser με ρεύμα υψηλής συχνότητας. Το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας του διοδικού laser καθορίζει τις απαιτήσεις οδήγησης που το κάθε ολοκληρωμένο θα πρέπει να διαθέτει.

Το εύρος ρύθμισης του ρεύματος φωτοδιόδου θα πρέπει επίσης να μπορεί να επεξεργαστεί από το ολοκληρωμένο κύκλωμα επιλογής. Ξεπερνώντας το επιτρεπόμενο εύρος του ρεύματος φωτοδιόδου δεν βλάπτει ούτε το laser ούτε το IC αλλά την ακρίβεια ελέγχου. Το Σχήμα 2.53 μας δείχνει το εύρος ρεύματος του laser και της φωτοδιόδου σε λειτουργία CW.



Σχήμα 2.53 : Το εύρος ρευμάτων laser και φωτοδιόδου σε λειτουργία CW

Ο τρόπος λειτουργίας (CW ή παλμικά), η συχνότητα παλμού (σταθερή ή μεταβλητή) και ο κύκλος εργασίας (σταθερός ή μεταβλητός), καθορίζουν αν ο απλός έλεγχος του μέσου όρου είναι ικανοποιητικός, ή αν υπάρχει ανάγκη για έλεγχο κάθε παλμού ξεχωριστά. Στο Σχήμα 2.54 παρουσιάζεται το εύρος συχνότητας και ρεύματος λειτουργίας που καλύπτουν τα ολοκληρωμένα της iC-Haus.



Σχήμα 2.54 : Το εύρος συχνότητας συναρτήσσει του ρεύματος οδήγησης

2.7.2.1 Λειτουργία συνεχόμενου κύματος (CW)

Σε απλή λειτουργία συνεχόμενου κύματος ο έλεγχος του μέσου όρου της οπτικής ισχύος είναι απόλυτα ικανοποιητικός. Η σταθερότητα λαμβάνεται όταν το σήμα οπτικής εξόδου δεν σημειώνει καμία αξιοσημείωτη ανύψωση πάνω από το όριο λειτουργίας που έχουμε θέσει, όταν ενεργοποιούμε το κύκλωμα.

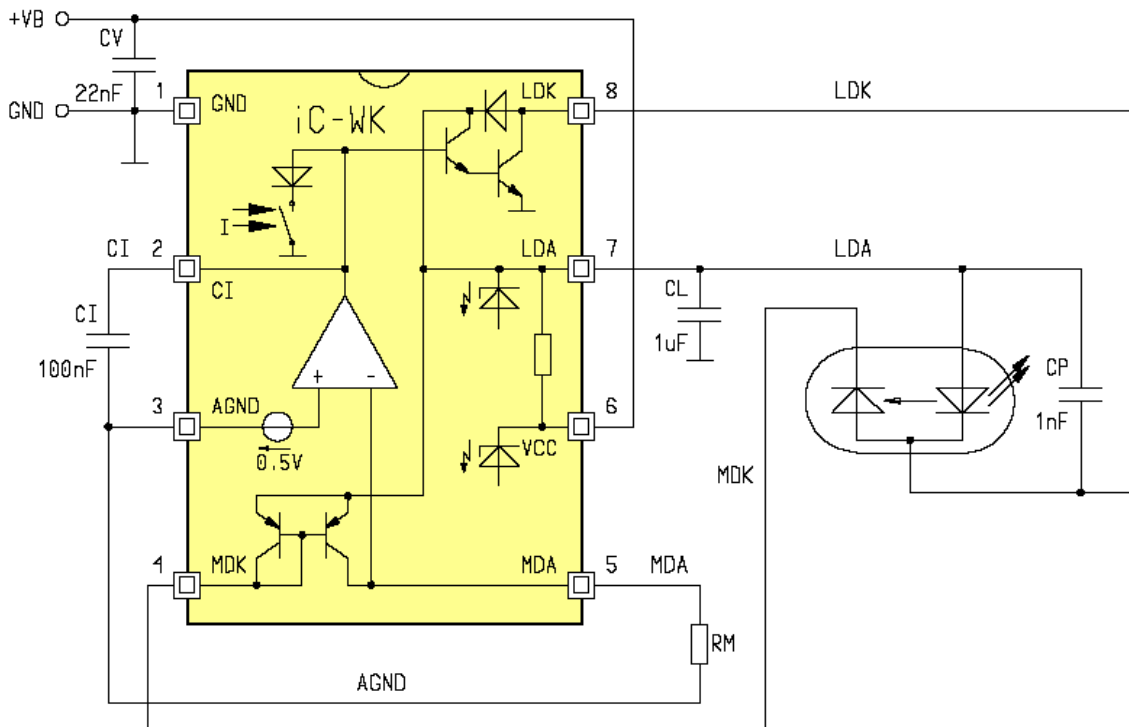
Στο παρακάτω παράδειγμα θα οδηγήσουμε ένα P-type διοδικό laser της Sanyo (DL-3147-260) με μέγιστο ρεύμα λειτουργίας 45mA στη μέγιστη οπτική ισχύ των 7mW. Γι' αυτή την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο iC-WK/L, αλλά αν θέλουμε το περίβλημα του διοδικού laser (το κοινό ποδαράκι του laser και της φωτοδιόδου) να συνδεθούν στην γείωση για λόγους ευκολίας ή και για καλύτερη θερμική απαγωγή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ολοκληρωμένο iC-WKP.

Το iC-WK/L οδηγεί διοδικά laser με συνεχόμενο κύμα. Έχει εύρος τάσης τροφοδοσίας 2.4 με 6V απαιτώντας το λιγότερο 2 μπαταρίες και παρέχει κύκλωμα προστασίας ανάστροφης τάσης τροφοδοσίας αποτρέποντας έτσι την καταστροφή του διοδικού laser ή του ολοκληρωμένου.

Περιλαμβάνει κύκλωμα προστασίας ηλεκτροστατικής εκκένωσης (ESD), υπερθέρμανσης, υπερέντασης και κύκλωμα ομαλής εκκίνησης το οποίο προστατεύει το laser όταν ανοιχτεί η τροφοδοσία. Επίσης φιλτράρει την τροφοδοσία του laser για παρεμβολές. Η ισχύς τροφοδοσίας ρυθμίζεται και προσαρμόζεται στο διοδικό laser μέσω μιας εξωτερικής αντίστασης στον ακροδέκτη MDA. Το ρεύμα φωτοδιόδου δρα σαν αναφορά και ρυθμίζεται ανεξάρτητα της επίδρασης της θερμοκρασίας και της τάσης τροφοδοσίας. Ο πυκνωτής C1 καθορίζει το έλεγχο των σταθερών χρόνου και χρόνου

εκκίνησης. Μια δεύτερη είσοδος ελέγχου (ακροδέκτης MDK) επιτρέπει την οδήγηση διοδικών laser με διαφορετικό pin-out, εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος αναλογικής διαμόρφωσης (από DC μέχρι λίγα KHz).

Σε περίπτωση βλάβης όπως λόγω χάρη υπερέντασης στη δίοδο laser, τότε ενεργοποιείται ένα κλείδωμα ισχύος. Η διακοπή λειτουργίας συνεχίζεται έως ότου ξαναεφαρμοστεί ισχύς μέσω επανεκκίνησης.



Σχήμα 2.55 : Το iC-WK οδηγεί το διοδικό laser DL-3147-260

CI : πυκνωτής ολοκλήρωσης, η τιμή του ορίζεται εμπειρικά και είναι ικανοποιητική αν η οπτική έξοδος δεν υπερβεί τα όρια κατά την ενεργοποίηση.

CL : πυκνωτής back-up. Η τιμή του δεν είναι κρίσιμη, μπορεί να αυξηθεί για μεγαλύτερη ευστάθεια.

CP : προαιρετικός, απαραίτητος μόνο όταν η σύνδεση της εξόδου και του διοδικού laser είναι μεγάλη σε μήκος.

CV : πυκνωτής φραγής, η τιμή του δεν είναι κρίσιμη.

RM : ρύθμιση ισχύος, $RM = 0.5V/I_m$, με I_m το ρεύμα της φωτοδίοδου στην απαιτούμενη ισχύ.

Η αντίσταση RM χρησιμοποιείται για την ρύθμιση του σημείου λειτουργίας και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

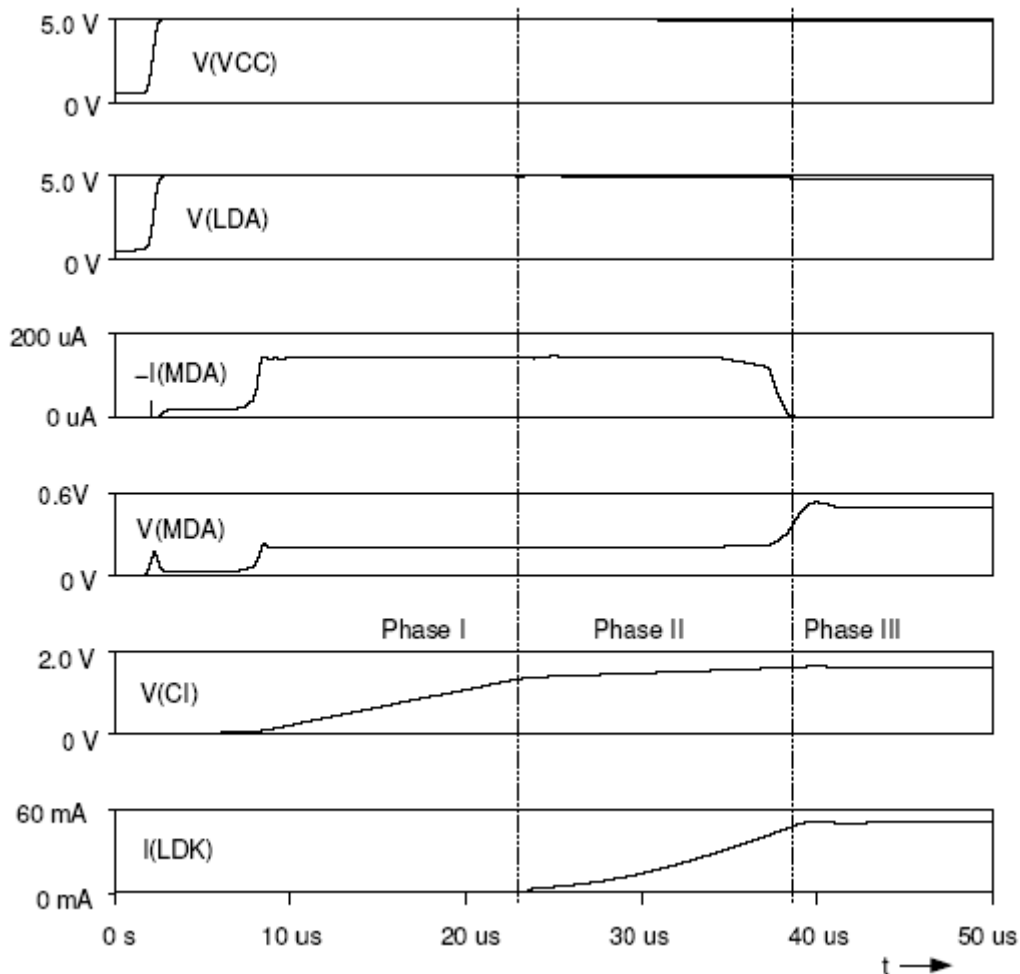
$$RM_{\min} = \frac{V(MDA)}{I_{m_{\text{nom}_{\max}}}} \cdot \frac{P_{\text{nom}}}{P_{\text{set}}}$$

$$RM_{\max} = \frac{V(MDA)}{I_{m_{\text{nom}_{\min}}}} \cdot \frac{P_{\text{nom}}}{P_{\text{set}}}$$

Όπου $I_{m_{nom_{min}}}$ και $I_{m_{nom_{max}}}$ το εύρος ρεύματος της φωτοδιόδου στην ονομαστική οπτική ισχύ, όπως αναγράφεται στα φύλλα δεδομένων του διοδικού laser και P_{set} η ισχύ που έχουμε καθορίσει.

Συμπεριφορά ενεργοποίησης (turn-on) :

Μετά την ενεργοποίηση της τάσης τροφοδοσίας, η οπτική έξοδος παραμένει εκτός λειτουργίας έως ότου το εσωτερικό flip-flop ενεργοποίησης διεγερθεί από μια επαρκώς υψηλή τάση στον ακροδέκτη LDA.



