



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΠΤΙΚΗ ΚΑΙ ΟΡΑΣΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΔΙΟΔΙΚΩΝ LASER ΓΙΑ ΕΝΔΟΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ
ΧΡΗΣΗ ΣΤΗΝ ΟΦΘΑΛΜΙΑΤΡΙΚΗ**

**ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΤΣΑΤΣΑΚΗΣ
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2008**

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ,

Τον καθηγητή κύριο Λεωνίδα Ναουμίδη για την πολύτιμη βοήθεια του στην διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας , τις συμβουλές του, αλλά και τον πλούτο των γνώσεων που μου αποκάλυψε σε όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Τον διευθυντή της οφθαλμολογικής κλινικής του ΠΑΓΝΗ και συνεπιβλέποντα της εργασίας καθηγητή κύριο Μιλτιάδη Τσιλιμπάρη.

Την συνεπιβλέπουσα της εργασίας ακούραστη και παραγωγική καθηγήτρια Μαρία Φαρσάρη.

Την κυρία Ειρήνη Ναουμίδη και τον κύριο Σπύρο Χαρίση για την προθυμία και την βοήθεια τους στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

Τους συναδέλφους μου συνταξιδιώτες σε αυτό το τριαντάμηνο ταξίδι γνώσης.

Την κυρία Ευγενία Σκουντάκη που με περισσή μαεστρία, διάθεση και ευγένεια μας οδηγούσε στα απαραίτητα του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που ανέχτηκε υποστήριξε και συνέδραμε αυτήν την προσπάθεια που την αφιερώνω σε αυτούς που έφυγαν, στους παρόντες και σε αυτούς που ήρθαν ...

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
SUMMARY	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
<i>Βασικές αρχές και καθεστώτα λειτουργίας των σύγχρονων διοδικών laser κατάλληλων για οφθαλμιατρικές εφαρμογές</i>	11
<i>Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των διοδικών Laser</i>	14
<i>Βασικά χαρακτηριστικά των διοδικών laser</i>	16
<i>Χαρακτηριστική καμπύλη</i>	18
<i>Χαρακτηριστικά της δέσμης των διοδικών laser</i>	19
<i>Βελτίωση των χαρακτηριστικών των διοδικών laser</i>	21
<i>Εργοστασιακές τεχνικές βελτίωσης χαρακτηριστικών των διοδικών laser</i>	22
<i>Βελτίωση της δέσμης σε διοδικά laser πολλαπλού ρυθμού</i>	23
<i>Επιπτώσεις της θερμοκρασίας στην οπτική ισχύ εξόδου του διοδικού laser</i>	24
<i>Ελεγκτές διοδικών laser</i>	27
<i>Κυκλώματα οδήγησης laser</i>	27
<i>Διοδικά laser ομοεπαφής</i>	29
<i>Διοδικά laser ετεροεπαφής</i>	30
<i>Μεγάλης ισχύος διοδικά laser</i>	31
<i>Παλμικά διοδικά laser υψηλής ισχύος</i>	32
<i>Ενδοχειρουργική χρήση οφθαλμιατρικών laser</i>	33
<i>Ενδοϋαλοειδική χειρουργική της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς</i>	33
<i>Χρήση laser στην ενδοϋαλοειδική χειρουργική της διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας</i>	35
ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	43
<i>Τεκμηρίωση επιλογής του τύπου, του καθεστώτος λειτουργίας και των λειτουργικών παραμέτρων του διοδικού laser</i>	43
<i>Μελέτη της αγοράς</i>	43
<i>Επιλογή του τύπου και του καθεστώτος λειτουργίας του διοδικού laser</i>	48
<i>Συμπεράσματα του κεφαλαίου</i>	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	63
<i>Μπλοκ-διάγραμμα και αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής</i>	63
<i>Μέτρηση του ρεύματος κατωφλίου και του ρεύματος λειτουργίας</i>	66
<i>Μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης στον οπτικό πάγκο</i>	68
<i>Δοκιμαστικές μετρήσεις και δείγματα ακτινοβολήσης</i>	72
<i>Πειραματικές δοκιμές: Πειραματική ακτινοβολήση του βυθού εξορυχθέντων οφθαλμών χοίρου</i>	73
<i>Συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών</i>	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα μέρος μιας πιλοτικής μελέτης ο σκοπός της οποίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων δημιουργίας ενός χειρουργικού εργαλείου μιας χρήσης για ενδοχειρουργικές επεμβάσεις laser. Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία έχουν πραγματοποιηθεί οι εξής φάσεις αυτής της πιλοτικής μελέτης:

- Έρευνα της αγοράς και επιλογή του καθεστώτος λειτουργίας και λειτουργικών παραμέτρων της συσκευής. Επιλογή, βάσει της έρευνας αγοράς, του συγκεκριμένου μοντέλου διοδικού laser για χρήση στην πειραματική διάταξη,
- Σχεδιασμός και κατασκευή του πειραματικού προτύπου.
- Δοκιμές της συσκευής στον οπτικό πάγκο: μέτρηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας και λειτουργικών παραμέτρων.
- Δοκιμαστική ακτινοβολήση οφθαλμολογικών αντικειμένων(οφθαλμοί χοίρου).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών, η επίδραση της ακτινοβολίας του πειραματικού προτύπου σε ιστούς του βυθού εξορυχθέντων οφθαλμών χοίρου είναι συγκρίσιμη με επίδραση που έχει η ακτινοβολία του Nd:YAG laser. Απαιτείται περαιτέρω μελέτη για πιο τεκμηριωμένη επιλογή του μήκους κύματος, των παραμέτρων λειτουργίας και του συστήματος σταθεροποίησης και ελέγχου της ακτινοβολήσης.

Summary

This work is part of a pilot study which aims at the research of the possible implementation of a surgical tool, used in endophthalmic laser operations. Namely, in this work, the following phases of the study have been accomplished:

- Market research and final choice of the operation's mode as well as the functional parameters of the device. Selection of a certain laser diode for use in the experimental configuration, after a sedulous market research
- Design and implementation of the experimental prototype
- Test of the device on the optical bench: measurement of the radiation characteristics and the functional parameters
- Trial radiation of ophthalmic objects (porcine eyes)

According to the experimental results, the effect of the experimental prototype radiation on fundus tissues of porcine eyes, is comparable to that of the Nd:YAG laser radiation. Further study is demanded for a more thorough choice of the wavelength, the functional parameters, and the control and stabilization system of the radiation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τελευταία γενιά διοδικών laser βελτίωσε αισθητά τις δυνατότητες μια σειράς τεχνολογικών εφαρμογών σε διάφορους τομείς ανθρωπίνης δραστηριότητας. Ένας τομέας που επηρεάστηκε από αυτές τις εξελίξεις είναι η χρήση των laser στην ιατρική. Εδώ η προηγούμενη γενιά ογκωδών και δυσκολομετακίνητων laser αερίων και στερεάς κατάστασης αντικαθίσταται όλο και πιο συχνά από μικρές συσκευές διοδικών laser που έχουν εξαιρετικές ιδιότητες μικρές διαστάσεις, διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος.

Τα τελευταία είκοσι χρόνια η ενδοχειρουργική χρήση των laser (δηλ. η χρήση στη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης) έχει πολύ ευρεία εφαρμογή στην οφθαλμολογία. Τα laser που κυρίως χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι τα laser Ar και τα laser Nd-YAG. Η δέσμη τους μεταφέρεται μέσω μιας οπτικής ίνας που έχει στο περιφερικό της άκρο ένα ειδικό εξάρτημα, ακροστειλεό, που εισάγεται μέσα στον οφθαλμό μέσω μιας χειρουργικής τομής στο σκληρό χιτώνα ή ενίοτε στον κερατοειδή.

Τα μειονεκτήματα των εν λόγω συσκευών σχετίζονται πρώτα απ' όλα με το ότι καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο του χειρουργείου περιορίζοντας την κινητικότητα προσωπικού και μηχανημάτων κυρίως όμως περιορίζουν τις δυνατότητες ελιγμών της δέσμης laser κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης (ευελιξία). Επίσης το σχετικά υψηλό κόστος αυτών των συσκευών δημιουργεί προβλήματα στην αντικατάσταση των φθαρμένων εξαρτημάτων τους, φθορά που είναι αναπόφευκτη στη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης.

Ως μειονέκτημα μπορούν να θεωρηθούν ακόμη τα προβλήματα που σχετίζονται με την αποστείρωση αυτού του εξοπλισμού.

Λεπτομερής ανάλυση των μειονεκτημάτων της προηγούμενης γενιάς συσκευών laser ενδοχειρουργικής χρήσης δίδεται στο κεφάλαιο 2.

Τα προαναφερθέντα προβλήματα των οφθαλμιατρικών laser ενδοχειρουργικής χρήσης καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη μιας εύχρηστης συσκευής laser μικρών διαστάσεων, χαμηλού κόστους, που θα μπορούσε να αποτελέσει εργαλείο μιας χρήσης όπως τα περισσότερα σύγχρονα χειρουργικά εργαλεία.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των δυνατοτήτων εφαρμογής διοδικών laser για την ανάπτυξη ενός χειρουργικού εργαλείου μιας χρήσης για ενδοχειρουργικές επεμβάσεις laser.

Για την πραγματοποίηση αυτού του σκοπού η παρούσα μελέτη περιλαμβάνει:

- Ανάλυση των ιατρικών προδιαγραφών των ενδοχειρουργικών συσκευών laser
- Μελέτη των δυνατοτήτων και τεχνικών παραμέτρων των υπάρχοντων διοδικών laser
- Επιλογή του καθεστώτος λειτουργίας, των λειτουργικών παραμέτρων και του συγκεκριμένου μοντέλου διοδικού laser για χρήση στην πειραματική διάταξη
- Σχεδιασμό, κατασκευή και τεχνική δοκιμή της πειραματικής διάταξης. Δοκιμές της συσκευής στον οπτικό πάγκο: μέτρηση των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας και λειτουργικών παραμέτρων, δοκιμαστική ακτινοβολία οφθαλμολογικών αντικειμένων.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ερευνητικής συνεργασίας του ΤΕΙ Κρήτης με την Οφθαλμολογική Κλινική του ΠΝΗ (καθ. Μ. Τσιλιμπάρης).

Ένα μέρος της μελέτης πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «Φωτοδυναμική θεραπεία του ακτινωτού σώματος για τη θεραπεία του γλαυκώματος» με συμμετέχοντες φορείς την

οφθαλμολογική κλινική του ΠΝΗ, το ΤΕΙ Κρήτης και την εταιρεία Mechatron AEBE .

Μετά την ολοκλήρωση του πρωτοκόλλου και τις πειραματικές δοκιμές της συσκευής στις χειρουργικές επεμβάσεις, προβλέπεται υποβολή αίτησης για κατοχύρωση Διπλώματος Ευρεσιτεχνίας.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από την Εισαγωγή και δύο μέρη: το Γενικό Μέρος και το Ειδικό μέρος . **Το Γενικό Μέρος** αποτελείται από δυο κεφάλαια. Στο **πρώτο κεφάλαιο** αναπτύσσεται η ανάλυση λειτουργίας των πιο επιτυχημένων σύγχρονων μοντέλων διοδικών laser. Έμφαση δίδεται στη λειτουργία των συσκευών που ικανοποιούν τις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης. Η ανάλυση βασίζεται στην ανασκόπηση διαθέσιμης βιβλιογραφίας και πηγών διαδικτύου.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται ανασκόπηση βιβλιογραφίας σχετικής με οφθαλμιατρικά laser ενδοχειρουργικής χρήσης. Αναλύονται οι πιο σημαντικές περιπτώσεις ενδοχειρουργικής φωτοπηξίας laser, συνθήκες εφαρμογής και προδιαγραφές του εξοπλισμού.

Τα συμπεράσματα του Γενικού Μέρους της εργασίας επιτρέπουν τον καθορισμό συγκεκριμένων στόχων και φάσεων της μελέτης. Αυτή η αναλυτική στοχοθέτηση αναπτύσσεται στην Εισαγωγή του Ειδικού Μέρους της εργασίας.

Το **Ειδικό Μέρος** ξεκινάει από το τρίτο κεφάλαιο και περιέχει συνολικά δύο κεφάλαια με περιγραφή αποτελεσμάτων συγκεκριμένων φάσεων της μελέτης. Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναπτύσσεται η ανάλυση των παραμέτρων και καθεστώτων λειτουργίας σύγχρονων διοδικών laser και οι δυνατότητες πιθανής χρήσης τους σε ενδοχειρουργικές εφαρμογές. Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, τεκμηριώνεται η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου διοδικού laser το οποίο προτείνεται για χρήση στην επόμενη φάση της μελέτης.