Σχήμα 2.56 : Συμπεριφορά εκκίνησης

Στην διάρκεια της φάσης 1 εμφανίζεται γρήγορη ομαλή εκκίνηση. Ο πυκνωτής ελέγχου CI φορτίζεται με ένα επιταχυνόμενο ρυθμό μέχρι η έξοδος να τροφοδοτήσει ρεύμα στο LDK. Μια τάση στον ακροδέκτη MDA χρησιμοποιείται για να καθορίσει την εξωτερική αντίσταση.

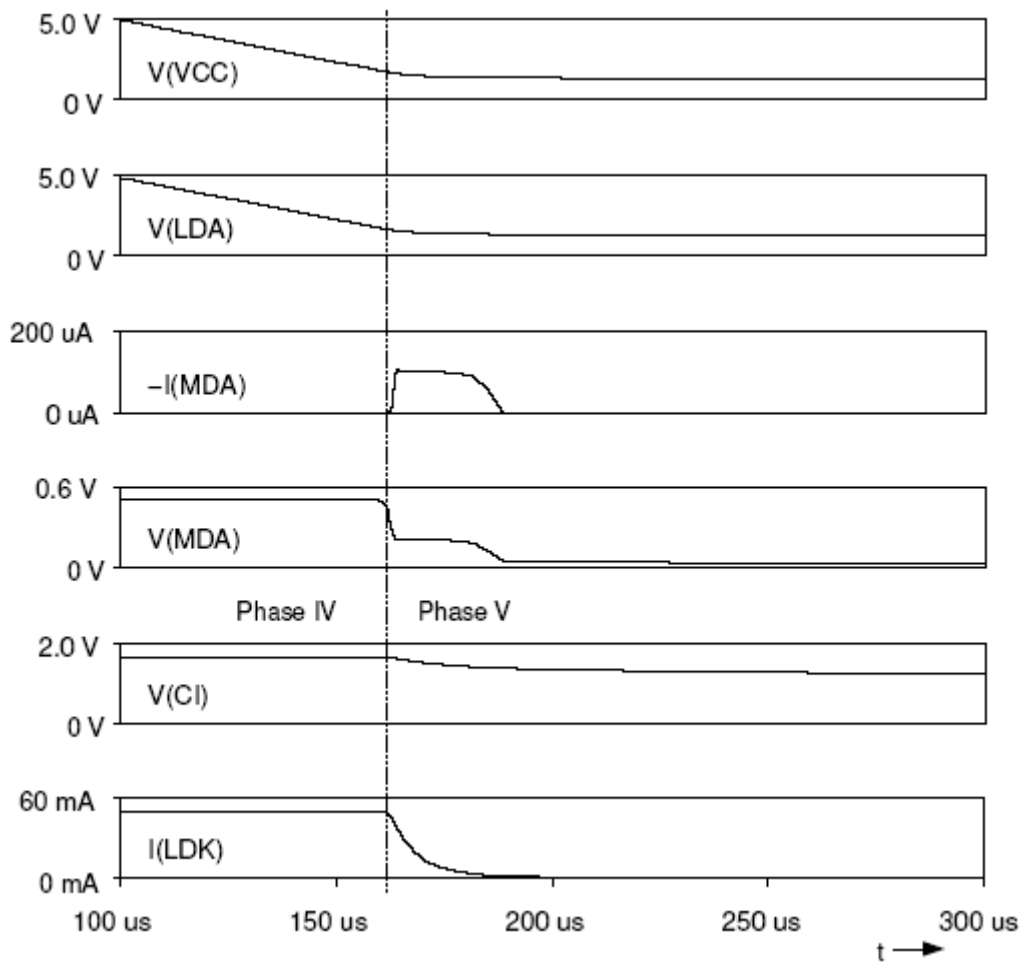
Στην φάση 2 ξεκινά η αρχική διεργασία όταν το ρεύμα ρέει στο LDK. Αυτή η φάση τελειώνει όταν το laser φτάσει στο κατώφλι ρεύματος και το παραγόμενο ρεύμα φωτοδιόδου αυξάνει το δυναμικό στην αντίσταση RM.

Η μετάβαση στην λειτουργία συνεχόμενου κύματος (φάση 3) είναι βαθμιαία και επηρεάζεται από τα στοιχεία CI και RM. Ο CI είναι κατάλληλα ρυθμισμένος όταν η τάση στο MDA βρίσκεται στο ελάχιστο.

Συμπεριφορά απενεργοποίησης (turn-off) :

Το ολοκληρωμένο iC-WK/L λειτουργεί χωρίς κύκλωμα προστασίας χαμηλής τάσης, παρ' όλα αυτά η τάση στα άκρα του laser είναι ο πρωταρχικός παράγοντας καθορισμού της τάσης τροφοδοσίας.

Αν η τάση αυτή πέσει το ρεύμα διέλευσης μειώνεται. Σε αυτή την περίπτωση το iC-WK/L εκφορτίζει τον πυκνωτή ελέγχου CI για να μην προκύψει υπερβολικό ρεύμα στο laser όταν η τάση τροφοδοσίας επανέρχεται.



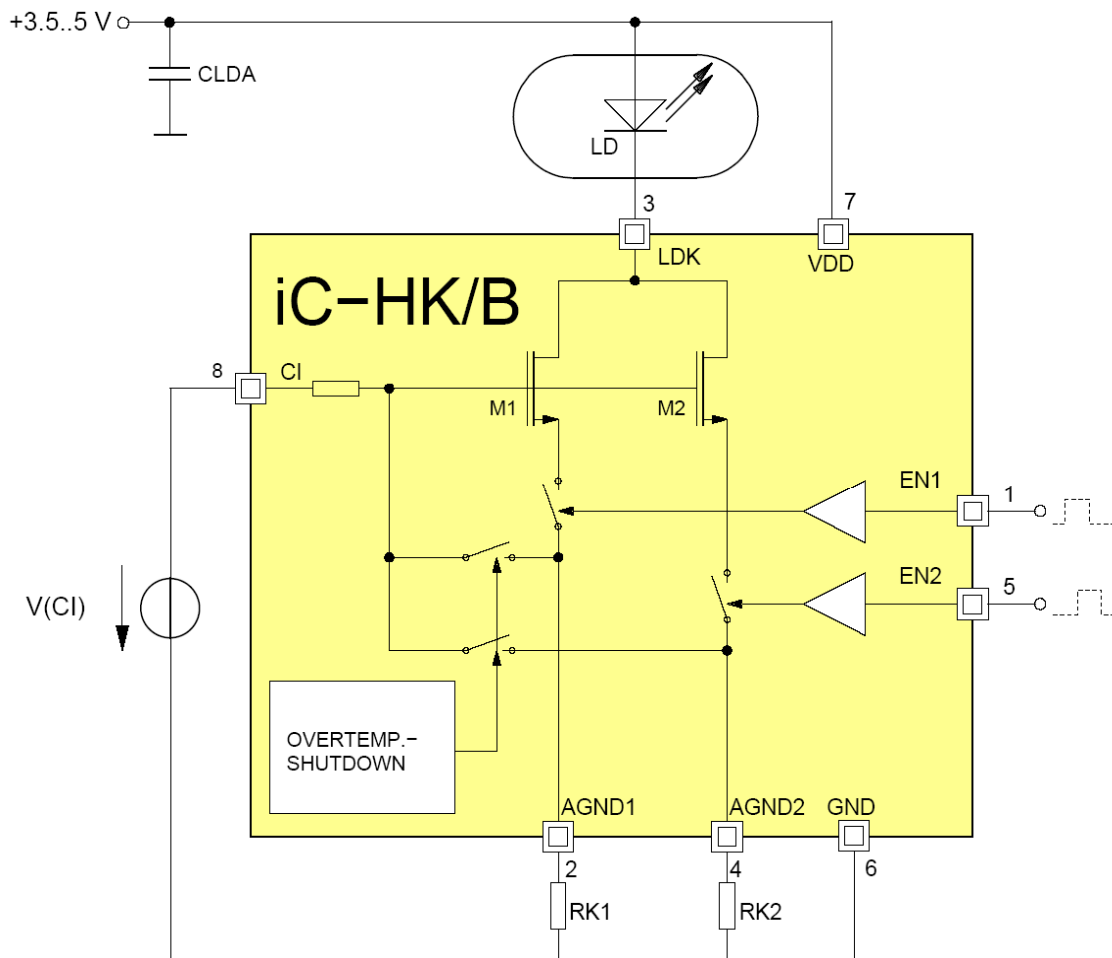
Σχήμα 2.57 : Συμπεριφορά διακοπής

2.7.2.2 Παλμική λειτουργία

Στην παλμική οδήγηση παλμική οδήγηση πρέπει να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα στα κυκλώματα ελέγχου της μέσης οπτικής ισχύος, στα οποία διατηρείται συνεχής η μέση τιμή της οπτικής ισχύος (iC-VJ και iC-Wj) και σε αυτά τα οποία ελέγχουν τον κάθε παλμό ξεχωριστά (iC-NZ).

Τα κυκλώματα ελέγχου μέσης ισχύος απαιτούν σταθερό κύκλο εργασίας. Η ρύθμιση του ελέγχου πρέπει να γίνεται σύμφωνα με την χαμηλότερη συχνότητα παλμού, η οποία κυμαίνεται σε μερικές δεκάδες KHz. Για χαμηλότερες συχνότητες ο πυκνωτής ολοκλήρωσης θα πρέπει να είναι δυσανάλογα μεγάλος, αυξάνοντας όμως τον χρόνο εκκίνησης.

Στο παρακάτω παράδειγμα θα δούμε πως μπορούμε να οδηγήσουμε παλμικά το διοδικό laser ελέγχοντάς το με μια πηγή ρεύματος υψηλής συχνότητας iC-HK laser switcher.



Σχήμα 2.58 : Η πηγή παλμορεύματος iC-HK

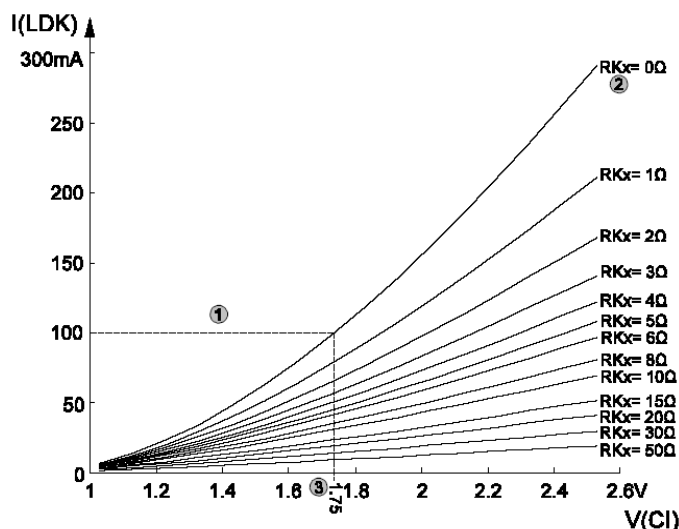
Το ρεύμα του laser καθορίζεται από την τάση στον ακροδέκτη CI και από τις αντιστάσεις RK1 και RK2. Οι δύο γρήγοροι διακόπτες ελέγχονται ξεχωριστά από τις CMOS εισόδου

EN1 και EN2. Το διοδικό laser μπορεί να ανοιγοκλείνει ή να μεταβαίνει σε δύο επίπεδα ρεύματος, καθορισμένα από τα RK1 και RK2.

Το κάθε κανάλι μπορεί να λειτουργήσει CW μέχρι 150 mA και παλμικά έως 700mA εξαρτώμενο από την συχνότητα, τον κύκλο εργασίας και την θερμική σπατάλη.

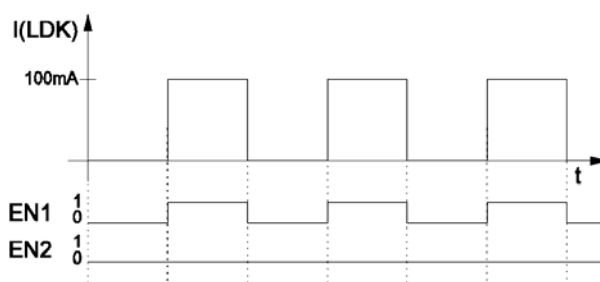
Ο ενσωματωμένος διακόπτης υπερθέρμανσης αποτρέπει την βλάβη λόγω της θερμοκρασίας.

Για οδήγηση του laser από DC μέχρι 100mA παλμικά, η είσοδος EN2 γειώνεται και ο ακροδέκτης AGND2 αφήνεται στον αέρα. Η αντίσταση RK μπορεί να παραληφθεί (RK=0Ω). Στο Σχήμα 2.59 φαίνεται διάγραμμα του παλμορεύματος για τον καθορισμό της V(CI).



Σχήμα 2.59 : Σχέση μεταξύ παλμορεύματος οδήγησης και V(CI)

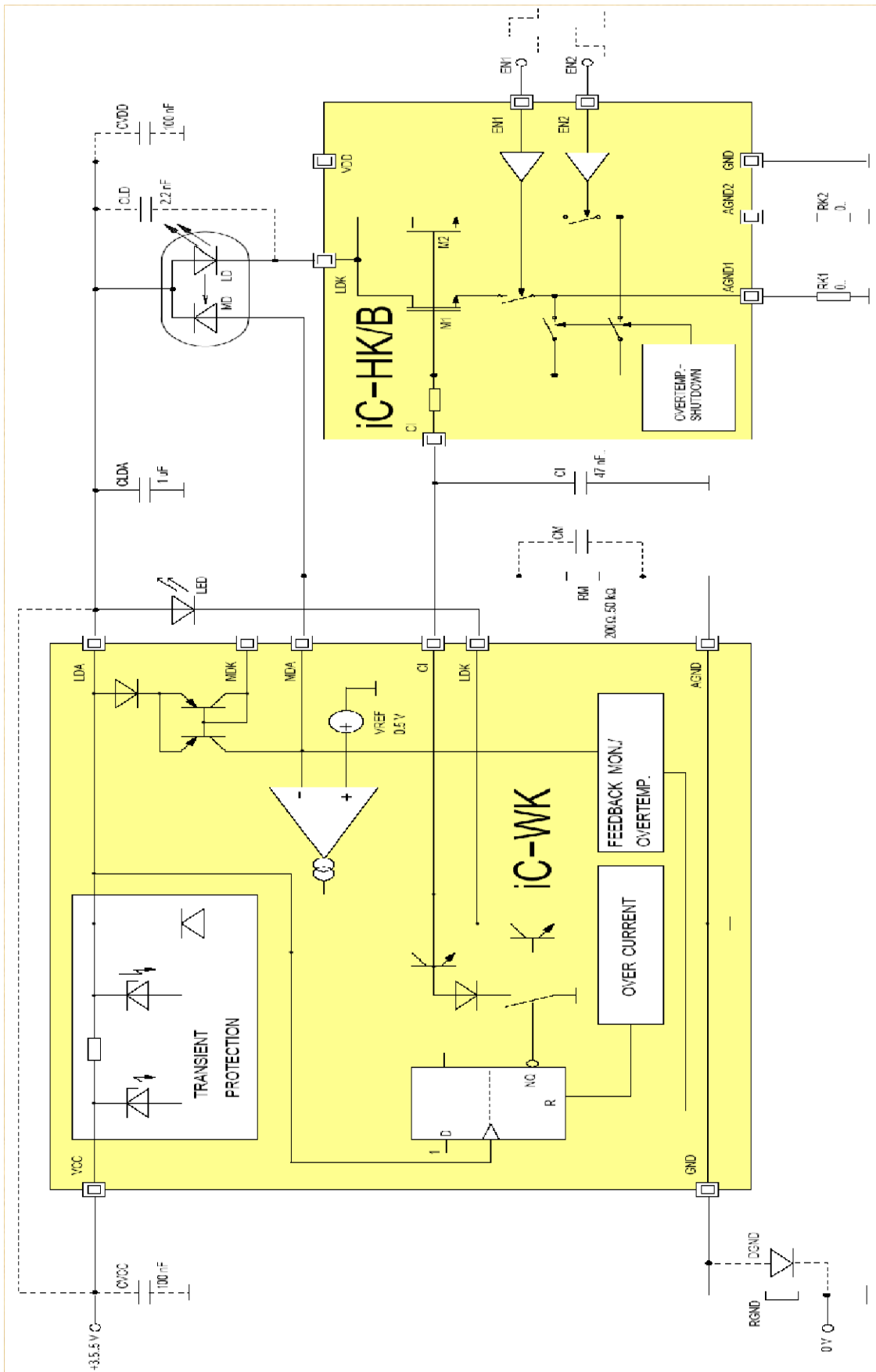
Με $RK=0$ και $I(LDK)=100$ mA η τάση $V(CI)$ είναι 1.75V.



Σχήμα 2.60 : Οι παλμοί εισόδου και εξόδου για το παραπάνω παράδειγμα

Το iC-HK λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση. Αλλαγές στην θερμοκρασία, γήρανση και ανακλάσεις από φακούς εστίασης, θα μεταβάλουν τον λόγο ρεύματος/ισχύος του διοδικού laser με τέτοιο τρόπο, που η εκπομπή ισχύος θα διαφέρει από την καθορισμένη. Εδώ έρχεται να συνεργαστεί το iC-WK προηγούμενου παραδείγματος σε λειτουργία CW, με το iC-HK laser switcher για αντιστάθμιση της οπτικής ισχύος εξόδου μέσω του ρεύματος φωτοδίοδου, και βέβαια την παλμική οδήγηση του laser.

Στο επόμενο παράδειγμα θα οδηγήσουμε το διοδικό laser από κατάσταση on σε off με ένα παλμορεύμα 100mA αντισταθμίζοντας παράλληλα την οπτική ισχύ.



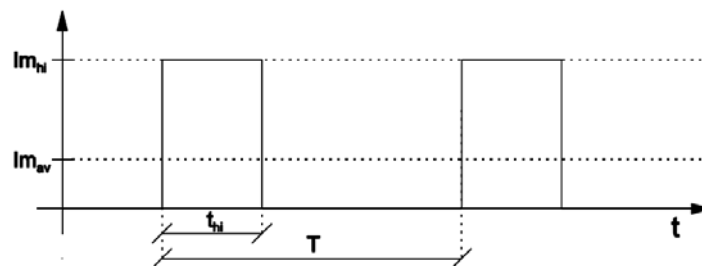
Σχήμα 2.61 : Παλμική οδήγηση του διοδικού laser με το iC-HK, αντισταθμίζοντας την οπτική ισχύ με το iC-WK

Το iC-WK μπορεί να παρακολουθεί την οπτική ισχύ εξόδου και να ελέγχει έτσι την τάση στον ακροδέκτη CI με τέτοιο τρόπο ώστε η μέση τιμή του ρεύματος της φωτοδιόδου $I_{m_{av}}$, με άλλα λόγια η μέση τιμή της εκπεμπόμενης ισχύος, να παραμένει σταθερή. Για να επιτύχει το iC-WK σωστό έλεγχο, πρέπει η συχνότητα του παλμού να είναι πάνω από 100KHz. Αλλιώς το iC-WK θα προσπαθεί να αναπροσαρμόζεται σε κάθε παλμό.

Είναι επιτακτικό τα σήματα παλμού να έχουν εφαρμοστεί στην είσοδο ENx όταν συνδέσουμε την διάταξη στην τροφοδοσία. Αλλιώς, καθώς το σύστημα στερείται ρεύματος παρακολούθησης από την φωτοδίοδο, θα θέσει το ρεύμα laser στο μέγιστο, με αποτέλεσμα να το καταστρέψει.

Το τυπικό ρεύμα φωτοδιόδου ($I_{m_{hi}}$) για την οπτική ισχύ που έχει επιλεγθεί, καθορίζεται από τα φύλλα δεδομένων του διοδικού laser. Από την στιγμή που το iC-WK ελέγχει την μέση τιμή του ρεύματος φωτοδιόδου, αυτή πρέπει να υπολογιστεί από τον κύκλο εργασίας.

$$I_{m_{av}} = I_{m_{hi}} \times t_{hi}/T$$



Σχήμα 2.62 : Ο παλμός οδήγησης του παραδείγματος

Η τιμή της RM υπολογίζεται από την εσωτερική τάση αναφοράς του iC-WK.

$$RM = 500mV/I_{m_{av}}$$

Το iC-WK ρυθμίζει την τάση $V(CI)$ έτσι ώστε η μέση τιμή του ρεύματος φωτοδιόδου να ταιριάζει με το επιθυμούμενο ρεύμα $I_{m_{av}}$.

Το εύρος διαμόρφωσης του iC-WK είναι στο μέγιστο για ένα ρεύμα $I(LDK)$ περίπου 45mA, η τάση ανάμεσα στο pin CI και το pin GND είναι περίπου 1.7V. Η τάση ανάμεσα στο pin VCC και στο pin GND του iC-WK πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε τα 45mA μέσω το LDK να μην οδηγήσουν την έξοδο σε κορεσμό.

Μια τάση 1.7V στο CI με $RKx=0\Omega$ παράγει ένα ρεύμα περίπου 150mA ανά κανάλι μέσω του pin LDK του iC-HK. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί παρεμβάλλοντας μία δίοδο (DGND) ή μια αντίσταση (RGND) μεταξύ του pin GND του iC-WK και της γείωσης του συστήματος.

Η ορθή τάση της διόδου $V_{fw}(DGND)$ πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση :

$$V_{fw}(DGND) \approx V(CI) - 1.7V$$

Η αντίσταση RGND θα πρέπει να ρυθμιστεί ως :

$$RGND \approx (V(CI) - 1.7V)/45mA$$

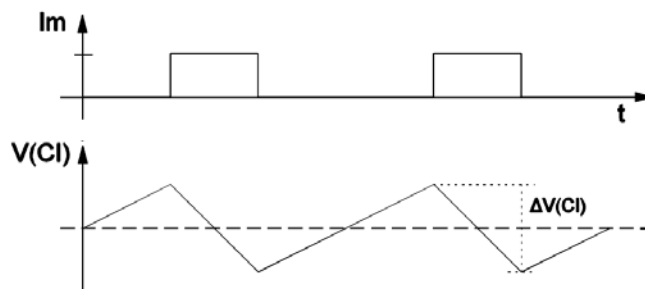
Οι αντιστάσεις RKx συνήθως δεν απαιτούνται. Παρ' όλα αυτά, στα διοδικά laser που δουλεύουν σε πολύ μικρά ρεύματα, οι RKx μπορεί να είναι απαραίτητες λόγω του χαμηλότερου ορίου τάσης στο pin CI του iC-WK.

Η τιμή του πυκνωτή CI εξαρτάται πρώτιστα από την συχνότητα παλμού. Αν ο CI είναι πολύ μικρός το iC-WK θα προσπαθήσει να αναπροσαρμόσει στην διάρκεια μιας περιόδου με αποτέλεσμα ο μη έλεγχος της μέση τιμής. Από την στιγμή που το iC-WK

ελέγχει την οπτική ισχύ ρυθμίζοντας την τάση στο pin CI, μπορεί να επέλθει διακοπή υπερέντασης ή ακόμα χειρότερα βλάβη του laser αν η τάση του CI είναι πολύ υψηλή με τον επόμενο υψηλό παλμό. Γι' αυτό ο πυκνωτής CI θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε η τάση στο CI να παραμένει περισσότερο ή λιγότερο σταθερή στην διάρκεια του χαμηλού παλμού. Η επόμενη σχέση είναι χρήσιμη στην εκτίμηση της τιμής του CI.

$$CI \geq (100\mu A/f)/\Delta V(CI)$$

Το $\Delta V(CI)$ είναι ο επιτρεπόμενος κυματισμός στο CI και το f η συχνότητα ρολογιού. Ο επιτρεπόμενος κυματισμός εξαρτάται από το διοδικό laser. Για διοδικά laser με εξαιρετικά απότομα χαρακτηριστικά ο επιτρεπόμενος κυματισμός πρέπει να μειωθεί ακόμα παραπέρα.

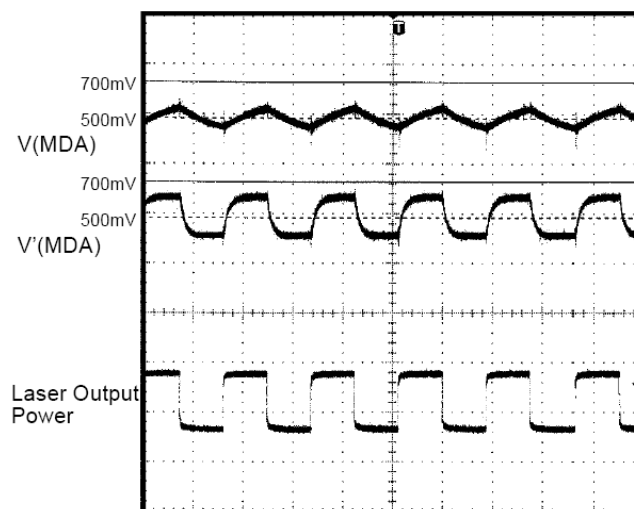


Σχήμα 2.63 : Ο κυματισμός της τάσης στο CI συναρτήσει του ρεύματος I_m

Σε χαμηλές συχνότητες ρολογιού (<100KHz), υψηλά ρεύματα laser ή με μια υπερβολικά μεγάλη αντίσταση RM, η τάση στο pin MDA μπορεί να ανέβει πάνω από τα περίπου 0.7V, στην διάρκεια ενός παλμού φωτός, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση της διακοπής υπερέντασης. Σε αυτή την περίπτωση συνιστάται η χρήση του πυκνωτή CM παράλληλα με την RM. Για την αποφυγή υπερτάσης στο pin CI όταν ενεργοποιείται το σύστημα, η οποία μπορεί να προκαλέσει επικίνδυνο ρεύμα διέλευσης στο διοδικό laser, ο CM πρέπει να επιλεγεί ώστε η σταθερά χρόνου στον κόμβο MDA είναι περίπου το 1/10 της σταθεράς χρόνου ελέγχου του CI.

$$CM \approx 1/(10 \times f \times RM)$$

Η απαραίτητη χρήση του CM οδηγεί στην αύξηση του πυκνωτή CI για αποφυγή πιθανών ταλαντώσεων. Στο Σχήμα 2.64 φαίνεται η τάση στο MDA με $V(MDA)$ και χωρίς $V'(MDA)$ πυκνωτή CM.