Το **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφει τα αποτελέσματα ανάπτυξης της πειραματικής συσκευής για δοκιμές στον οπτικό πάγκο. Περιέχει αναφορά στα βασικά τμήματα της συσκευής και τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών της συσκευής στον οπτικό πάγκο.

Οι δοκιμές συμπεριλαμβάνουν την μέτρηση των χωρικών, χρονικών και ενεργειακών χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας, μέτρηση των παραμέτρων της δέσμης στην έξοδο του ακροστειλεού, πειραματικές εφαρμογές της συσκευής στην ακτινοβόληση του βυθού εξορυχθέντων οφθαλμών χοίρου. Ακολουθεί η συζήτηση αποτελεσμάτων της μελέτης και της προοπτικής σχεδιασμού κλινικού πρωτοτύπου της συσκευής.

Η **Βιβλιογραφία** περιέχει 39 αναφορές σε βιβλία, επιστημονικά άρθρα και πηγές Διαδικτύου.

ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

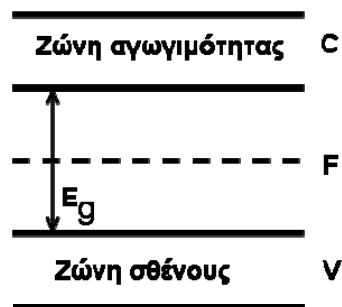
Κεφάλαιο 1

Βασικές αρχές και καθεστώτα λειτουργίας των σύγχρονων δι- οδικών laser κατάλληλων για οφθαλμιατρικές εφαρμογές

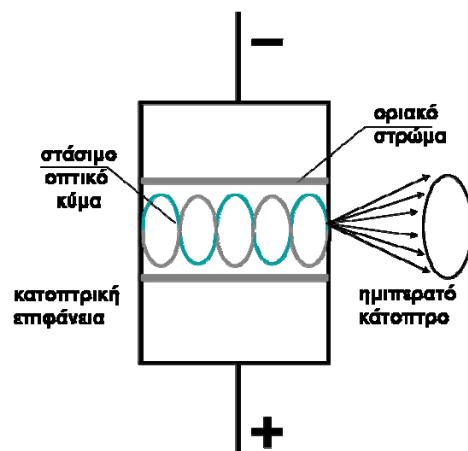
Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η λειτουργία των ευρύτερα χρησιμο-
ποιούμενων μοντέλων σύγχρονων διοδικών laser. Δίδεται έμφαση
στη λειτουργία των συσκευών οι οποίες έχουν δυνατότητα εφαρμο-
γής για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

Η βασική διαφορά μεταξύ των laser ημιαγωγών, στερεάς κατά-
στασης και αερίων έγκειται στις μεταπτώσεις: στους ημιαγωγούς
οι φωτοεκπέμπουσες μεταπτώ-
σεις πραγματοποιούνται μεταξύ
ευρέων ενεργειακών ζωνών (Σχ.
1-1), και όχι ανάμεσα σε διακρι-
τά ενεργειακά επίπεδα, όπως στα
άλλα. Έτσι, η μετάπτωση των
ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους με επα-
κόλουθη επανασύνδεση (recombination) έχει ως αποτέλεσμα την
παραγωγή ακτινοβολίας, το μήκος κύματος της οποίας βρίσκεται σε
σχετικά ευρεία φασματική περιο-
χή (μερικές δεκάδες νανόμετρα).

Στο Σχήμα 1-2, μια κρυσταλλο-
δίοδος, διάστασης 1 mm, διαρ-
ρέεται από ρεύμα κατά την αγώ-
γιμη φορά. Στο οριακό στρώμα
συναντώνται ηλεκτρόνια και θε-
τικές οπές και επανασυνδέονται.
Ένα ηλεκτρομαγνητικό αντηχείο



Σχήμα 1-1. Ζώνη σθένους (V), ζώνη
αγωγιμότητας (C) και επίπεδο Fermi (F)
για ένα ημιαγωγό.

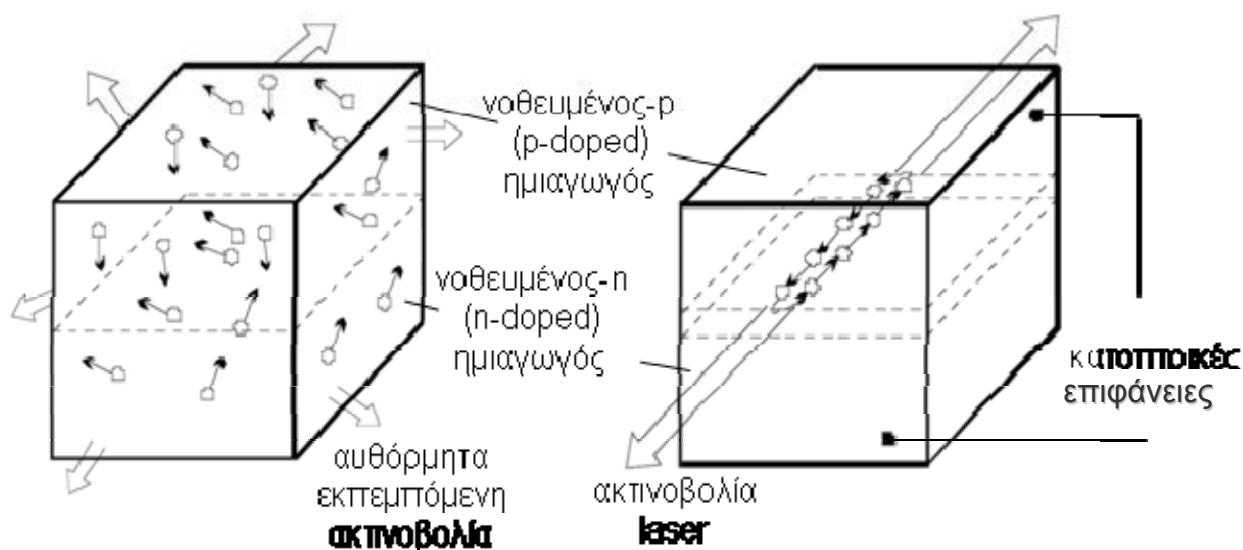


Σχήμα 1-2. Απλοποιημένο διάγραμμα
laser ημιαγωγού

από παράλληλες κατοπτρικές επιφάνειες δημιουργεί συνθήκες εξα-ναγκασμένης αποδιεγέρσεως. Για να επιτευχθεί ο στόχος πρέπει η εξαναγκασμένη επανασύνδεση να είναι πολύ συχνότερη από την αυθόρμητη, πράγμα που απαιτεί μεγάλη συγκέντρωση φορέων και συνεπώς, υψηλής έντασης ρεύμα (π.χ., 0,5 A/mm²). Σε αντίθεση με τις άλλες διατάξεις laser το φως δεν εκπέμπεται κατά παράλληλη δέσμη, αλλά κατά δέσμη αποκλίνουσα μέχρι 10°.

Τα διοδικά laser και οι δίοδοι εκπομπής φωτός είναι διατάξεις ημιαγωγών με επαφές p-n. Ανάλογα με το είδος εκπομπής υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις δίοδους πλευρικής και στις δίοδους επιφανειακής εκπομπής.

Τα περισσότερα LED είναι επιφανειακοί εκπομποί (SLEDS-επιφανειακής εκπομπής LED). Υψηλής απόδοσης πλευρικής εκπομπής LED (EELED) μπορούν να δημιουργηθούν τοποθετώντας ειδική επίστρωση. Αν η δίοδος συνδυαστεί με οπτικό οδηγό μπορούμε να πετύχουμε υψηλές πυκνότητες ακτινοβολίας εξαιτίας της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας στην οπτική ίνα. Οι δομές αυτές ονομάζονται υπερφωτοβόλες δίοδοι. Τα συνήθη διοδικά laser είναι πάντα



Σχήμα 1-3. Ασύμμετρη δίοδος LED (A) και σύμμετρη δίοδος laser (B)

πλευρικοί εκπομποί. Πρόσφατα τα επιφανειακής εκπομπής διοδικά laser έχουν προκαλέσει ενδιαφέρον για ειδικές εφαρμογές (VCSEL- Vertical Cavity Surface Emitting Laser).

Στο Σχ. 1-3 φαίνονται οι διαφορές ανάμεσα στη σύμφωνη και την ασύμφωνη εκπομπή. Ενώ τα LED μπορούν να εκπέμπουν μόνο ασύμφωνο φως, τα διοδικά laser εκπέμπουν σύμφωνο φως όταν λειτουργούν πάνω από συγκεκριμένο κατώφλι. Αυτό οφείλεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή. Το εξαναγκασμένο φωτόνιο που εκπέμπεται είναι όμοιο με το φωτόνιο που προκάλεσε την εκπομπή ως προς την ενέργεια (μήκος κύματος προς συχνότητα), τη φάση και την κατεύθυνση διάδοσης.

Για να προκληθεί ενίσχυση του φωτός από την εξαναγκασμένη εκπομπή, η πιθανότητα εκπομπής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα απορρόφησης για το φασματικό εύρος ενδιαφέροντος. Αυτό επιτυγχάνεται με την άντληση του laser: δημιουργείται κατάσταση αναστροφής πληθυσμού. Στο ανώτερο ενεργειακό επίπεδο η πυκνότητα των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από ότι στο χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο. Οι ακραίες πλευρές είναι τα κάτοπτρα που σχηματίζουν την κοιλότητα του αντηχείου του διοδικού Laser. Μπορεί να είναι απλά οι διαχωριστικές επιφάνειες του ημιαγωγού κρυστάλλου ή μπορεί να είναι γυαλισμένες επιφάνειες με ανακλαστική επίστρωση.

Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τον κρύσταλλο και δημιουργεί την αναστροφή πληθυσμού μπορεί να είναι συνεχές, παλμικό, ή να έχει σύνθετη μορφή.

Η παροχή ρεύματος στα διοδικά laser μπορεί να δοθεί από ένα ειδικό τροφοδοτικό με δυνατότητα διαμόρφωσης του ρεύματος με συγκεκριμένο τρόπο, π.χ. για χρήση στην επικοινωνία με οπτικές ίνες.

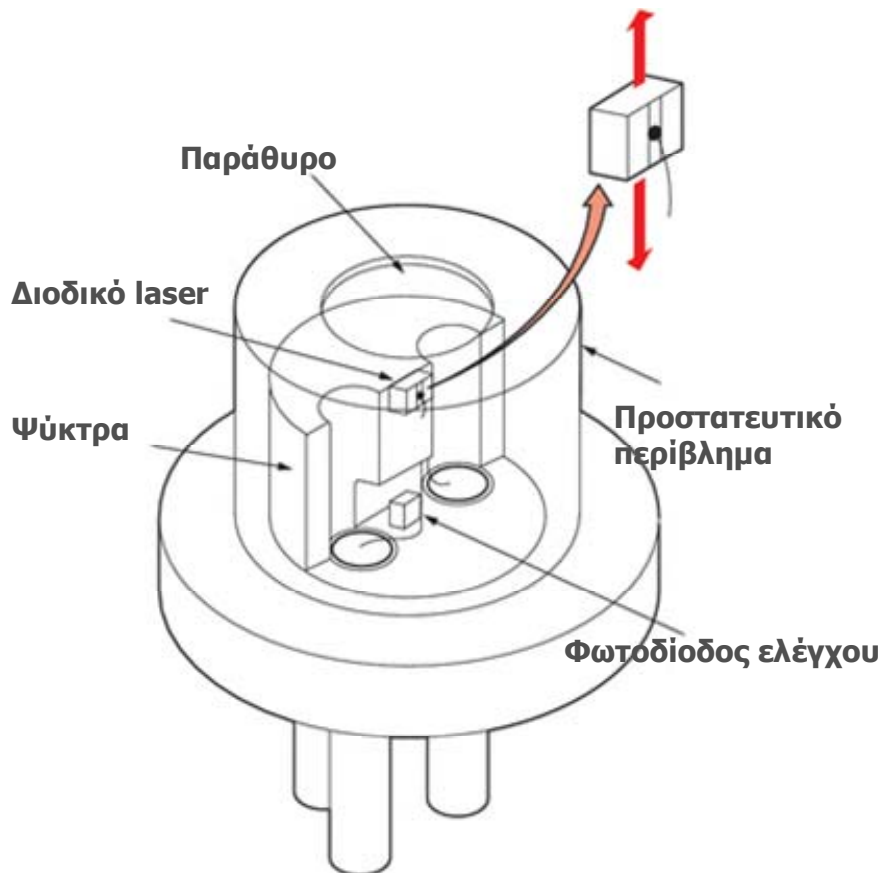
Τα διοδικά Laser είναι πολύ ευαίσθητα σε υπέρβαση των ορίων της τάσης ή του ρεύματος. Η υπέρβαση των ορίων του ρεύματος ακόμη

και για χρόνο της τάξης του microsecond μπορεί να είναι καταστροφική. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διάταξη και από τη θερμοκρασία επαφής. Η ευαισθησία στην υπερένταση οφείλεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στη θετική ανάδραση που δημιουργείται κατά τη διάρκεια εκπομπής του διοδικού laser. Για την εξουδετέρωση μεταβολών διαφόρων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία κ.α., χρησιμοποιείται συνήθως η ρύθμιση κλειστού βρόχου με οπτική ανάδραση.