Σχήμα 2.64 : Η τάση στον ακροδέκτη MDA με (πάνω) και χωρίς (κάτω) πυκνωτή CM

2.7.3 Μέθοδοι ελέγχου οδηγών laser

Αρκετές οικογένειες οδηγών laser, από ποικιλία προμηθευτών, είναι σχεδιασμένες να χρησιμοποιούν αντιστάσεις για τον έλεγχο των ρευμάτων διαμόρφωσης και διέλευσης που παρέχονται από το κύκλωμα οδήγησης. Ποτενσιόμετρα και μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (DACs) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ρύθμιση αυτών των παραμέτρων. Σε κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που θα επηρεάσουν συνολικά την απόδοση του κυκλώματος οδήγησης.

Αρχικά οι αντιστάσεις προτείνονται από τα φύλλα δεδομένων των οδηγών laser, για τον έλεγχο των ρευμάτων πόλωσης και διαμόρφωσης. Καθώς είναι η λιγότερο δαπανηρή επιλογή, οι αντιστάσεις δεν επιτρέπουν ρυθμίσεις σε πραγματικό χρόνο και η αλλαγή τους στη διάρκεια της κατασκευής και ρύθμισης απαιτεί χρόνο. Μια καλύτερη λύση είναι η χρήση μηχανικών ποτενσιόμετρων που επιτρέπουν χειροκίνητη ρύθμιση.

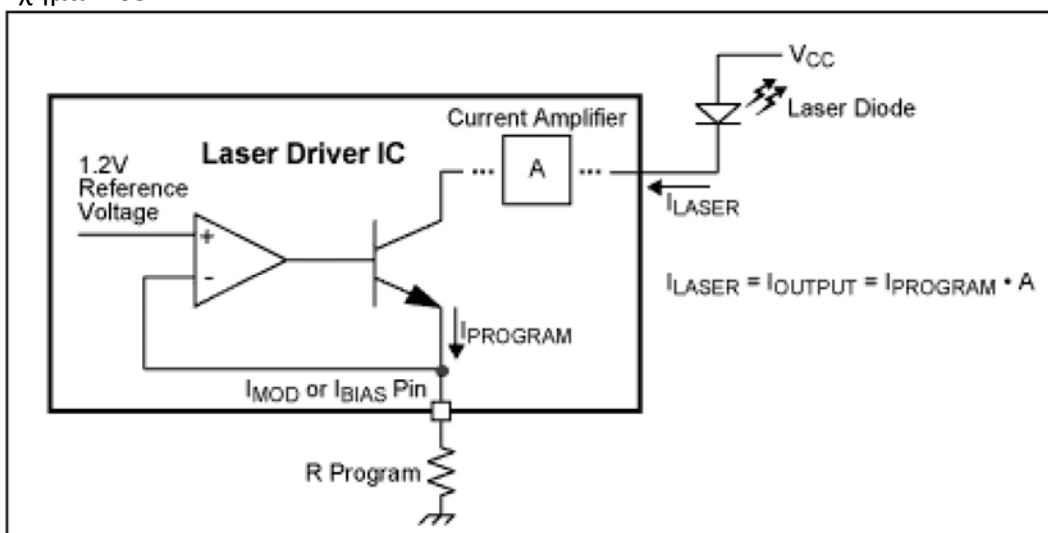
Καθώς όμως ο όγκος αυξάνεται και η αυτοματοποίηση παίζει ρόλο, τα μηχανικά ποτενσιόμετρα μπορούν να αντικατασταθούν με ψηφιακά, επιτρέποντας έτσι και τον ψηφιακό έλεγχο.

Ο ψηφιακός έλεγχος είναι μια τεχνική παρακολούθησης παραμέτρων όπως η ισχύς εξόδου, μετρώντας την με ένα μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC), επεξεργάζοντάς την με μια ψηφιακή μηχανή, και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την πληροφορία να γίνει η ρύθμιση μιας παραμέτρου όπως το ρεύμα πόλωσης του laser.

Οι μετατροπείς (DAC) μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των ποτενσιόμετρων στις περισσότερες περιπτώσεις.

Το τμήμα ελέγχου ενός οδηγού laser :

Πολλοί οδηγοί laser αποτελούνται από μια απλή δομή που μεταφράζει την αντίσταση προγραμματισμού ($R_{PROGRAM}$) σε ρεύμα πόλωσης laser και διαμόρφωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.65.



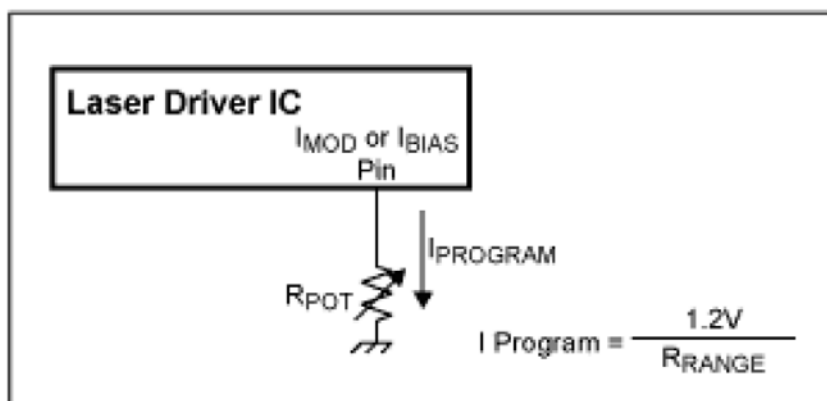
Σχήμα 2.65 : Η εσωτερική αρχιτεκτονική ενός οδηγού laser, για την αίσθηση της αντίστασης ελέγχου

Το εσωτερικό κύκλωμα πίσω από την διάταξη ελέγχου του ρεύματος, περιλαμβάνει μια εσωτερική πηγή τάσης αναφοράς. Το ρεύμα εξόδου αυτής της πηγής τάσης μετριέται

και ενισχύεται μέσω του ενισχυτή ρεύματος, η έξοδος του οποίου είναι η έξοδος του οδηγού laser. Μια απλή αντίσταση που συνδέεται μεταξύ της γείωσης και του ακροδέκτη ελέγχου, παρέχει ένα συνεπές ρεύμα ελέγχου για το κύκλωμα. Πρέπει να σημειώσουμε πως το ολοκληρωμένο κύκλωμα νοιάζεται μόνο για το ποσό του ρεύματος που εξέρχεται από τον ακροδέκτη και όχι για την τιμή της αντίστασης. Γι' αυτό και η αντίσταση μπορεί να αντικατασταθεί από ένα DAC που ελέγχει το ρεύμα.

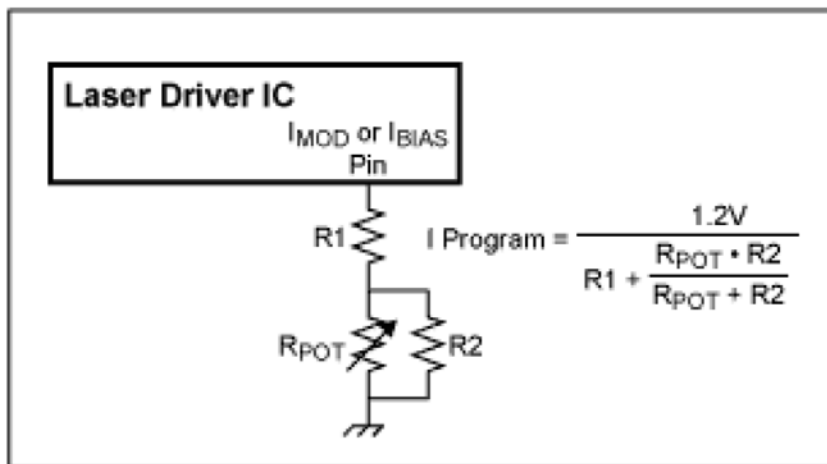
Η χρήση ψηφιακού ποτενσιόμετρου :

Χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο στη θέση της αντίστασης ελέγχου, είναι η πιο απλή προσέγγιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.66.



Σχήμα 2.66 : Ρύθμιση του οδηγού laser με ψηφιακό ποτενσιόμετρο

Παρ' όλα αυτά, η τιμή της αντίστασης των διαθέσιμων ποτενσιόμετρων μπορεί να μην ταιριάζει ακριβώς με το επιθυμητό εύρος ρεύματος ελέγχου. Ξεχωριστές αντιστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει αυτό.

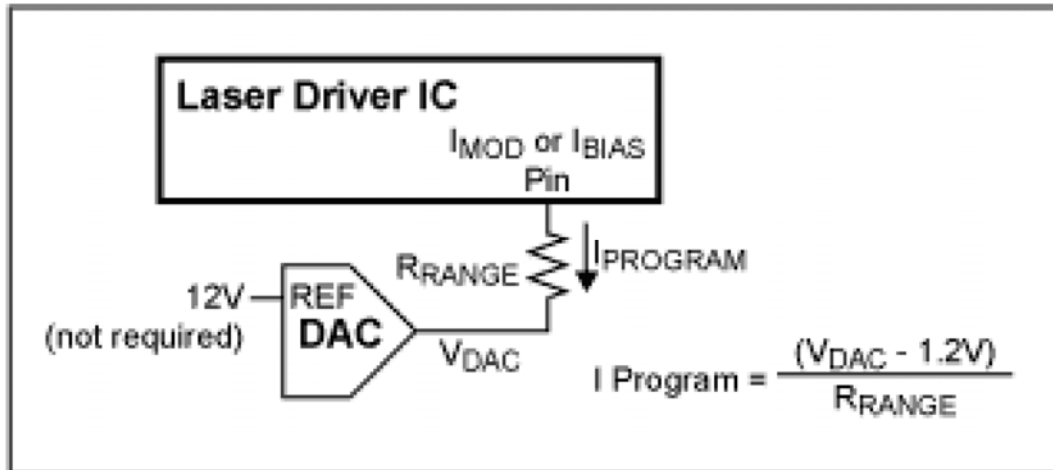


Σχήμα 2.67 : Ρύθμιση του ρεύματος του οδηγού laser με τη χρήση ποτενσιόμετρου ελέγχου βελτιστοποιημένου εύρους

Τα ψηφιακά ποτενσιόμετρα συνήθως έχουν βήμα μεταβολής χωρισμένο σε διαστήματα, που θα έχει σαν αποτέλεσμα το εύρος του ρεύματος ελέγχου να έχει μεγάλο βήμα για στις μικρές τιμές του ποτενσιόμετρου και μικρό βήμα στις μεγάλες.

Η χρήση του μετατροπέα DAC :

Ο DAC μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση του ποτενσιόμετρου ελέγχου. Η τάση εξόδου του DAC χρησιμοποιείται με μια αντίσταση σε σειρά, έτσι ώστε το ρεύμα που περνά από την αντίσταση να είναι το ρεύμα ελέγχου.



Σχήμα 2.68 : Ρύθμιση του ρεύματος οδήγησης του οδηγού laser με την χρήση DAC

Μερικοί από τους λόγους που πρέπει να προτιμηθεί από τον σχεδιαστή ο DAC είναι οι εξής :

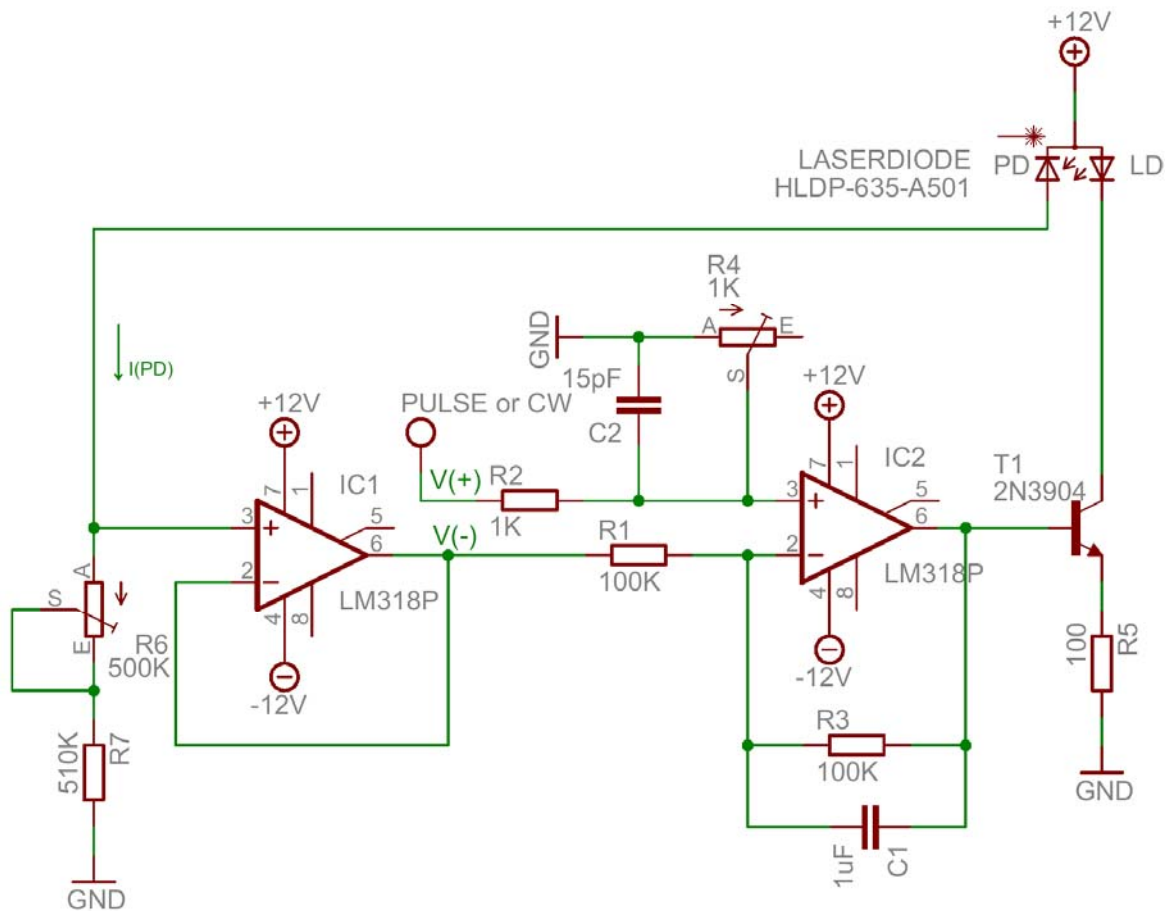
- Γραμμικότητα
- Μέγεθος στην πλακέτα
- Διακριτική ικανότητα
- Βελτιστοποίηση εύρους
- Εύκολη διπολική υλοποίηση
- Προσαρμογή με άλλες μονάδες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

3.1 Κύκλωμα παλμικής οδήγησης διοδικού laser με Αυτόματο Έλεγχο Ισχύος

Μετά από μελέτη των χαρακτηριστικών ενός διοδικού laser και των απαιτήσεων οδήγησής του, παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο ένα κύκλωμα παλμικής οδήγησης ημιαγωγικού laser με οπτική ανατροφοδότηση μέσω της ενσωματωμένης φωτοδιόδου, για σταθεροποίηση της ισχύος εξόδου. Η διαμόρφωση του διοδικού laser είναι άμεση, δηλαδή το σήμα διαμόρφωσης εφαρμόζεται στο κύκλωμα οδήγησης και όχι στο laser. Το διοδικό laser που οδηγείται είναι το HLDP-635-A501 της εταιρείας HUEY JANN. Το ρεύμα λειτουργίας του είναι 32mA παράγοντας μέγιστη οπτική ισχύ 5mW στο μήκος κύματος των 635nm. Το pinout του διοδικού laser αποτελείται από κοινό ακροδέκτη ανόδου του laser και καθόδου της φωτοδιόδου.



Σχήμα 3.1 : Το APC κύκλωμα οδήγησης

Το όλο κύκλωμα αποτελείται από τρεις επιμέρους βαθμίδες. Την πηγή ρεύματος του τρανζίστορ, τον διαφορικό ενισχυτή IC2 και την διάταξη μετατροπής του ρεύματος φωτοδιόδου σε τάση.

Την περισσότερη δουλειά την κάνει ο τελεστικός ενισχυτής IC2. Πρόκειται για έναν διαφορικό ενισχυτή διπολικής τροφοδοσίας. Ο IC2 λοιπόν βγάζει στην έξοδό του την διαφορά των τάσεων $V(+)$ και $V(-)$ εκτελώντας την πράξη $V(+)$ - $V(-)$.

Το κέρδος τάσης από την είσοδο $V(+)$ στην έξοδο είναι :

$$A_{V(+)} = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right)$$

Το κέρδος τάσης από την είσοδο $V(-)$ στην έξοδο είναι :

$$A_{V(-)} = - \frac{R_3}{R_1}$$

Και η συνάρτηση μεταφοράς είναι :

$$V_{OUT} = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) V_{(+)} - \frac{R_3}{R_1} V_{(-)}$$

Τώρα εάν $R_1 = R_2$ και $R_3 = R_4$

$$V_{OUT} = (V_{(+)} - V_{(-)}) \frac{R_3}{R_2}$$

Με το ποτενσιόμετρο R_4 ρυθμίζουμε το ποσό της τάσης εισόδου $V(+)$ που στέλνουμε στην μη αναστρέφουσα είσοδο του IC2. Στην ουσία μεταβάλλουμε την απολαβή από την είσοδο $V(+)$ χωρίς να ενοχλούμε την απολαβή από την είσοδο $V(-)$ σύμφωνα με την παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς. Έτσι μετακινώντας το ποτενσιόμετρο R_4 , μετακινούμε το δυναμικό στην μη αναστρέφουσα είσοδο του IC2 από την γείωση μέχρι την μέγιστη DC τάση εισόδου (για CW λειτουργία) ή το μέγιστο πλάτος παλμού στην παλμική λειτουργία.

Ως τελεστικός ενισχυτής έχει επιλεγθεί ο LM318, ένας γρήγορος τελεστικός ενισχυτής γενικής χρήσης με χαμηλό εύρος ζώνης (15MHz) και υψηλό slew rate (50 V/μs).

Ο πυκνωτής C_2 σε συνδυασμό με την αντίσταση R_2 δημιουργεί ένα παθητικό βαθυπερατό φίλτρο RC στην είσοδο της μη αναστρέφουσας εισόδου του IC2. Χρησιμεύει στην παλμική λειτουργία και η κρίσιμη συχνότητά του είναι :

$$F_C = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-12}} = 10.61 \text{ MHz}$$

Έτσι εμποδίζονται υψηλής συχνότητας παρεμβολές να εισέλθουν στο κύκλωμα.

Ο πυκνωτής C_1 παρέχει συχνοτική αντιστάθμιση στον βρόγχο ανάδρασης φιλτράροντας τα σήματα εισόδου.

Στην έξοδο του τελεστικού IC2 παράγεται μια τάση η οποία οδηγεί το τρανζίστορ T_1 . Πρόκειται για έναν οδηγό laser πολωμένου εκπομπού. Το πλεονέκτημά του είναι ότι η

πτώση τάσης στο διοδικό laser δεν επηρεάζει το ρεύμα οδήγησής του. Το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και για να μεταβάλουμε το ρεύμα οδήγησής του, αρκεί να μεταβάλουμε την τάση τροφοδοσίας της βάσης (μέσω του IC2) ή να μεταβάλουμε την τιμή της αντίστασης R_5 στον εκπομπό.

Στην θέση αυτή έχει επιλεγθεί το NPN τρανζίστορ 2N3904 γενικής χρήσης, μικρού σήματος και υψηλού εύρους ζώνης. Οι σχέσεις μεταφοράς του σήματος είναι :

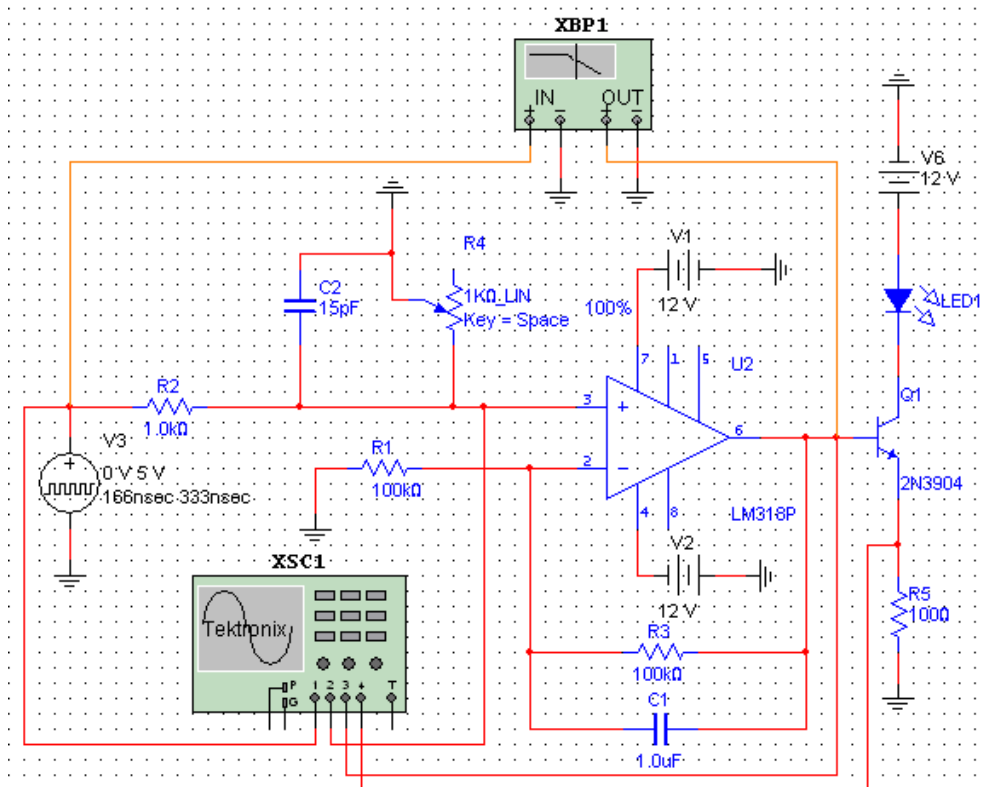
$$V_E = V_{IC2_{OUT}} - V_{BE}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_5} = I_C = I_{LD}$$

Συμπεραίνουμε ότι το ρεύμα διέλευσης του διοδικού laser είναι το ίδιο με το ρεύμα εκπομπού που διαπερνά την αντίσταση R_5 και εξαρτάται από την τάση εξόδου του IC2 και της αντίστασης στον εκπομπό. Επίσης :

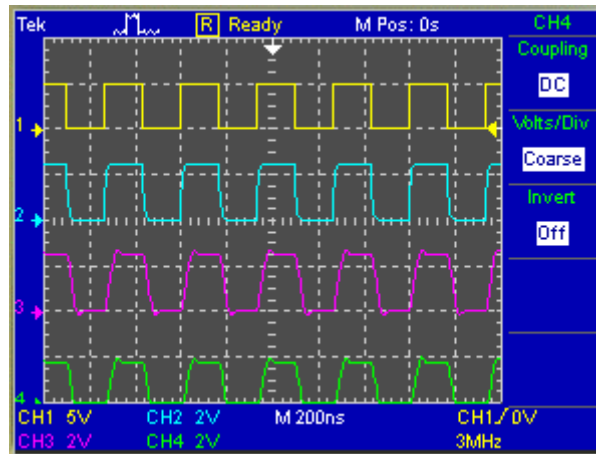
$$V_C = 12V - I_C \cdot R_{LD} \quad \text{και} \quad V_{CE} = V_C - V_E$$

Με την χρήση του προγράμματος Multisim 8 έγινε εξομοίωση της δικτύωσης IC2 και τρανζίστορ, χρησιμοποιώντας ως διοδικό laser ένα LED. Εφαρμόστηκε παλμικό σήμα εισόδου 0 – 5V συχνότητας 3MHz και κύκλου εργασίας 50%. Το ποτενσιόμετρο R_4 ρυθμίστηκε για μέγιστο πλάτος σήματος εισόδου άρα και ρεύματος εξόδου.