Στην πραγματικότητα, τα διοδικά laser υψηλής ισχύος (με ισχύ μερικά Watt και άνω) είναι χωρίς αμφιβολία οι πιο αποδοτικοί εκπομπή φωτός που υπάρχουν. Μερικά έχουν απόδοση στην μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος σε οπτική ακτινοβολία μεγαλύτερη από 50%. Με άλλα λόγια, με 2 W συνεχούς ηλεκτρικής ισχύος στην είσοδο, επιτυγχάνεται 1 W φωτός στην έξοδο. Οι κοινές λάμπες φωτισμού έχουν απόδοση μόνο 5%, ενώ οι λάμπες φθορισμού 15% - 20%. Ακόμα και ειδικές υψηλής απόδοσης λάμπες δεν μπορούν να φτάσουν την απόδοση που έχουν τα διοδικά laser. Σε εξέλιξη βρίσκονται οι έρευνες για την αύξηση της απόδοσης των διοδικών laser, έως και στο 80%.

Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των διοδικών Laser

Στο Σχήμα 1-4 παρουσιάζεται ένα κοινό διοδικό laser. Το συνολικό μέγεθος της διάταξης είναι τυπικά 5mm ÷ 10mm, αλλά το πλακίδιο του διοδικού laser είναι μικρότερο του 1 mm σε μήκος.



Σχ. 1-4. Κατασκευαστική δομή ενός κοινού διοδικού laser

Η κύρια δέσμη όπως παράγεται από το διοδικό laser έχει σφηνοειδές σχήμα και υψηλή απόκλιση, με χαρακτηριστικές τιμές $10^\circ \div 30^\circ$.

Για την παραγωγή παραλληλισμένης δέσμης απαιτούνται εξωτερικά οπτικά συστήματα. Ένας απλός κυρτός σφαιρικός φακός μικρού εστιακού μήκους μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά σε διοδικά laser χρησιμοποιούνται φακοί στους οποίους τουλάχιστον μια επιφάνεια είναι ασφαιρική.

Εξαιτίας της φύσης της εκπέμπουσας επαφής που παράγει σφηνοειδούς μορφής δέσμη με άνιση απόκλιση ($10^\circ \div 30^\circ$ τυπικά), ένα διοδικό laser είναι ελαφρώς αστιγματικό. Για την εξουδετέρωση του αστιγματισμού είναι απαραίτητος ένας πρόσθετος κυλινδρικός φακός ή ένας απλός φακός με αστιγματική καμπυλότητα. Το σχήμα της δέ-

σμης είναι ελλειπτικό ή ορθογώνιο αλλά μπορεί να γίνει κυκλικό με τη χρήση ζεύγους πρισμάτων.

Η ακτινοβολία των διοδικών laser πλευρικής εκπομπής είναι γενικά γραμμικά πολωμένα.

Η δέσμη από το πίσω κάτοπτρο του διοδικού laser προσπίπτει σε μια ενσωματωμένη φωτοδίοδο που χρησιμοποιείται σε ένα οπτοηλεκτρονικό βρόχο για σταθεροποίηση του ρεύματος και επομένως της ισχύς της δέσμης μέσω φαινομένου οπτικής ανάδρασης.

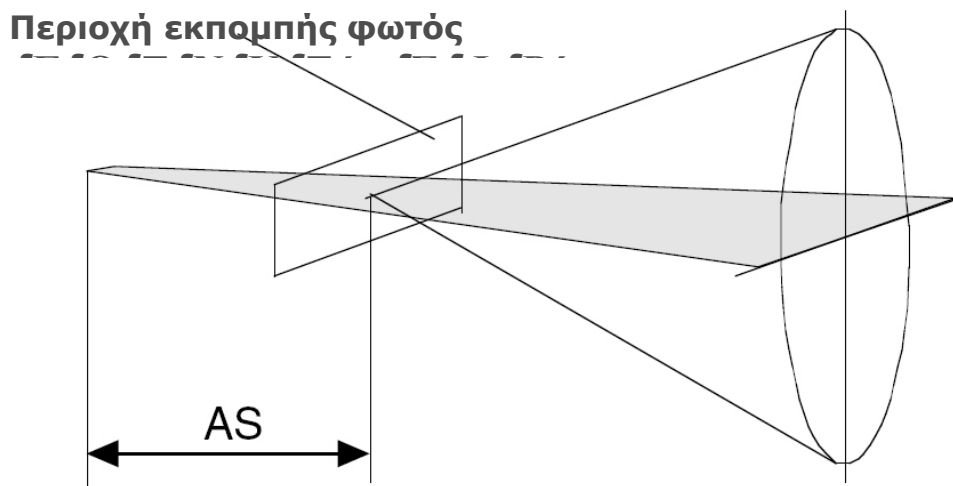
Βασικά χαρακτηριστικά των διοδικών laser

Παρακάτω αναφέρονται οι σημαντικότερες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για χαρακτηρισμό των διοδικών laser από τους κατασκευαστές:

- Ρεύμα κατωφλίου. Το μικρότερο ρεύμα στο οποίο ξεκινά η εκπομπή του laser.
- Ρεύμα λειτουργίας. Το ρεύμα που δίνει βέλτιστη ισχύ εξόδου.
- Τάση λειτουργίας. Η τάση στα άκρα του διοδικού laser για το συγκεκριμένο ρεύμα λειτουργίας.
- Γραμμικότητα. Την αντιπροσωπεύει ο βαθμός στον οποίο η οπτική ισχύς είναι ευθέως ανάλογη στο ρεύμα της διόδου.
- Μήκος κύματος. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μερικές άλλες παραμέτρους.
- Μέγιστο μήκος κύματος. Είναι το μήκος κύματος στο οποίο το laser εκπέμπει τη μέγιστη ισχύ.
- Φασματικό εύρος. Ιδανικά όλο το εκπεμπόμενο φως από ένα laser μπορεί να είναι στην κορυφή του μήκους κύματος αλλά

στην πράξη η ακτινοβολία εκπέμπεται σε μια ορισμένη περιοχή του οπτικού φάσματος με κέντρο το μέγιστο μήκους κύματος. Το εύρος αυτής της φασματικής περιοχής καλείται φασματικό εύρος της ακτινοβολίας.

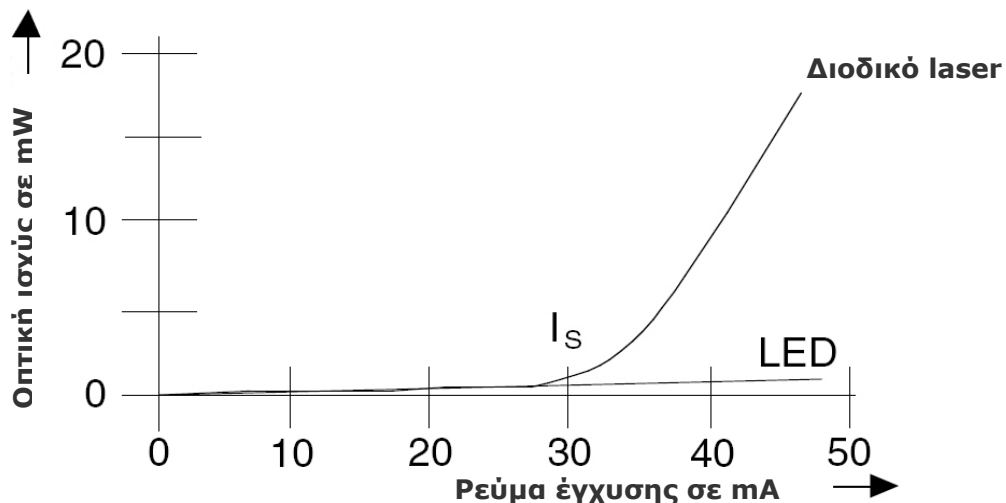
- Γωνία ακτινοβολίας. Η απόκλιση της δέσμης στην παράλληλη (οριζόντια) και κάθετη (κατακόρυφη) κατεύθυνση σχετικά με την ενεργό περιοχή της διόδου laser.
- Διαφορική απόδοση. Όταν οι τιμές του ρεύματος υπερβαίνουν το κατώφλι, η αύξηση της ισχύος του laser συναρτήσει του ρεύματος [mW/mA] είναι σε μεγάλο βαθμό γραμμική. Μπορεί να ποικίλλει ευρέως από δείγμα σε δείγμα και μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία της διόδου.
- Αστιγματισμός. Η διαφορά των εικονικών σημειακών πηγών της παράλληλης και κάθετης δέσμης.
- Ρεύμα ελέγχου. Η ευαισθησία της φωτοδιόδου ελέγχου σε σχέση με την ισχύ εξόδου του διοδικού laser.



Σχ.1-5. Αστιγματισμός διοδικού laser. Η παράλληλη και η κάθετη δέσμες έχουν διαφορετικά εστιακά σημεία. Η τυπική τιμή του αστιγματισμού κυμαίνεται μεταξύ $10\mu\text{m} \div 30\mu\text{m}$.

Χαρακτηριστική καμπύλη

Όταν το ρεύμα της διόδου ξεπερνάει το κατώφλι ρεύματος στο οποίο αρχίζει η εκπομπή, το ιδανικό διοδικό laser εμφανίζει γραμμική εξάρτηση μεταξύ της οπτικής ισχύος εξόδου και του ρεύματος του laser. Κάτω από αυτό το κατώφλι η οπτική ενίσχυση δεν είναι επαρκής. Το φως εκπέμπεται αυθόρμητα όπως για ένα LED. Το σχήμα 1-6 δείχνει ότι η χαρακτηριστική καμπύλη ενός διοδικού laser δεν διαφέρει από αυτή ενός LED όταν λειτουργούν με ρεύμα κάτω από το κατώφλι.



Σχ.1-6 Χαρακτηριστικές καμπύλες ενός LED και ενός διοδικού laser

Σημαντικές παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι η κλίση, το ρεύμα κατωφλίου, η καμπυλότητα στο κατώφλι και η γραμμικότητα της λειτουργίας του laser.

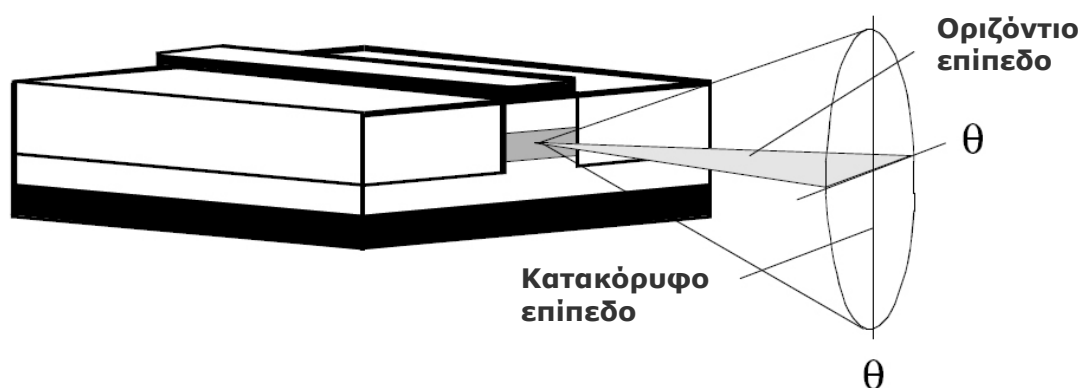
Η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης που μετρείται σε mW/mA καθορίζεται ευθέως από την αποδοτικότητα της συσκευής σε λειτουργία laser. Η κλίση της δέσμης ενός διοδικού laser με οπτική ίνα μειώνεται από ένα παράγοντα που εξαρτάται από τις απώλειες ισχύος

του laser μέσα στην οπτική ίνα.