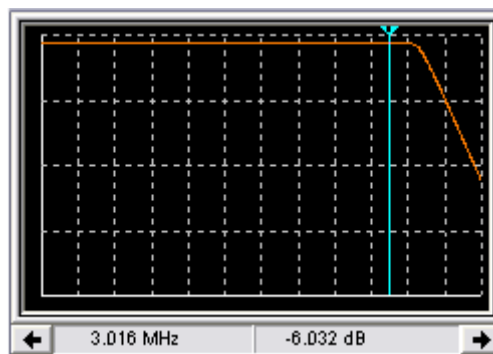


Σχήμα 3.2 : Η εξομοίωση της πηγής ρεύματος

Πάρθηκαν οι κυματομορφές εισόδου (1), μη αναστρέφουσας εισόδου (2), εξόδου του IC2 (3) και τάσης στον εκπομπό (4). Από τους παλμούς διακρίνουμε ότι για όση τάση εφαρμόζουμε στην μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού, τόση παίρνουμε και στην έξοδό του, και την αντίστοιχη και στον εκπομπό πλην την πτώση τάσης V_{BE} του τρανζίστορ. Επίσης η εφαρμοζόμενη συχνότητα 3MHz βρίσκεται μέσα στα όρια αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου.



Σχήμα 3.3 : Οι εξαγόμενοι παλμοί εξομοίωσης



Σχήμα 3.4 : Η απόκριση συχνότητας

Από την στιγμή που το διοδικό laser ξεκινήσει να εκπέμπει ακτινοβολία laser, παρέχοντάς το με το επιθυμητό ρεύμα, τότε ένα ρεύμα $I(PD)$ θα αρχίσει να διαρρέει την φωτοδίοδο. Το ίδιο αυτό ρεύμα διατρέχει και τις αντιστάσεις R_6 και R_7 . Η τάση στα άκρα των δύο αυτών αντιστάσεων είναι η τάση που εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή IC1. Ο IC1 βρίσκεται σε συνδεσμολογία ακολούθου τάσης και δουλειά του είναι να μετασχηματίζει την πηγή τάσης υψηλής σύνθετης αντίστασης στα άκρα των δύο αντιστάσεων, σε πηγή τάσης χαμηλής σύνθετης αντίστασης στην έξοδό του.

Η χρήση λοιπόν του δικτυώματος R_6 , R_7 και IC1 είναι η μετατροπή του ανάστροφου ρεύματος της φωτοδίοδου σε χρήσιμη τάση και την αποστολή αυτής της τάσης στην είσοδο $V(-)$ του διαφορικού ενισχυτή.

Έτσι κλείνει ο βρόγχος ανάδρασης ελέγχου της οπτικής ισχύος. Η τάση δηλαδή που δημιουργείται στην έξοδο του IC1 αφαιρείται από το εισερχόμενο σήμα του ακροδέκτη $V(+)$ του IC2.

Η αντίσταση R_6 μεταβάλλει την τάση $V_{IC1(+)}$ στην μη αναστρέφουσα είσοδο του IC1 σύμφωνα με την σχέση $V_{IC1(+)} = I_{PD}(R_6 + R_7)$. Έτσι μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση ανατροφοδότησης, καθορίζοντας έτσι την σημασία του ρεύματος φωτοδιόδου, άρα και της ανάδρασης.

Εισάγοντας πραγματικές τιμές στις εξισώσεις το ρεύμα πόλωσης της διόδου laser ισούται :

$$I_{LD} = \frac{V_E}{R_5} = \frac{V_{IC2OUT} - V_{BE}}{R_5} = \frac{V_{IC2OUT} - 0.7}{100} \quad (A) \quad (1)$$

$$V_{IC2OUT} = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) V_{(+)} - \frac{R_3}{R_1} V_{(-)}$$

Και επειδή $R_3 = R_1$:

$$V_{IC2OUT} = \frac{2R_4}{R_2 + R_4} V_{(+)} - V_{(-)} \quad (2)$$

Η τάση $V(+)$ είναι η εφαρμοζόμενη τάση εισόδου CW ή παλμική με τιμή 5V. Η πειραματική τιμή της είναι 5.17V μέσω μιας zener 5V1. Η τάση $V(-)$ ισούται με :

$$V_{(-)} = V_{IC1(+)} = I_{PD}(R_6 + R_7)$$

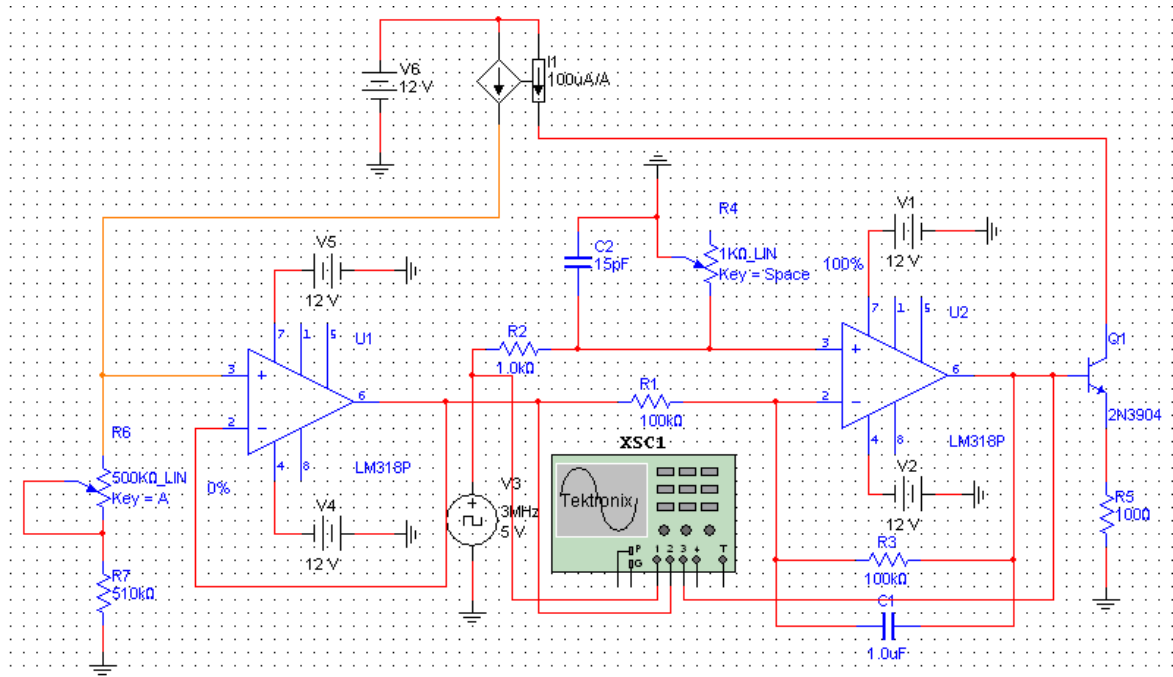
Αντικαθιστώντας $R_2 = 1K\Omega$, $R_7 = 510K\Omega$

$$(2) \Rightarrow V_{IC2OUT} = \frac{2R_4}{10^3 + R_4} 5 - I_{PD}(R_6 + 510 \cdot 10^3) \Rightarrow$$

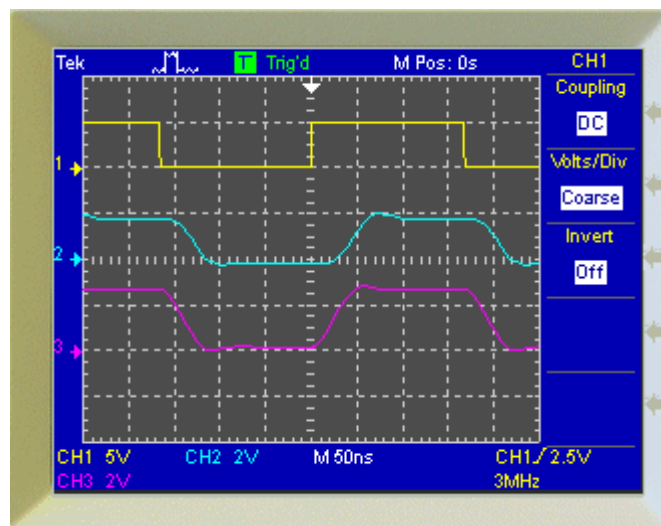
$$\Rightarrow V_{IC2OUT} = \frac{10R_4}{10^3 + R_4} - R_6 I_{PD} - 510 \cdot 10^3 I_{PD} \quad (V)$$

Από την εξίσωση αυτή καταλαβαίνουμε ότι η τάση εξόδου του διαφορικού ενισχυτή ισούται με μια τάση 0 έως 5V ελεγχόμενη από το ποτενσιόμετρο R_4 , μια τάση ανάλογη του ρεύματος φωτοδιόδου και ελεγχόμενη από το ποτενσιόμετρο R_6 και μια σταθερά αφαιρούμενη τάση ίση με $- 510 \cdot 10^3 I_{PD}$. Με την βοήθεια της σχέσης (1) μπορεί να βρεθεί το ρεύμα του laser I_{LD} .

Προσομοιώνοντας το δικτύωμα ανάδρασης μπορούμε να δούμε την έξοδο του τελεστικού IC2 συναρτήσει των διαφορικών εισόδων του V(+) και V(-). Στην προσομοίωση αντί ενός διοδικού laser έγινε χρήση μιας πηγής ρεύματος εξαρτώμενης από ρεύμα με λόγο ρεύματος 100μΑ/Α.



Σχήμα 3.5 : Εξομοίωση του δικτύωματος ανάδρασης

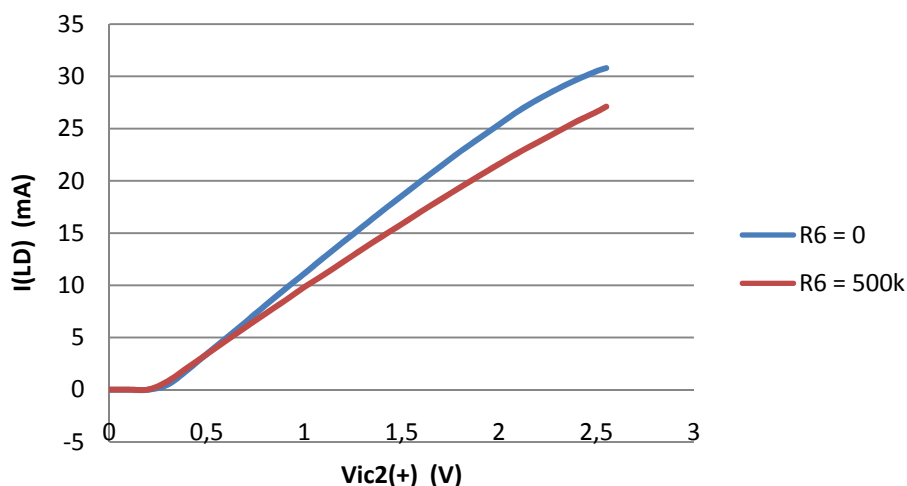


Σχήμα 3.6 : Οι παλμοί εισόδου (κίτρινο-μπλε) και εξόδου (μωβ) του διαφορικού ενισχυτή

Όπου (1) ο παλμός στην διαφορική είσοδο V(+), (2) ο παλμός ελέγχου της εξαρτώμενης πηγής και (3) ο παλμός εξόδου του IC2 που προκύπτει ως διαφορά των δύο παραπάνω.

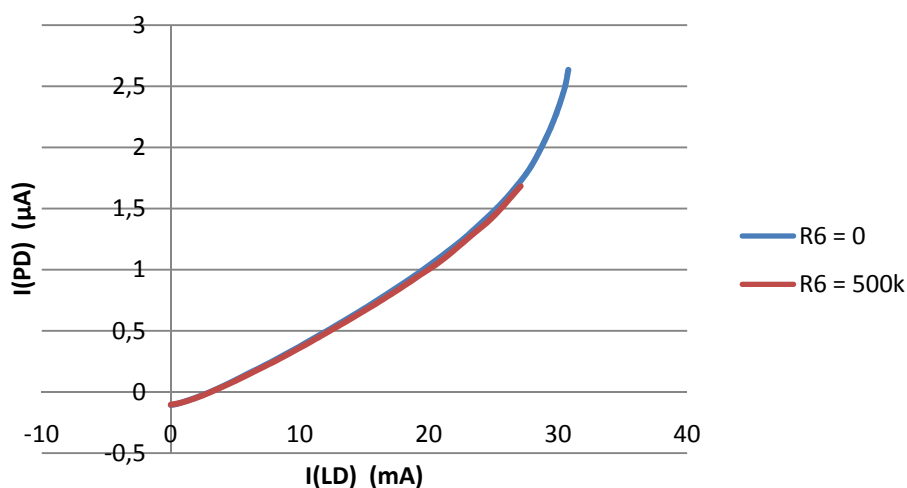
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ CW

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετρήσεις συνεχόμενου κύματος που έγιναν στο κύκλωμα. Στο κύκλωμα εφαρμόστηκε μια DC τάση 5V στην είσοδο V(+) του διαφορικού ενισχυτή IC2 και μετρήθηκε το ρεύμα διέλευσης του διοδικού Laser I(LD) (μετρώντας το ρεύμα στον εκπομπό) και το ρεύμα φωτοδιόδου I(PD) (μέσω της τάσης Vic1(+)), μεταβάλλοντας την τάση Vic2(+) μέσω της αντίστασης R₄ και μεταβάλλοντας την αντίσταση ελέγχου του ρεύματος φωτοδιόδου R₆. Οι μετρήσεις πάρθηκαν με φορητό ψηφιακό πολύμετρο.



Σχήμα 3.7 : Το ρεύμα διέλευσης του Laser συναρτήσει της τάσης Vic2(+) για R6 min και max

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος διέλευσης συναρτήσει της τάσης εισόδου. Η περιοχή ανάμεσα στις δύο ευθείες είναι το εύρος μεταβολής που ελέγχεται από την αντίσταση ανάδρασης R₆.



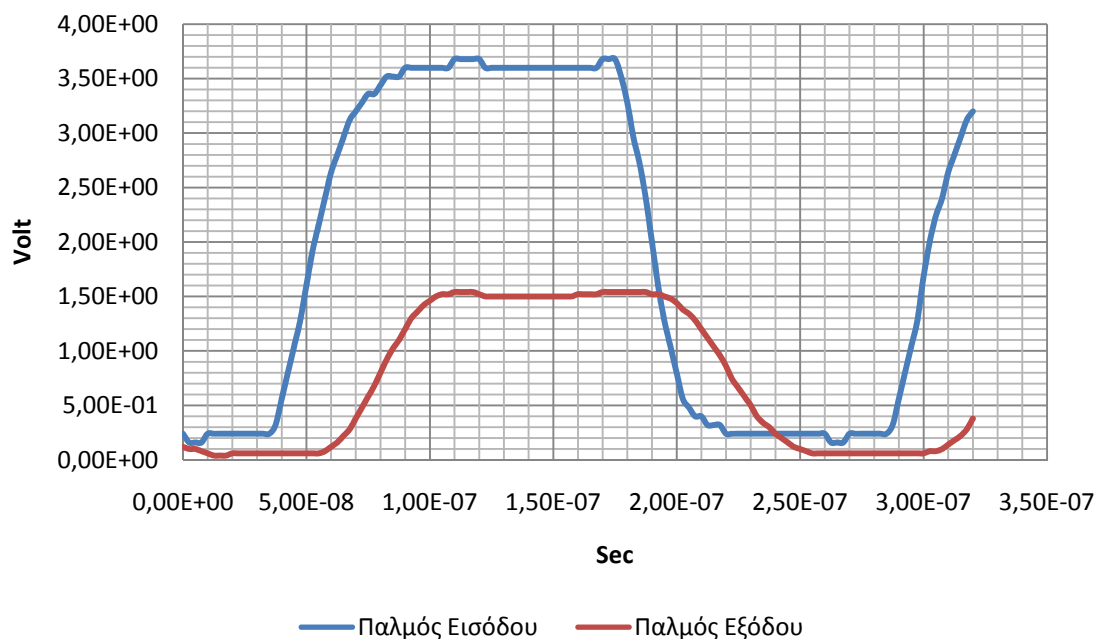
Σχήμα 3.8 : Το ρεύμα φωτοδιόδου συναρτήσει του ρεύματος πόλωσης του Laser για R6 min και max

Στο παραπάνω διάγραμμα εμφανίζεται η μεταβολή του ρεύματος φωτοδιόδου ως προς το ρεύμα λειτουργίας του Laser, μεταβάλλοντας την αντίσταση ελέγχου R₆. Από το διάγραμμα προκύπτει πως οι δύο ευθείες συμπίπτουν, δηλαδή το ρεύμα φωτοδιόδου

εξαρτάται μόνο από το ρεύμα λειτουργίας του laser (δηλαδή την οπτική ισχύ του), αλλά οι μέγιστες τιμές των δύο ρευμάτων εξαρτώνται από την αντίσταση ελέγχου της ανάδρασης R_6 .

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

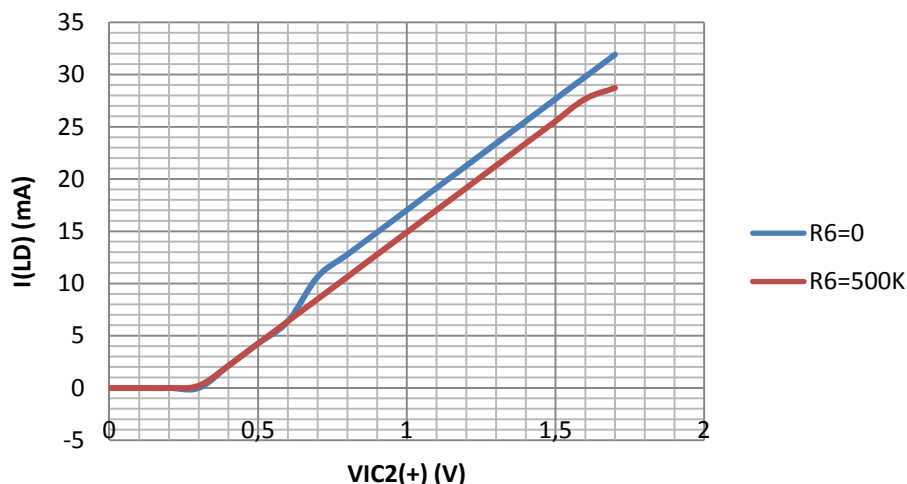
Στο κύκλωμα οδήγησης εφαρμόστηκε στην είσοδο V(+) παλμός πλάτους 0-3,6 V και συχνότητας 3MHz μέσω ενός κρυσταλλικού ταλαντωτή. Η αντίσταση R_5 μεταβλήθηκε στα 47Ω παίρνοντας έτσι μέγιστο ρεύμα οδήγησης του laser 32mA.



Σχήμα 3.9 : Παλμός εισόδου - εξόδου

Μετρήθηκε ο χρόνος ανόδου του παλμού εξόδου $t_{ON} = 29,3ns$ και ο χρόνος καθόδου $t_{OFF} = 41,7ns$. Παρατηρήθηκε και μια χρονοκαθυστέρηση μεταξύ του παλμού εισόδου και εξόδου της τάξης των 20ns που οφείλεται στην απόκριση της φωτοδιόδου αλλά και στην διέλευση μηδενικού ρεύματος laser κάτω από το ρεύμα κατωφλίου.

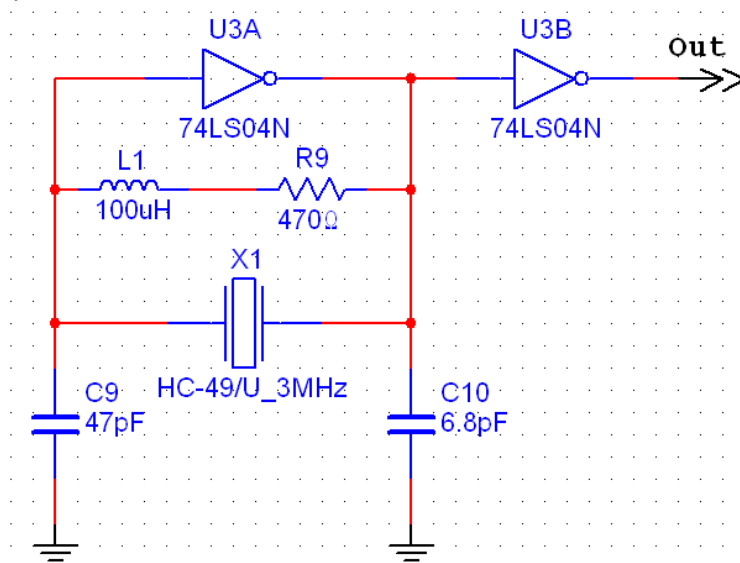
Στο Σχήμα 3.10 εμφανίζεται η μεταβολή του πλάτους του παλμορεύματος οδήγησης συναρτήσει της τάσης εισόδου στην μη αναστρέφουσα είσοδο του διαφορικού ενισχυτή Vic2(+), καθώς και η περιοχή μεταβολής του ρεύματος διέλευσης του laser λόγω της μεταβολής της αντίστασης ανάδρασης.



Σχήμα 3.10 : Η μεταβολή του παλμορεύματος διέλευσης του Laser συναρτήσει της τάσης Vic2(+) για R6 min και max

3.1.1 Το κύκλωμα του ταλαντωτή

Στη παλμική λειτουργία οι παλμοί λαμβάνονται από έναν ταλαντωτή ρολογιού με πύλες TTL και κρύσταλλο. Ο ταλαντωτής παράγει ένα παλμό πλάτους 5V, συχνότητας 3MHz και κύκλου εργασίας 50%.



Σχήμα 3.11 : Ο κρυσταλλικός ταλαντωτής

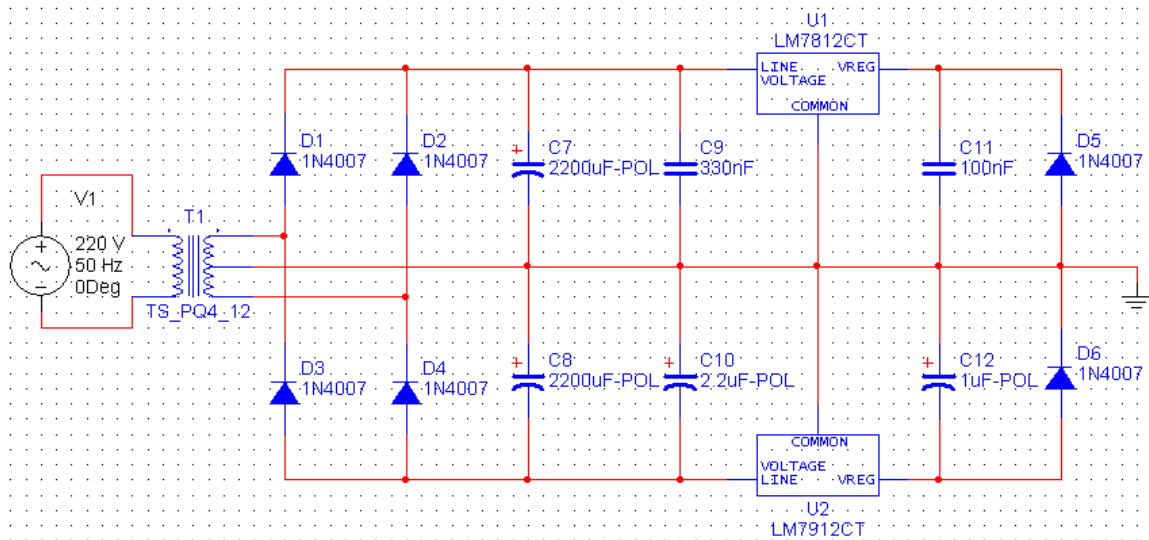
Ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος με γνωστή συχνότητα συντονισμού οδηγείται από το ένα άκρο από την έξοδο μιας πύλης NOR, και το άλλο άκρο του κρυστάλλου ανατροφοδοτεί την είσοδο της πύλης. Το δικτύωμα τύπου π δεν προσφέρει από μόνο του ταλαντώσεις. Χρειάζονται δύο πυκνωτές C₉ και C₁₀ λόγω του ότι ο κρύσταλλος έχει μια εσωτερική χωρητικότητα η οποία δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι της τάξης των pF. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού αυτών των πυκνωτών. Συνήθως η τιμή τους είναι ίδια και ισούται με το διπλάσιο της εσωτερικής χωρητικότητας του

κρυστάλλου, αφού πρώτα έχουμε αφαιρέσει από την εσωτερική χωρητικότητα την παρασιτική χωρητικότητα του όλου κυκλώματος. Έτσι π.χ. θα χρησιμοποιήσουμε πυκνωτές των 22pF όταν έχουμε έναν κρύσταλλο με εσωτερική χωρητικότητα 18pF και έχουμε θεωρήσει την παρασιτική χωρητικότητα ως 7pF.