Χαρακτηριστικά της δέσμης των διοδικών laser

Αντίθετα από το laser He-Ne και τα άλλα συνηθισμένα laser αερίων (όπως και άλλους τύπους laser), η δέσμη εξόδου του laser πλευρικής εκπομπής αποκλίνει και παρουσιάζει δύο ασυμμετρίες : αστιγματισμό και κατατομή ελλειπτικής δέσμης.

Η δέσμη είναι επίσης γραμμικά πολωμένη. Όλες αυτές οι ιδιότητες της δέσμης οφείλονται στην επιμήκη μορφή του ανοίγματος εκπομπής.



Σχήμα 1-7. Τυπικά χαρακτηριστικά δέσμης ενός διοδικού laser

Τα διοδικά laser πλευρικής εκπομπής χαμηλής ισχύος λειτουργούν συνήθως σε καθεστώς απλού χωρικού ρυθμού και για τους δυο άξονες. Δίοδοι πλευρικής εκπομπής με ισχύ μεγαλύτερη από 100 mW είναι συνήθως πολλαπλού χωρικού ρυθμού στον οριζόντιο άξονα και απλού ρυθμού στον κατακόρυφο άξονα. Αν και χρειάζεται κάποια προσπάθεια μια απλού τύπου δίοδος μπορεί να παραλληλιστεί με περιθλαστικά περιορισμένη απόκλιση της δέσμης και στους δύο άξονες. Αυτό ακόμα και θεωρητικά δεν είναι δυνατό για τον οριζόντιο άξονα μιας πολύτροπης δίοδου.

Η γωνία απόκλισης Θ ° δίνεται από τον τύπο:

$$\Theta = \frac{720 \cdot \lambda}{\pi^2 \cdot \phi}$$

όπου το λ - μήκος κύματος, ϕ - διάμετρος της δέσμης,
[Θ]=grad, [λ]=nm, [ϕ]=mm

Για μήκος κύματος των 670 nm αυτός ο τύπος δίνει περίπου 18° x 46° για ένα εκπομπό 1μm x 3μm και 48° x 0,48° για εκπομπό 1 μm x 100 μm.

Επειδή τα διοδικά laser με ζώνη εκπομπής ~100 μm είναι πάντα πολλαπλού τρόπου, αυτή η χαμηλή τιμή της απόκλισης δεν εμφανίζεται ποτέ στην πράξη. Τέτοιες δίοδοι τείνουν να έχουν όμοια απόκλιση με αυτή των εκπομπών απλού τρόπου.

Να σημειωθεί ότι καθώς τουλάχιστον μια από τις διαστάσεις της ζώνης εκπομπής είναι κοντά στο μήκος κύματος του διοδικού laser - μπορεί ακόμη να' ναι μικρότερη - αυτή η απλή εξίσωση δεν είναι αρκετά ακριβής. Πάντως, τα χαμηλής ισχύος διοδικά laser παράγουν δέσμες με απόκλιση της τάξης 10° x 30°.

Αυτή η ασυμμετρία στις x και y διαστάσεις της ζώνης εκπομπής του κρυστάλλου οδηγεί σε παραγωγή μιας δέσμης με ελλειπτικό προφίλ. Μερικές φορές αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί ως σφηνοειδής διάμρφωση. Αντί για μια σημειακή ή κυκλική μορφή, η δέσμη έχει μορφή ευθείας ή τετραγώνου. Η κηλίδα εστίασης τέτοιας δέσμης είναι επιμηκυμένη.

Ο αστιγματισμός του διοδικού laser είναι άμεσο αποτέλεσμα της άνισης απόκλισης. Τυπικός αστιγματισμός για ένα διοδικό laser 5 mW είναι περίπου 40 μm. Ο αστιγματισμός των διοδικών laser μεγάλης ισχύος είναι κατά πολύ μεγαλύτερος.

Η ακτινοβολία διοδικών laser πλευρικής εκπομπής είναι γραμμικά

πολωμένη. Τυπικές τιμές του λόγου πόλωσης των κοινών διοδικών laser είναι από 50:1 έως 100:1 με το δiάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου να κατευθύνεται παράλληλα προς την επαφή του διοδικού laser. Ο λόγος πόλωσης είναι λίγο χαμηλότερος κοντά στο κατώφλι όπου υπάρχει σημαντική συνεισφορά από αυθόρμητη ακτινοβολία η οποία είναι τυχαία πολωμένη.

Βελτίωση των χαρακτηριστικών των διοδικών laser

Ακολουθεί αναφορά σε ενέργειες βελτίωσης για διοδικά laser μονού χωρικού ρυθμού όπως αυτά που υπάρχουν σε δείκτες laser (laser pointers) και σε μονάδες διοδικών laser. Σε αυτές τις συσκευές μπορεί να γίνει βελτίωση και στους δύο άξονες μέχρι τα όρια της περιθλασης. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως διοδικά laser χαμηλής ισχύος.

Χωρίς διόρθωση, η δέσμη του διοδικού laser μοιάζει περισσότερο με δέσμη φακού παρά με κανονική ακτινοβολία laser. Χρειάζονται απλά οπτικά συστήματα για την παραγωγή μιας καλά παραλληλισμένης δέσμης (όπως αυτή που παράγει ένας φθηνός δείκτης laser) και πιο περίπλοκα για να παραχθεί βέλτιστη ποιότητα ακτίνας (η οποία μπορεί πράγματι να είναι πολύ καλή). Φυσικά, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, κάποια ή κάποιες από τις εμπονομαζόμενες «ατέλειες» μπορεί στην πραγματικότητα να είναι επιθυμητές.

- Απόκλιση της δέσμης. Ένας θετικός (κυρτός) φακός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μιας παραλληλισμένης ή εστιασμένης δέσμης. Όμως, χωρίς περαιτέρω διόρθωση, η κατατομή της ακτίνας μπορεί αντί κυκλικό να είναι ελλειπτικό ή σε σχήμα σφήνας και οι εστιακές αποστάσεις στους X και Y διαφορετικές εξαιτίας αστιγματισμού της διόδου laser.

- Ελλειπτική κατατομή της δέσμης. Ζεύγος πρισμάτων σε σχήμα σφήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το στρογγύλεμα του σχήματος του στίγματος. Προσαρμόζοντας τους σχετικούς προσανατολισμούς των δυο πρισμάτων, είναι σχετικά εύκολο να διορθωθεί αποτελεσματικά αυτό το χαρακτηριστικό της δέσμης.
- Αστιγματισμός. Ένας ασθενής κυλινδρικός φακός στην πορεία της ακτίνας θα διορθώσει πλήρως τον αστιγματισμό του διοδικού laser ή αυτή η λειτουργία μπορεί να συνδυαστεί σε απλό παραλληλισμένο ή εστιασμένο φακό. Για τυπική ρύθμιση, η τελευταία προσέγγιση μπορεί να είναι πολύ ακριβότερη, καθότι ο φακός ίσως χρειαστεί να ταιριάζει με την απόκλιση και τον αστιγματισμό του διοδικού laser.

Εργοστασιακές τεχνικές βελτίωσης χαρακτηριστικών των διοδικών laser

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι η ενσωμάτωση ενός υψηλά εξελιγμένου μικροφακού. Η τεχνική των μικροφακών στρογγυλοποιεί το φυσικά παραγόμενο ελλειπτικό φως ενός διοδικού laser. Η δίοδος με μικροφακό εκπέμπει μια κυκλική, περιορισμένης διάθλασης δέσμη, χωρίς να συμπεριλαμβάνει διορθωτικά πρίσματα και φακούς. Επιπρόσθετα, η υπερβολικά υψηλή είσοδος NA (αριθμητικά ρυθμιζόμενο φωτοδιάφραγμα) του μικροφακού συλλαμβάνει σχεδόν όλη την οπτική ενέργεια που είναι διαθέσιμη από το διοδικό laser.

Μια άλλη μέθοδος στρογγυλοποίησης δέσμης χρησιμοποιεί ένα ζεύγος διορθωτικών πρισμάτων. Ρυθμίζοντας τις γωνίες των πρισμάτων και ενσωματώνοντας ένα κυκλικό φωτοδιάφραγμα, μπορούμε να στρογγυλοποιήσουμε μια ελλειπτική δέσμη. Για αστιγματική διόρθω-

ση, χρησιμοποιείται ένας αδύναμος κυλινδρικός φακός μετά το φακό παραλληλισμού. Η χρήση και των δύο μεθόδων αποτελεί ένα χαμηλού κόστους τρόπο διόρθωσης μιας δέσμης.

Μια μέθοδος τόσο για την στρογγυλοποίηση μιας ελλειπτικής δέσμης, όσο και για τη διόρθωση αστιγματισμού περιλαμβάνει τη σύζευξη μιας δέσμης laser με οπτική ίνα. Αυτή η μέθοδος παράγει μια κυκλική ακτίνα με χαμηλή διασπορά φωτός και καθόλου κατάλοιπα αστιγματισμού.

Βελτίωση της δέσμης σε διοδικά laser πολλαπλού ρυθμού

Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν τα πολλαπλού ρυθμού διοδικά laser με ισχύ ακτινοβολίας άνω των 100 mW. Παράγουν μια περιορισμένης διάθλασης δέσμη στην διεύθυνση του άξονα κατά το πλάτος της πλευράς εξόδου αλλά ένα πολλαπλού ρυθμού με κατανομή ακτινοβολίας που έχει μορφή καπέλου στην διεύθυνση κατά μήκος της πλευράς εξόδου.(λείπει μια φράση)

Έτσι η διόρθωση της περιορισμένης διάθλασης είναι δυνατή για τον πρώτο άξονα αλλά για τον δεύτερο είναι περιορισμένη.

Έτσι για τον πρώτο άξονα (κατά πλάτος της πλευράς εξόδου) δύο φακοί θα παράγουν μια περιορισμένης διάθλασης παραλληλισμένη δέσμη. Ένας κυλινδρικός φακός πολύ μικρού εστιακού μήκους τοποθετείται έτσι ώστε σχεδόν να εφάπτεται στη δίοδο για να μειώνει την τυπική απόκλιση των 40° της δίοδου σε λίγες μοίρες. Συνήθως είναι ένας πολύ λεπτός ραβδοειδής φακός ή ένα τμήμα πυρήνα οπτικής ίνας. Ένας δεύτερος συμβατικός φακός χρησιμοποιείται έπειτα για να ελέγξει τη διάμετρο και την παραλληλία της δέσμης. Να σημειωθεί ότι για να επηρεάσουμε μόνο τον πρώτο άξονα μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον συμβατικό φακό από κυλινδρικό φακό. Για το δεύτερο άξονα ένα ζευγάρι διορθωτικών πρισμάτων μπορεί να χρησιμο-

ποηθεί για την επέκταση της δέσμης και κατόπιν ένας φακός να την παραλληλίζει. Με προσοχή στη σχεδίαση αυτός ο δεύτερος φακός μπορεί να είναι ο ίδιος σφαιρικός θετικός φακός και για τους δυο άξονες. Μπορεί επίσης να επιτευχθεί με ξεχωριστούς κυλινδρικούς φακούς. Ένα ζεύγος κυλινδρικών φακών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην θέση των διορθωτικών πρισμάτων.

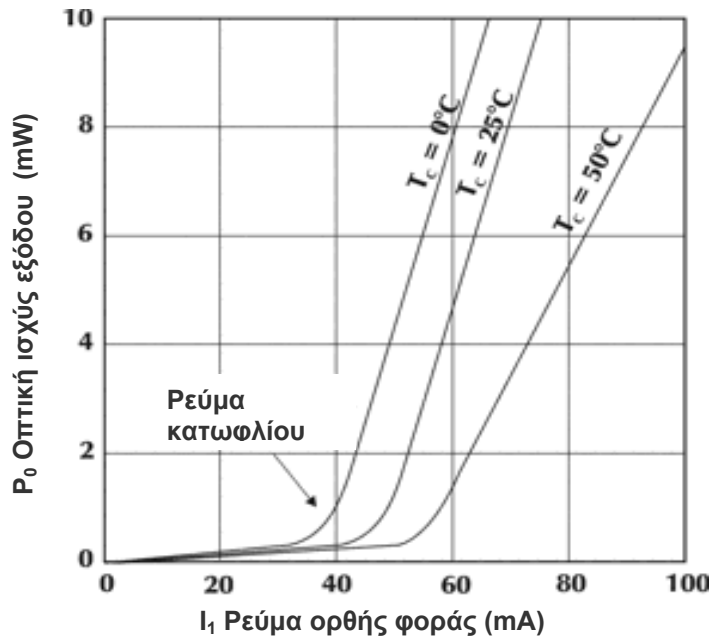
Επιπτώσεις της θερμοκρασίας στην οπτική ισχύ εξόδου του διοδικού laser

Τα laser είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία καθώς αυτή, μεταβάλλει το κατώφλι εκπομπής. Το σχήμα 1-8 δείχνει την τυπική συμπεριφορά διοδικού laser. Καθώς αλλάζει η θερμοκρασία λειτουργίας μπορεί να υπάρξουν πολλές επιπτώσεις. Πρώτα από όλα το ρεύμα κατωφλίου αλλάζει. Το ρεύμα κατωφλίου είναι πάντα μικρότερο στις χαμηλότερες θερμοκρασίες και αντιστρόφως.