Οι τιμές των πυκνωτών του παραπάνω κυκλώματος έχουν προκύψει μετά από εργαστηριακό πειραματισμό προς αποφυγή των αρμονικών της συχνότητας του κρυστάλλου.

3.1.2 Το κύκλωμα τροφοδοσίας

Για την τροφοδότηση του κυκλώματος οδήγησης του διοδικού laser υλοποιήθηκε ένα σταθεροποιημένο τροφοδοτικό διπολικής τροφοδοσίας, εξόδου $\pm 12V$ έως 1A, χρησιμοποιώντας την τάση δικτύου της ΔΕΗ. Η τάση αυτή φιλτράρεται από ένα φίλτρο καταστολής ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Στην συνέχεια η τάση αυτή υποβιβάζεται από έναν μετασχηματιστή δύο δευτερεύοντα περιτυλίγματα εξόδου $12V_{rms} - 1A$ το καθένα. Οι δύο τάσεις αυτές ανορθώνονται από μια γέφυρα και εξομαλύνονται από δύο πυκνωτές παράγοντας έτσι δύο τάσεις που έχουν την τιμή peak του σήματος, 17V και -17V περίπου.



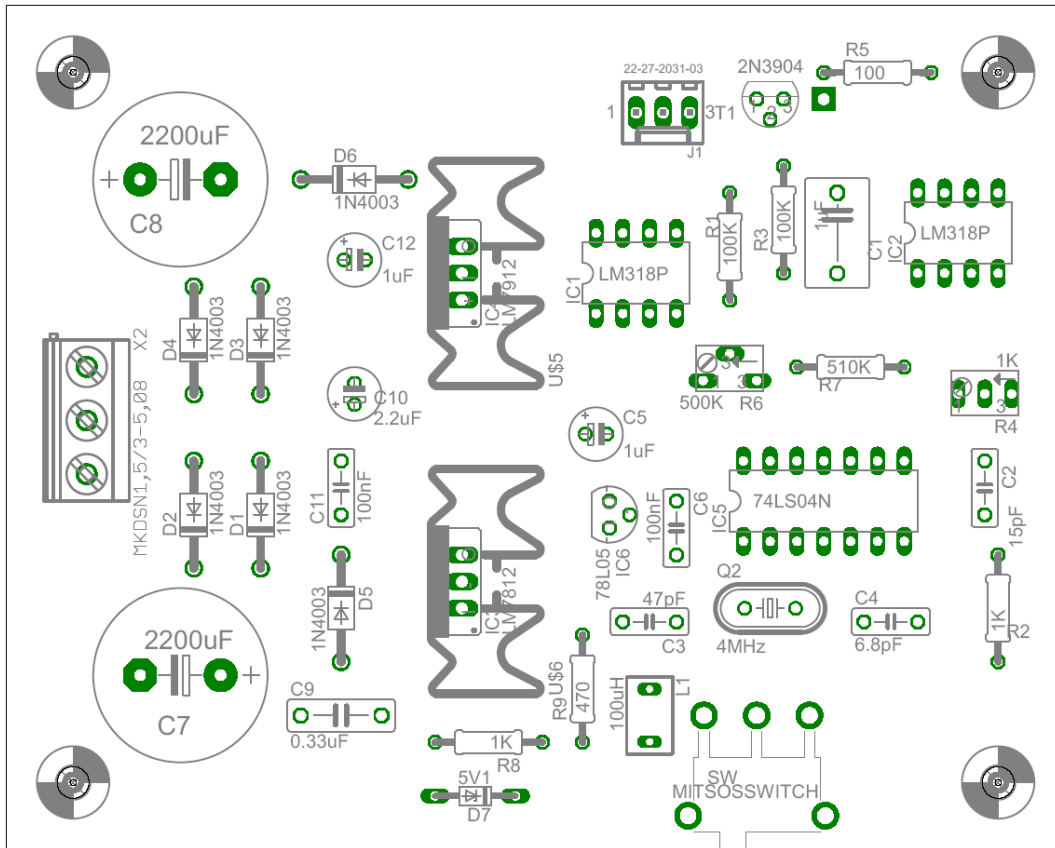
Σχήμα 3.12 : Η σταθεροποιημένη διπολική τροφοδοσία $\pm 12V$

Στην συνέχεια οι δύο ανορθωμένες τάσεις σταθεροποιούνται μέσω ενός θετικού σταθεροποιητή LM7812 και ενός αρνητικού LM7912, στα +12V και στα -12V αντίστοιχα.

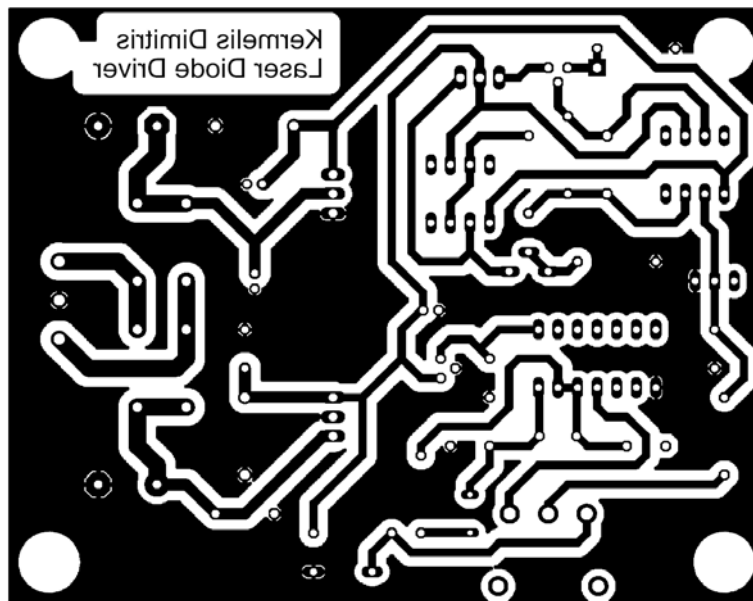
3.2 Κατασκευή του κυκλώματος

Για την κατασκευή του κυκλώματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα σχεδίασης τυπωμένου κυκλώματος Eagle 5.6.0 της εταιρείας Cadsoft. Το συνολικό κύκλωμα σχεδίασης φαίνεται στο παρακάτω σχηματικό και περιλαμβάνει μια υποδοχή για την έξοδο του μετασχηματιστή και μια έξοδο για το διοδικό laser. Επίσης υπάρχει και ένας διακόπτης ON-OFF-ON για την απενεργοποίηση του laser καθώς και την εφαρμογή CW ή παλμικού σήματος.

Στην δημιουργία του τυπωμένου δόθηκε προσοχή στην διάταξη των υλικών, το πάχος των αγωγών, την απόσταση μεταξύ των αγωγών και μεταξύ αγωγών και ακροδεκτών των υλικών. Οι διαστάσεις της πλακέτας είναι 10cm x 8cm.



Σχήμα 3.14 : Η διάταξη των υλικών στην πάνω όψη της πλακέτας



Σχήμα 3.15 : Η κάτω όψη της πλακέτας υπό κλίμακα 1:1

Τα υλικά τοποθετήθηκαν με γνώμονα την μικρότερη απόσταση μεταξύ του κυκλώματος οδήγησης και του δικτυώματος ανάδρασης φωτοδιόδου με το διοδικό laser, και μεταξύ του κρυστάλλου ταλάντωσης με τις πύλες NOR.

Οι αγωγοί μεταφοράς του ημιτονικού σήματος τάσης των $12V_{rms}$ έχουν πάχος 2.18mm, αυτοί του ανορθωμένης και εξομαλυμένης τάσης των 17V έχουν πάχος 1.42mm και όλοι οι υπόλοιποι αγωγοί έχουν πάχος 1mm.

Όλοι οι αγωγοί έχουν απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστο 1.4mm καθώς και η ελάχιστη απόσταση μεταξύ αγωγών και ακροδεκτών (pads) είναι 1mm.

Η επιφάνεια που δεν διαπερνάται από κάποιον αγωγό έχει γεμιστεί με χαλκό και έχει χρησιμοποιηθεί ως γείωση. Αυτό έχει γίνει ως προσπάθεια απευαισθητοποίησης από εξωτερικούς παράγοντες και λόγω της υψηλής συχνότητας αλλά και της διαχείρισης ασθενών σημάτων.

Η εμφάνιση του τυπωμένου έγινε σε φωτοευαίσθητη πλακέτα μέσω ακτινοβολίας UVA πλυσίματος με καυστικό νάτριο. Η αποχάλκωση έγινε με την χρήση τριχλωριούχου σιδήρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] "ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ", Α. Αλεξανδρή, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2004
- [2] "ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ & ΟΡΓΑΝΟΛΟΓΙΑ", Μ. Σπάσος, Εκδόσεις ΑΪΒΑΤΣΗΣ, 2002
- [3] "ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ", Malvino, 6^η έκδοση, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 1999
- [4] "ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ", Sedra/Smith, 3^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [5] "Θεωρία εργαστηριακών ασκήσεων ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΙΙ", Κ. Αμοιρίδης
- [6] "Εργαστηριακές ασκήσεις Θεωρίας Κυκλωμάτων", Σ. Κυρτόπουλος
- [7] "Σχεδιαστικό πακέτο Eagle", Δ. Μιχαηλίδης/Σ. Κυρτόπουλος
- [8] "Diode Lasers", Sam's Laser FAQ, www.repairfaq.com, Samuel M. Goldwasser
- [9] "Diode Laser Power Supplies" Sam's Laser FAQ, www.repairfaq.com, Samuel M. Goldwasser
- [10] "Ασφάλεια και βιοϊατρικές εφαρμογές των Laser", Τομέας Φυσικής ΕΜΠ
- [11] www.wikipedia.org
- [12] www.egismos.com
- [13] www.ichaus.com
- [14] www.lasercomponents.com
- [15] www.linear.com
- [16] www.maxim-ic.com
- [17] www.micrel.com
- [18] www.optima-optics.com
- [19] www.opnext.com
- [20] www.sanyo-photonics.com
- [21] www.sonyscdb.com "Laser Diode Guide"
- [22] www.ti.com/opticalnetwork
- [23] www.semicon.toshiba.co.jp "Visible Laser Diodes Product Guide"
- [24] www.edn.com
- [25] www.ixlightwave.com "Laser Diode Instrumentation & Test Systems"
- [26] www.national.com "Photo-Diode Current-to-Voltage Converters"
- [27] www.national.com "Photodiode Amplifiers, Changing Light to Electricity"
- [28] www.burr-brown.com "Designing Photodiode Amplifier Circuits with OPA128"
- [29] "Optical Communication Systems", Dr. Gerald Farrell, Dublin Institute of Technology, School of Electronic and Communications Engineering
- [30] "Performance analyses of CW laser driving circuits", L. Sliwczynski, M. Lipinski, P. Krehlik, A. Wolczko, Institute of Electronics, University of Mining and Metallurgy, Poland
- [31] "Temperature dependency of semiconductor lasers", Radek Kvicala Phd, Dept. of Radio Electronics, FEEC, BUT
- [32] "VCSEL application in fiber LAN, The development of low cost, high quality 1.25Gb/s laser transceiver", Zhang Heng, Department of electronics, Peking University
- [33] "High power laser diode driving techniques", Dimitar Todorov/Asparuh Grigorov, Department of Electronics, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Technical University of Sofia

- [34] "COMD Behavior of Semiconductor Laser Diodes", Ulrich Martin, Dept. of Optoelectronics, University of Ulm
- [35] "Electro Optical Characterisation of Short Wavelength Semiconductor Laser Diodes", Ardalan Zargham, Technical University of Kaiserslautern, University of Bremen
- [36] "Electrical and Optical Characteristics of Semiconductor Laser Using Differential Resistance Measurements", Hongyi Mi, Raleigh University, North Carolina
- [37] "Laser Diode and Photodiode Modules and Analogue Circuits Training for the Optical Fiber Transmission Practice System", Shigeaki Matsumoto/Yasuaki Tamura/Kouichi Nishizawa, University of Technology, Japan
- [38] "Wide-Band and Scalable Equivalent Circuit Model for Multiple Quantum Well Laser Diodes", Jae Hong Kim, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology
- [39] "High Speed Photodiode Preamp Design", Ivan Polevoi, Tallinn Technical University
- [40] "Circuit-Level Modeling of Laser Diodes", Houssam Kanj, Raleigh University, North Carolina
- [41] "Design of High-Speed CMOS Laser Driver using a standard CMOS technology for optical data transmission", Seok Hun Hyun, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology
- [42] "COMPLETE DIGITAL DESIGN", Mark Balch
- [43] "The Illustrated Dictionary of Electronics", Stan Gibilisco, 6^η έκδοση
- [44] "The Art of Electronics", Paul Horowitz, Cambridge University Press, 1980