Η δεύτερη σημαντική αλλαγή είναι η αποδοτικότητα της κλίσης. Η αποδοτικότητα της κλίσης είναι ο αριθμός των mW ή μ W φωτός εξόδου ανά mA αύξησης του ρεύματος οδήγησης πάνω από το κατώφλι.

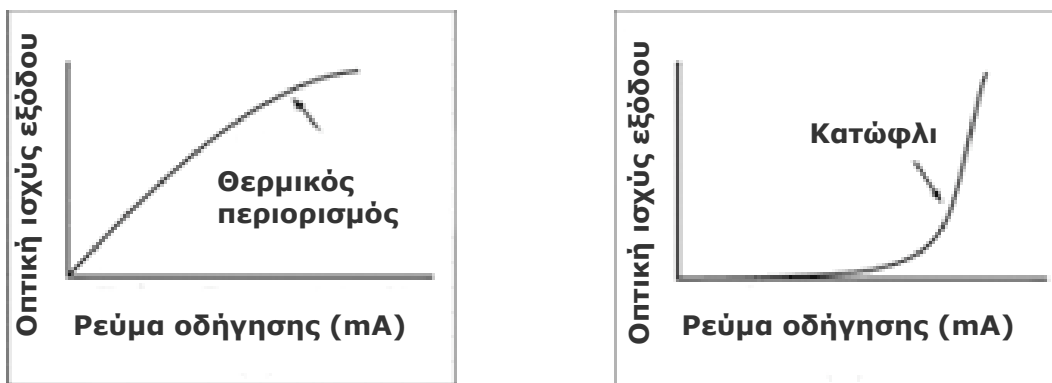
Τα περισσότερα laser δείχνουν μια μικρή πτώση αποδοτικότητας όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Έτσι τα laser απαιτούν μια μέθοδο σταθεροποίησης του κατωφλίου ώστε να επιτύχουν τη μέγιστη απόδοση.

Συχνά μια φωτοδίοδος χρησιμοποιείται για να ελέγξει την απόδοση του φωτός στην οπίσθια όψη του laser. Το ρεύμα από τη φωτοδίοδο μεταβάλλεται ανάλογα με την έξοδο του φωτός και παρέχει ανατροφοδότηση για να ρυθμίσει το ρεύμα οδήγησης του laser.



Σχ.1-8. Επιπτώσεις θερμοκρασίας στην οπτική ισχύ ενός διοδικού laser

Το σχήμα 1-9α δείχνει τη συμπεριφορά ενός led και το σχήμα 1-9β δείχνει τη συμπεριφορά ενός διοδικού laser. Οι παραστάσεις δείχνουν τη σχετική ποσότητα της απόδοσης του φωτός ως προς το ρεύμα οδήγησης.



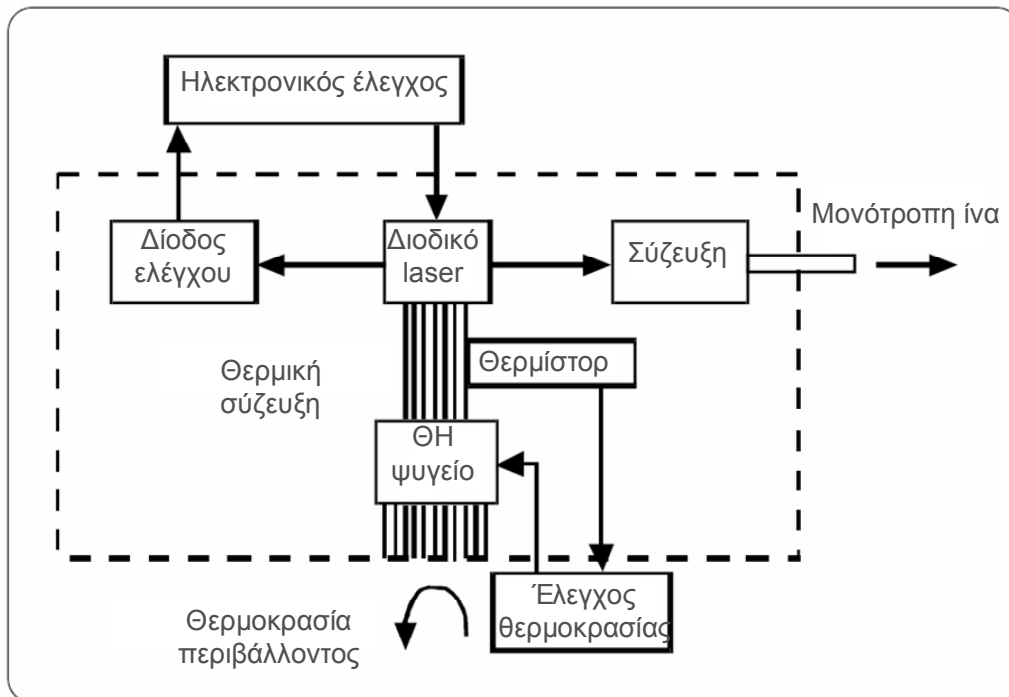
Σχ.1-9. Χαρακτηριστικά εκπομπών: α) LED, β) διοδικό laser

Η οπτική απόδοση των LED είναι σχεδόν γραμμική με το ρεύμα οδήγησης. Σχεδόν όλα τα LED παρουσιάζουν ένα κύρτωμα στην καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-9α. Αυτή η μη γραμμικότητα περιορίζει τη χρησιμότητα του LED σε αναλογικές εφαρμογές. Το κύρτωμα

μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες στη φυσική των ημιαγωγών των LED αλλά συχνά οφείλονται στην αυτοθέρμανση του ολοκληρωμένου κυκλώματος του LED.

Όλα τα LED πέφτουν σε απόδοση καθώς αυξάνει η θερμοκρασία λειτουργίας τους. Έτσι καθώς το LED οδηγείται σε υψηλά ρεύματα το ολοκληρωμένο κύκλωμα του θερμαίνεται, γεγονός που προκαλεί πτώση στην απόδοση μετατροπής και την εμφανή κύρτωση όπως στο σχήμα 1-9.

Τα LED τυπικά λειτουργούν σε ρεύματα με μέγιστη τιμή περίπου 100 mA. Μόνο ειδικές διατάξεις λειτουργούν σε υψηλότερα επίπεδα ρεύματος.



Σχ.1-10. Δομή ενός διοδικού laser

Επιπροσθέτως, ο έλεγχος θερμοκρασίας είναι πιθανό να ελέγξει την οπτική ισχύ εξόδου. Γι' αυτό το λόγο μια φωτοδίοδος (δίοδος ελέγχου) τοποθετείται δίπλα στην οπίσθια ακμή του laser. Το διοδικό laser, η δίοδος ελέγχου, το θερμίστορ και το θερμοηλεκτρικό ψυγείο είναι εγκατεστημένα σε μια ερμητικά κλειστή αεροστεγή συσκευασία.

Ελεγκτές διοδικών laser

Για τον σταθερό και ασφαλή έλεγχο ενός διοδικού laser είναι αναγκαία μια ακριβής πηγή ρεύματος. Αυτή η πηγή πρέπει ακόμη να εξασφαλίζει προστασία σε μια σειρά λειτουργίες : αργή αύξηση του ρεύματος του laser (ομαλή εκκίνηση), προστασία από αιφνίδιες μεταβολές τάσης που εμποδίζει κάθε είδος διαταραχών δικτύου, έλεγχο μανδάλωσης για το καλώδιο σύνδεσης στο διοδικό laser και ασφαλή ρύθμιση ορίων για το διάχυτο ρεύμα. Επιπλέον η πηγή ρεύματος πρέπει να είναι χαμηλού θορύβου και πρέπει να εξασφαλίζει σταθερό ρεύμα για τις δύο δυνατότητες λειτουργίας και σταθερή ισχύ (το διάχυτο ρεύμα διατηρείται σταθερό όπως επίσης και η οπτική ισχύς εξόδου του laser).

Κυκλώματα οδήγησης laser

Το σχήμα 1-11 απεικονίζει δυο σχήματα κυκλωμάτων οδήγησης αναλογικών εφαρμογών laser. Το απλούστερο από τα δύο που φαίνεται στο σχ. 1-11a προσφέρει μέτρια γραμμικότητα και καλή απόδοση σε συχνότητες πάνω από 500 MHz.

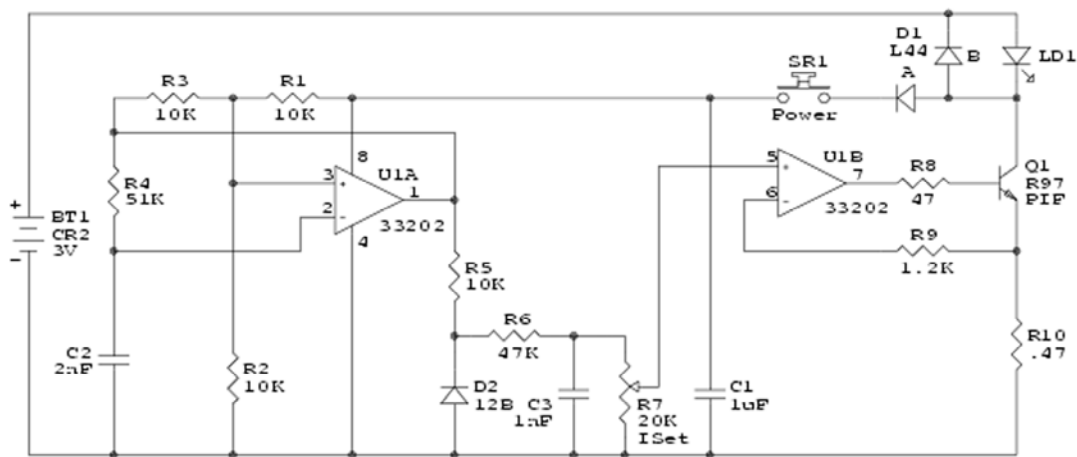
Η διαδρομή αναλογικού σήματος περιλαμβάνει μόνο τα C1 ,R1, Q1, R2, και το διοδικό laser D1. Το Q1 λειτουργεί ως ένα διαγωγίμο στάδιο κατά το οποίο η τάση εισέρχεται και το ρεύμα εξέρχεται.

Ο πυκνωτής C1 επιτρέπει να περάσει μόνο το εναλλασσόμενο τμήμα του εισερχόμενου σήματος. Η αντίσταση R1 είναι μερικές δεκάδες Ohm και καταστέλλει κάθε πιθανή ταλάντωση του Q1.

Η V_{in} , εναλλασσόμενη τάση Ac στον εκπομπό Q1 επιβάλλει μέσω της R2 τη δημιουργία ενός ρεύματος διαμόρφωσης με τιμή $V_{in}/R2$. Η U1 τροφοδοτεί DC ρεύμα στο laser μέσω των R3 και R1. Η U1 δημιουργεί σερβομηχανικό βρόχο που διατηρεί ένα σταθερό ρεύμα φωτοδίοδου μέσω οπισθοεκπομπού Pin της διόδου.

Το κύκλωμα που φαίνεται στο σχ.1-11α εμμέσως διατηρεί μια σταθερή οπτική έξοδο στο laser. Η οπισθοεκπομπός Pin δίοδος λαμβάνει φως από την άκρη του τσιπ του laser ενώ η άλλη άκρη του τσιπ φωτίζει την οπτική ίνα.

Ενώ το φως στην οπτική ίνα συσχετίζεται με το φως στο PIN ελέγχου της δίοδου δεν ταιριάζει ποτέ απολύτως σε όλη την έξοδο στις περιβαλλοντικές συνθήκες, ένα φαινόμενο που ονομάζεται σφάλμα ίχνους.

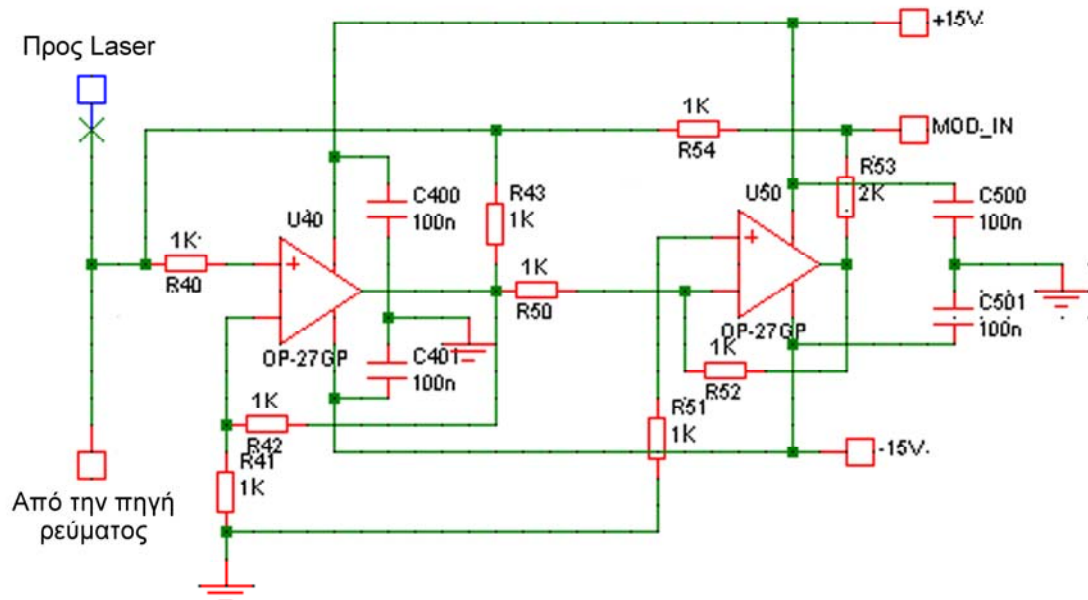


Σχ. 1-11 α. Απλό κύκλωμα οδήγησης διοδικού laser

Το σχήμα 1-11β δείχνει ένα πιο προηγμένο κύκλωμα laser που προσφέρει από καλή έως εξαιρετική γραμμικότητα σε πολύ υψηλές συχνότητες (GHz). Η διαδρομή σήματος αυτού του κυκλώματος περιλαμβάνει μόνο τα U2, Z1, C1 και το διοδικό laser D1.

Ο ενισχυτής U2 παρέχει σύζευξη εισόδου και απομονώνει το laser από τις εξωτερικές συνθήκες. Το τμήμα με την ταμπέλα Z1 μπορεί να εκτελεί πολλές λειτουργίες. Το λιγότερο διασυνδέει την απόδοση του ενισχυτή U2 συνήθως 50 ή 75 Ohms στο laser που έχει εμπέδηση

που κυμαίνεται από 5 Ohms σε 25 Ohms. Όπως φαίνεται, το σύστημα του laser ενσωματώνει αυτό το κέρδος εμπέδησης.



Σχ. 1-11 β. Προηγμένο κύκλωμα οδήγησης διοδικού laser

Διοδικά laser ομοεπαφής

Οι αντλητικές διεργασίες σε ένα laser ημιαγωγού επιτυγχάνονται συνήθως με την κατασκευή του ημιαγωγού υπό την μορφή μιας διοδικής επαφής p-n με υψηλά εκφυλισμένες p και n τύπου περιοχές, δηλαδή, πολύ εμπλουτισμένες, με συγκεντρώσεις δοτών ή αποδεκτών μεγαλύτερες από 10^{18} άτομα /cm³. Με αυτόν τον τρόπο η αντιστροφή πληθυσμού πραγματοποιείται στην περιοχή της επαφής.

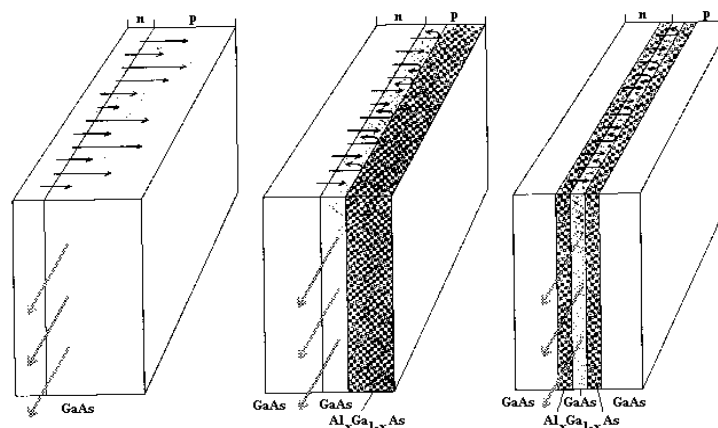
Σαν πρώτο παράδειγμα ενός laser επαφής θα θεωρήσουμε την περίπτωση όπου τα p και n τύπου υλικά είναι τα ίδια (π.χ., laser GaAs) και εφάπτονται άμεσα για να σχηματίσουν την επαφή η οποία ως εκ τούτου θα ονομάζεται ομοεπαφή. Το πρώτο laser ημιαγωγού που

αναπτύχθηκε ήταν αυτού του τύπου.

Διοδικά laser ετεροεπαφής

Τα laser ομοεπαφής μπορούν να λειτουργούν cw (δηλ., σε καθεστώς συνεχούς δράσης) μόνο σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Αυτό αποτελεί ένα σοβαρό περιορισμό του laser αυτού του τύπου. Για να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, έχουν χρησιμοποιηθεί τα laser ετεροεπαφής. Το σχήμα 1-12 δείχνει ένα παράδειγμα ενός laser GaAs διπλής ετεροεπαφής. Σ' αυτήν τη δίοδο υπάρχουν δυο επαφές [Al₀jGa₀j As(p)-GaAs και GaAs-Al₀3Ga₀7 As(n)] μεταξύ διαφορετικών υλικών. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από λεπτό στρώμα GaAs (0.1-0.3 μm). Με μια τέτοια δίοδο, η πυκνότητα ρεύματος κατωφλίου για λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου μπορεί να μειωθεί περίπου κατά δυο τάξεις μεγέθους (δηλαδή σε περίπου 10³A/cm²) συγκριτικά με τη συσκευή ομοεπαφής.

Στα laser ομοεπαφής τα ηλεκτρόνια (μαύρα βέλη) εγχέονται κατά μήκος της p-n ομοεπαφής σε διαφορετικές αποστάσεις μέσα στην p περιοχή (η έγχυση των οπών δεν είναι απαραίτητη μέχρι να επιτευχθούν αρκετά υψηλά επίπεδα ρεύματος). Στη διάταξη ομοεπαφής το φως διεισδύει στο γειτονικό υλικό εκτός περιοχής όπου λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο μέρος της διέγερσης προκαλώντας απώλεια



Σχήμα 1-12. Σύγκριση των αρχών λειτουργίας των Laser ομοεπαφής (αριστερά), ενός απλού Laser ετεροεπαφής (κέντρο) και Laser διπλής ετεροεπαφής (δεξιά)

φωτός που διαφορετικά θα συνέβαλλε στη διέγερση. Στη διάταξη μονής ετεροεπαφής το φώς δεν διεισδύει σημαντικά δια μέσου της p-p ετεροεπαφής και τα ηλεκτρόνια ανακλώνται. Ως αποτέλεσμα επιτυγχάνεται υψηλός περιορισμός των φορέων του φωτός. Στις οπές της διάταξης διπλής ετεροεπαφής, ηλεκτρόνια και φώς περιορίζονται αποτελεσματικά σε μια πολύ λεπτή περιοχή μεταξύ των δυο ετεροεπαφών. Τα ηλεκτρόνια ανακλώνται από το δυναμικό βάσης στην ζώνη αγωγιμότητας στην p-p ετεροεπαφή και οι οπές ανακλώνται από το φράγμα δυναμικού στη ζώνη σθένους στην p-n ετεροεπαφή. Ο περιορισμός του φωτός οφείλεται στη διαφορά του δείκτη διάθλασης ανάμεσα στο γάλιο-αρσενικό και στο αλουμίνιο –γάλλιο –αρσενικό.

Συμβαίνει να υπάρχουν πλεονεκτήματα από τη χρήση αρκετών επαφών τοποθετημένων κοντά που σχηματίζονται με στρώματα p & n υλικών.

Αυτά ονομάζονται διοδικά laser ετεροεπαφής. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται περισσότερο προχωρημένες δομές. Για παράδειγμα, ο VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes) είναι ένας νέος τύπος με εντυπωσιακές εφαρμογές σε αρκετές περιοχές της τεχνολογίας.

Μεγάλης ισχύος διοδικά laser

Τα διοδικά laser μεγάλης ισχύος παράγουν ισχύ ακτινοβολίας της τάξης των W, δεκάδων ή εκατοντάδων W από μια δίοδο ή μια συστοιχία διόδων σε ένα απλό πακέτο ή μια διάταξη συστοιχιών διοδικών laser. Συνήθως είναι εκπομποί κοντινού υπέρυθρου, που εκπέμπουν στα 808 nm. Laser στερεάς κατάστασης με άντληση από διοδικό laser, οδηγούνται από αυτές τις φωτεινές πηγές και ορισμένες δίνουν πάνω από 1000 W.

Οι συστοιχίες αποτελούν ένα 10 mm εύρους ολοκληρωμένο κύκλωμα με τυπικά 16-24 εκπομπούς. Κάθε εκπομπός είναι κοντά στα 150 μικρά εύρος και εκπέμπει μέχρι 2 W ισχύ.

Σχεδόν όλες οι συστοιχίες αποτελούν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, δηλαδή διάταξη πολλαπλών εκπομπών. Στο ξεκίνημα αυτής της τεχνολογίας η Siemens παρήγαγε μια διάταξη 5 W αποτελούμενη από 5 ξεχωριστά διοδικά laser του 1 W τοποθετημένα σε στοίχο μήκους 10 mm.

Συστοιχίες διοδικών laser πολύ μεγαλύτερης ισχύος είναι διαθέσιμες μέχρι ή πάνω από την κλίμακα των KW. Φυσικά το κόστος αυξάνεται. Οι συστοιχίες μπορεί να 'ναι συνδεδεμένες σε σειρά για διευκόλυνση της παροχής ισχύος δίνοντας τη δυνατότητα να οδηγούνται με μικρότερο ρεύμα σε υψηλότερη τάση (π.χ μια σύνθεση 4 συστοιχιών μπορεί να χρησιμοποιήσει 8V στα 50A αντί 2V στα 200A).

Τα περισσότερα υψηλής ισχύος διοδικά laser είναι κοντά στο υπέρυθρο συνήθως γύρω στα 800nm για άντληση DPSS lasers ή 830-870nm για θερμικά plate setters. Διοδικά laser υψηλής ισχύος στο ορατό είναι πολύ λιγότερο συνηθισμένα και περιορίζονται σε λιγότερο από 1 W στα 670 nm.

Παλμικά διοδικά laser υψηλής ισχύος

Ενώ τα παλμικά διοδικά laser έχουν ικανοποιητική μέγιστη ισχύ η μέση κορυφή βαθμονόμησης είναι τυπικά μόνο λίγα mW. Επιπλέον τα περισσότερα κοινά μήκη κύματος βρίσκονται μεταξύ 850 και 910 nm και αυτά δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για εφαρμογές με laser (αν και μήκη κύματος από 780-980nm είναι διαθέσιμα). Η διάχυση της ισχύος είναι ένας από τους περιοριστικούς παράγοντες. Το απόλυτο όριο είναι η θερμική αντοχή στο εσωτερικό του πλακιδίου του διοδικού laser.

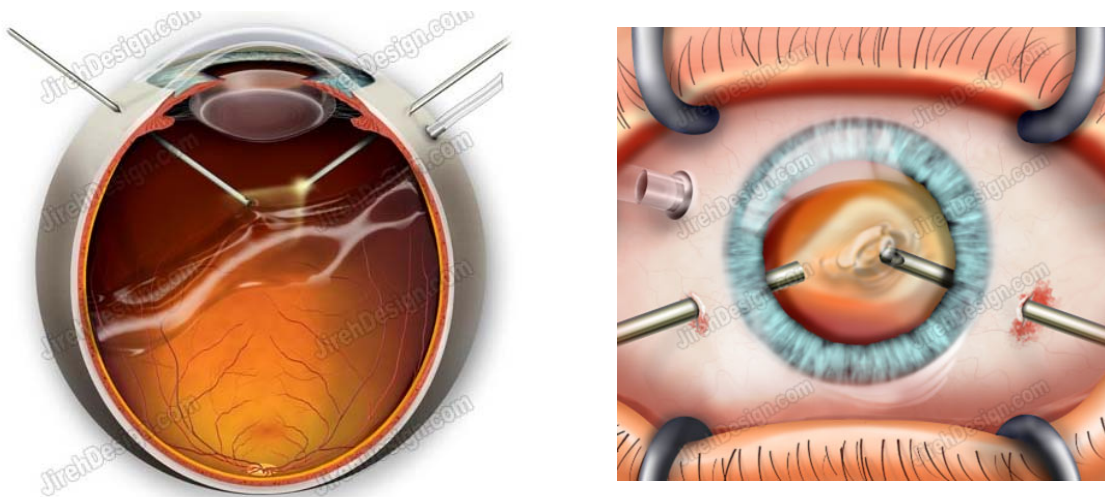
Κεφάλαιο 2

Ενδοχειρουργική χρήση οφθαλμιατρικών laser

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα χειρουργικών επεμβάσεων με χρήση ακτινοβολίας laser, καθώς και μέσα τεχνολογικής υποστήριξης κυρίως ενδοφθάλμιοι σπειροειδοί, (endophthalmic probes) αυτών των χειρουργικών τεχνικών.

Ενδοϋαλοειδική χειρουργική της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς

Στην ενδοϋαλοειδική χειρουργική επέμβαση, η πρόσβαση στο υαλοειδές σώμα επιτυγχάνεται με το άνοιγμα τριών τομών στο σκληρό χιτώνα πάνω από το ακτινωτό σώμα (pars plana).

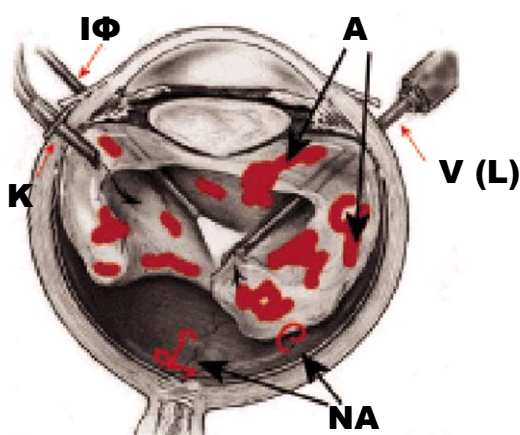


Σχήμα 2-1.Υαλοειδεκτομή ακτινωτού σώματος

Κάθε τομή είναι μικρότερη από 1mm. Από μια τομή εισέρχεται ο καθετήρας παροχής φυσιολογικού ορού για διατήρηση σταθερής ενδοφθάλμιας πίεσης, ενώ οι άλλες δυο τομές εξυπηρετούν το βασικό χειρουργικό εργαλείο για υαλοειδεκτομή (vitrectome-υαλοειδοτόμο),

την οπτική ίνα φωτισμού και σε περίπτωση που θα χρειαστεί ενδοχειρουργική φωτοπηξία, τον ενδοφθάλμιο στείλειό laser (Σχ. 2-2).

Κατά τη διάρκεια της ενδοϋαλοειδικής επέμβασης για αποκατάσταση της ρηγματογενούς (rhegmatogenic) αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς, ο χειρουργός αφαιρεί το υαλώδες σώμα και οπίσθια μεμβράνη υαλοειδούς. Επεξεργάζεται με κατάλληλα εργαλεία την περιο-



Σχήμα 2-2. Τοποθέτηση των ενδοφθάλμιων χειρουργικών εργαλείων για την υαλοειδεκτομή pars plana. V(L) – Vitrectome ή Laser, K – Καθετήρας, IΦ – Ινδοοπτικός Φωτιστής, NA – Νεοαγγειώσεις, A – Αιμορραγίες.

χή των ρηγμάτων για να χαλαρώσει τις ελκτικές τάσεις στον αμφιβληστροειδή, με σκοπό την επιστροφή του αποκολλημένου αμφιβληστροειδούς στην φυσιολογική του θέση.

Η αφαίρεση υγρού από τον υπαμφιβληστροειδικό χώρο πραγματοποιείται από το ρήγμα του αμφιβληστροειδούς με ένα ειδικό εργαλείο, τον καθετήρα εξώθησης (Σχ. 2-1).

Για διευκόλυνση της αποκατάστασης αμφιβληστροειδούς χρησιμοποιούνται ειδικά βιοσυμβατά υγρά (perfluororganic compounds, PFC) με μεγάλο ειδικό βάρος ($1,7-2,0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Λόγω του βάρους του, το υγρό πάντα μαζεύεται στο βυθό του οφθαλμού και συνεπώς πιέζει και «στρώνει» τον αμφιβληστροειδή αποτρέποντας νέα αποκόλληση.



Σχήμα 2-3. Ενδοχειρουργική φωτοπηξία της αποκόλλησης αμφιβληστροειδούς.

Όταν ο αμφιβληστροειδής είναι στη θέση του, πραγματοποιείται η φωτοπηξία των περιοχών των ρηγμάτων με την βοήθεια ειδικού εξαρτήματος laser, το οποίο αποτελείται από ενδοφθάλμιο σπειρώδες συνδεδεμένο με την πηγή laser με οπτική ίνα (Σχ. 2-3). Στην τελική φάση της επέμβασης, το υγρό PFC αντικαθίσταται με φυσιολογικό ορό, τα εργαλεία αφαιρούνται και στις τομές τοποθετούνται ράμματα.

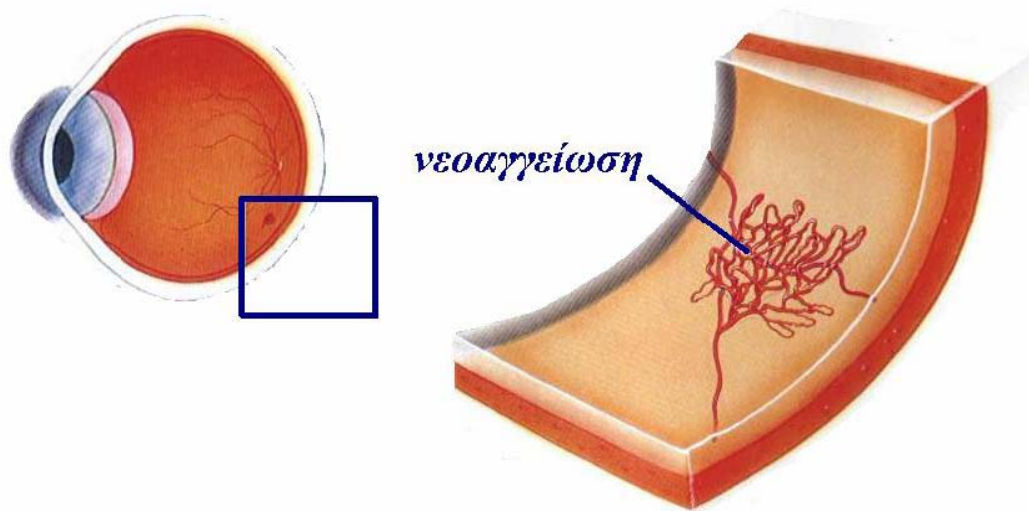
Χρήση laser στην ενδοϋαλοειδική χειρουργική της διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας

Η διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια αποτελεί κύρια αιτία πρωτοπαθούς τύφλωσης μεταξύ ενηλίκων σε όλο το δυτικό κόσμο και στην Ελλάδα. Θεωρείται ότι οι ασθενείς με διαβήτη έχουν 25 φορές σε περισσότερες πιθανότητες για τύφλωση απ' ότι ο υπόλοιπος πληθυσμός. Περίπου 80% των ασθενών που είχαν διαβήτη επί 15 χρόνια τουλάχιστον πάσχουν σήμερα από κάποιου βαθμού αγγειακή βλάβη στον αμφιβληστροειδή.



Σχήμα 2-4.Αγγειακές βλάβες εξαιτίας
διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας

Η αμφιβληστροειδοπάθεια του υποστρώματος είναι πρώιμο στάδιο της διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας. Στο στάδιο αυτό, τα τριχοειδή αγγεία μέσα στον αμφιβληστροειδή καταστρέφονται, δημιουργώντας διαρροή μικρών ποσοτήτων αίματος ή υγρού. Το υγρό που διαρρέει δημιουργεί οίδημα στον αμφιβληστροειδή ή οδηγεί στον σχηματισμό ιζημάτων που λέγονται εξιδρώματα. Οι αλλαγές που συμβαίνουν όταν νέα μη φυσιολογικά αγγεία αρχίζουν να αναπτύσσονται στην επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς περιγράφονται από τον όρο «υπερπλαστική αμφιβληστροειδοπάθεια».

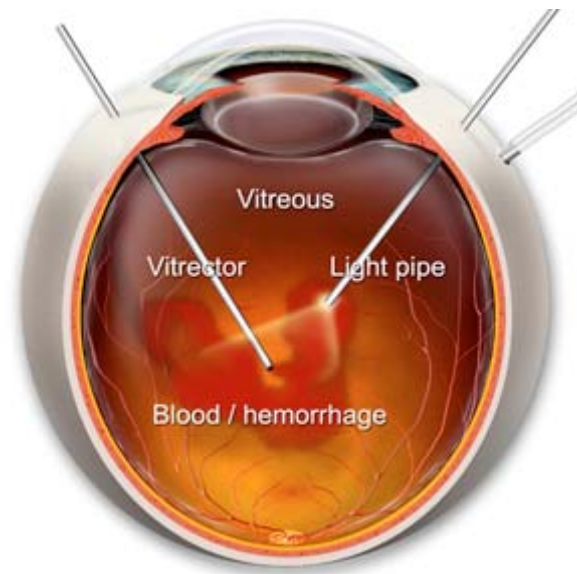


Σχήμα 2-5. Νεοαγγείωση

Η ανώμαλη αυτή αύξηση καλείται νεοαγγείωση. Τα νέα αγγεία έχουν πιο αδύναμα τοιχώματα και μπορεί να σπάσουν και να αιμορραγήσουν. Το αίμα από τη διαρροή μπορεί να προκαλέσει νέφη στο υαλώδες και να αποφράξει μερικώς τη διέλευση του φωτός από την κόρη του οφθαλμού προς τον αμφιβληστροειδή, προκαλώντας θολές και παραμορφωμένες εικόνες.

Τα ανώμαλα αγγεία συχνά αναπτύσσουν ουλώδη ιστό που μπορεί να ασκήσει έλξη, απομακρύνοντας τον αμφιβληστροειδή από το οπίσθιο τοίχωμα του οφθαλμού (αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς). Ανώμαλα αγγεία μπορούν επίσης να αναπτυχθούν γύρω από την κόρη, πάνω στην ίριδα, προκαλώντας γλαύκωμα εξαιτίας της αύξησης της ενδοφθάλμιας πίεσης.

Η υπερπλαστική διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια αποτελεί τη πιο σοβαρή μορφή διαβητικής αμφιβληστροειδικής νόσου. Εμφανίζεται σε ποσοστό μέχρι και 20% των διαβητικών και μπορεί να προκαλέσει σοβαρή απώλεια της οράσεως, ακόμη και τύφλωση.



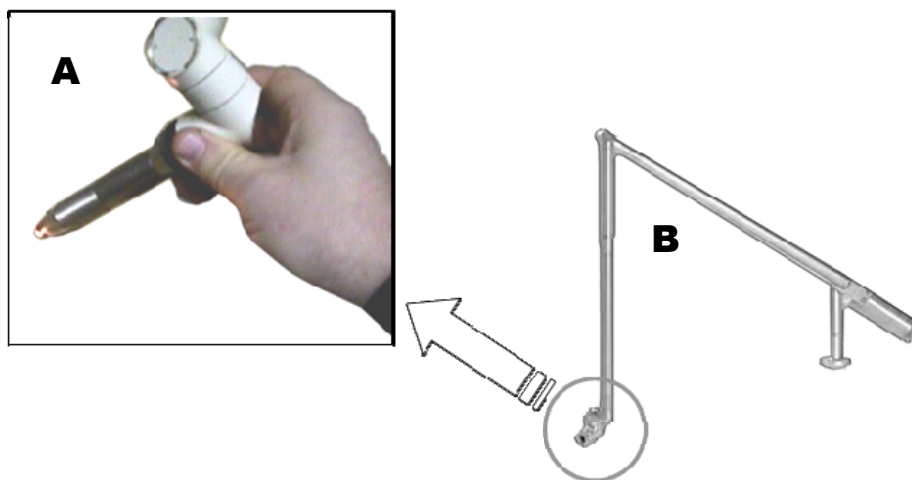
Σχήμα 2-6

Η **χειρουργική με laser** βοηθά συχνά στην θεραπεία της διαβητικής αμφιβληστροειδοπάθειας. Η δέσμη λέιζερ εστιάζεται επάνω στον κατεστραμμένο αμφιβληστροειδή. Η φωτοπηξία σφραγίζει τη διαρροή από τα αμφιβληστροειδικά αγγεία για να ελαττωθεί το οίδημα της ωχράς.

Για την νεοαγγείωση, οι δόσεις της ακτινοβολίας laser διαχέονται στις πλαϊνές περιοχές του αμφιβληστροειδούς. Οι μικροσκοπικές ουλές του laser ελαττώνουν την ανώμαλη ανάπτυξη αγγείων και βοηθούν στην ανάπτυξη δεσμών ανάμεσα στον αμφιβληστροειδή και το οπίσθιο τοίχωμα, λειτουργώντας ως προληπτικό μέτρο για την αποκόλληση.

Όπως είναι γνωστό η χρήση των laser στην οφθαλμιατρική ήταν μια από τις πρώτες εφαρμογές των laser και πραγματοποιήθηκε σε διάστημα λιγότερο από ένα χρόνο μετά την πρώτη επιτυχή λειτουργία του laser. Για τη μεταφορά της ακτινοβολίας laser στον οφθαλμικό ιστό, οι πρώτες γενιές των οφθαλμιατρικών laser χρησιμοποιούσαν κατοπτρικούς αρθρωτούς βραχίονες (σχήμα 2-7).

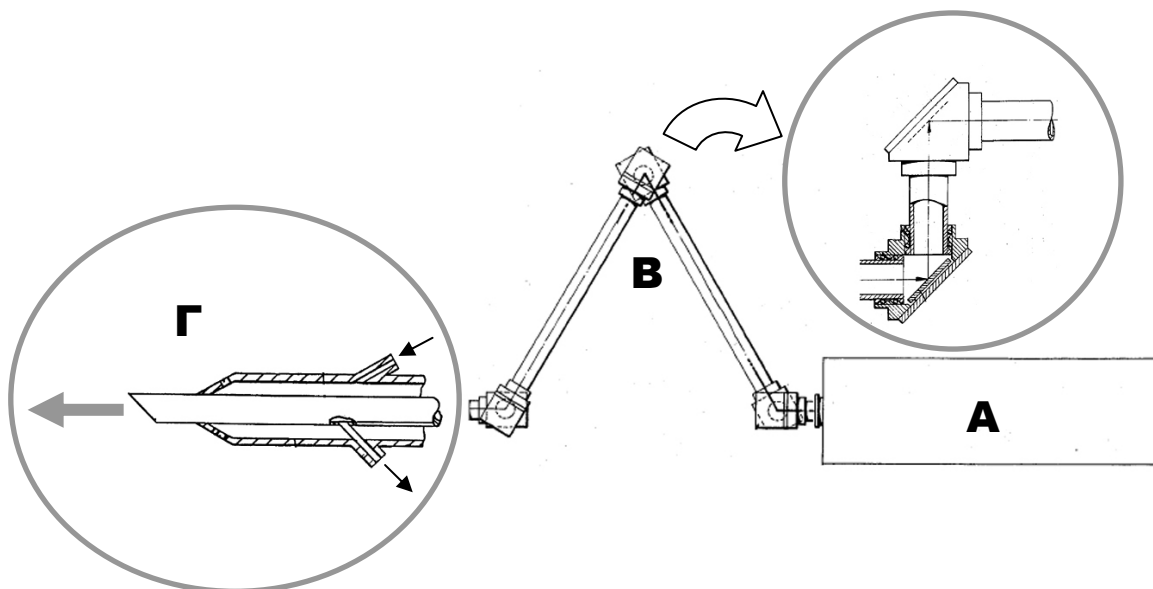
Τα συστήματα αυτά παρέχουν δυνατότητα μεταφοράς της ακτινοβολίας laser με όλους τους απαραίτητους βαθμούς ελευθερίας ελιγμών της δέσμης laser, αλλά οι αρθρωτοί βραχίονες έχουν σχετικά μεγάλες διαστάσεις και αρκετό βάρος και γι' αυτό δεν παρείχαν ευελιξία στο βαθμό που απαιτεί η ενδοχειρουργική χρήση. Παρόλα αυτά σε αυτή τη φάση ανάπτυξης των ενδοχειρουργικών laser πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες προσπάθειες ενδοχειρουργικής τους χρήσης.



Σχήμα 2-7 Στειλός Laser (A) με κατοπτρικό αρθρωτό βραχίονα (B) μεταφοράς της ακτινοβολίας (Εταιρία Coherent Inc., 1975).

Στο Σχήμα 2-7 φαίνεται αρθρωτός κατοπτρικός βραχίονας της εταιρίας Coherent στο άκρο εξόδου του οποίου προσαρμόζεται ο πρωτότυπος στειλός ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενδοχειρουργικά.

Οι πρώτες προσπάθειες ενδοχειρουργικής χρήσης οφθαλμιατρικών laser με τη βοήθεια ενδοϋαλοειδικών εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκαν πολύ πριν την ανάπτυξη ινσοπτικών συστημάτων μεταφοράς ακτινοβολίας laser. Στο Σχήμα 2-8 απεικονίζεται αρθρωτός βραχίονας με ειδικό εξάρτημα για υαλοειδεκτομή με χρήση laser.



Σχήμα 2-8. Μεταφορά της δέσμης laser στο ενδοφθάλμιο εξάρτημα μέσω αρθρωτού κατοπτρικού βραχίονα (A.Vassiliadis, H.Zweng, N.Peppers, 1972). A - πηγή laser, B - αρθρωτός κατοπτρικός βραχίονας, Γ - ενδοφθάλμιο εξάρτημα laser

Με την ανάπτυξη ινιοπτικών συστημάτων μεταφοράς ακτινοβολίας laser τα ενδοχειρουργικά εξαρτήματα απόκτησαν ιδιαίτερη σημασία. Όλες οι εταιρείες που παράγουν οφθαλμοχειρουργικά laser τα εφοδιάζουν με ενδοφθάλμιους σπειλεούς (endophthalmic probes) που συνδέονται με την πηγή laser με τη βοήθεια οπτικών ινών. Η χρήση των οπτικών ινών παρέχει σ' αυτά τα εξαρτήματα σχετικά ικανοποιητική ευελιξία.

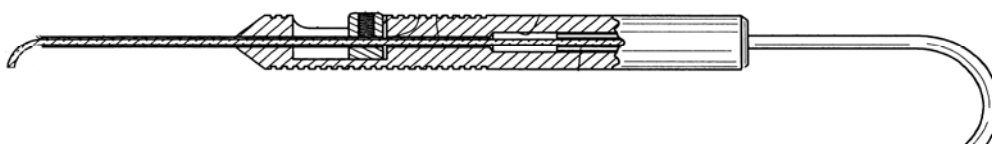
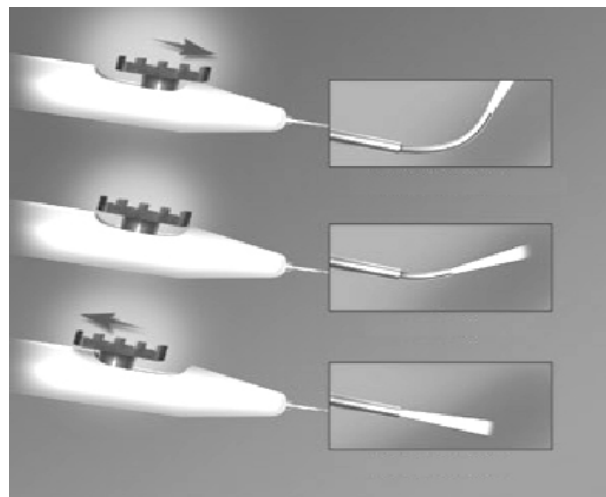
Ακολουθούν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα των συσκευών αυτού του τύπου.

Οι συσκευές στο σχήμα 2-10 χρησιμοποιούνται για ακτινοβολήση της περιφέρειας του αμφιβληστροειδούς και γι' αυτό το σκοπό η άκρη τους έχει σφηνοειδή μορφή για διευκόλυνση του οπτικού ελέγχου της ακτινοβολήσης.



Σχήμα 2-10 Ινοοπτικά εξαρτήματα laser για ενδοφθάλμια ακτινοβολήση της περιφέρειας του αμφιβληστροειδούς

Το σχήμα 2-11 απεικονίζει ανάλογο εξάρτημα το οποίο διαφέρει στο ότι το άκρο του σπειλεού έχει δυνατότητα κάμψης σε ευρεία περιοχή (0-90°), για πλήρη έλεγχο της περιφέρειας του αμφιβληστροειδούς .



Σχήμα 2-11 Ινοοπτικό εξάρτημα μεταφοράς δέσμης laser με δυνατότητα κάμψης του άκρου του σπειλεού μέχρι 90° (IRIDEX Co)

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 3

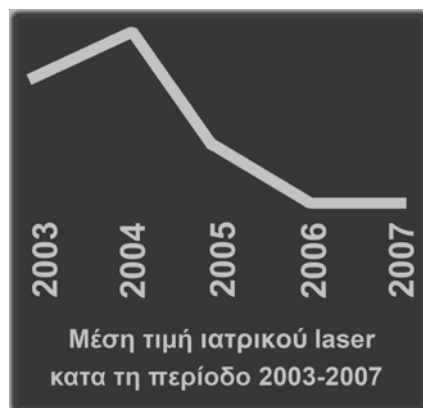
Τεκμηρίωση επιλογής του τύπου, του καθεστώτος λειτουργίας και των λειτουργικών παραμέτρων του διοδικού laser

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι παράμετροι και τα καθεστώτα λειτουργίας σύγχρονων διοδικών laser που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ενδοχειρουργικές εφαρμογές. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, τεκμηριώνεται η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου και των παραμέτρων λειτουργίας του διοδικού laser που προτείνεται για χρήση στην επόμενη φάση της μελέτης.

Μελέτη της αγοράς

Η τεχνολογία laser χρησιμοποιείται περισσότερο στην οφθαλμολογία από ότι σε άλλες ειδικότητες. Το laser Ar ειδικότερα έχει αποδειχτεί αποτελεσματικό εργαλείο για μεγάλο αριθμό οφθαλμολογικών παθήσεων.

Ωστόσο, το διοδικό laser ημιαγωγών πιθανόν αντιπροσωπεύει μια εναλλακτική λύση, σχετικά με το laser Ar, για τη θεραπεία μιας σειράς παθήσεων. Το διοδικό laser σε σχέση με το laser Ar έχει πολλά πλεονεκτήματα με σημαντικότερο τη μείωση του κόστους θεραπείας των ασθενών. Το σχήμα 3-1 παρουσιάζει την εξέλιξη των δαπανών αγοράς οφθαλμιατρικών laser κατά τη τελευταία πενταετία 2003-2007. Η μείωση της μέσης τιμής οφείλεται κυρίως στην αύξηση της αγοράς των διοδικών laser.



Σχήμα 3-1. Μέση τιμή του κόστους των οφθαλμιατρικών laser κατά την τελευταία πενταετία 2003-2007

TABLE 1. Worldwide medical-laser system sales (\$ millions)

	2004	2005	2006	2007 (estimate)	2008 (forecast)
Worldwide	2,390	2,756	3,091	3,303	3,637
United States	1,554	1,791	2,009	2,114	2,328
Application					
Surgical	843	1,000	1,212	1,383	1,598
Ophthalmic	467	500	516	519	545
Diagnostic	350	405	473	506	570
Therapeutic	110	121	125	127	139
Accessories/ services/royalties	620	730	765	769	785

Σχήμα 3-2. εξέλιξη των πωλήσεων ιατρικών laser παγκοσμίως κατά τη πενταετία 2004-2008

TABLE 2. Sales of selected medical-laser manufacturers (\$ millions)					
	2004	2005	2006	2007 (estimate)	2008 (forecast)
Alcon	63	58	64	55	57
Bausch/Lomb	152	139	150	140	145
Biolase	61	56	67	69	70
Candela	112	133	160	166	175
Carl Zeiss Meditec	58	75	90	138	150
Cardiogenesis	15	17	19	14	16
Cutera	51	71	92	105	115
Diomed	13	18	23	25	27
IntraLase	60	91	130	—	—
Iridex	33	36	40	54	55
Laserscope	94	125	163	110	120
LaserSight	8	6	8	2	2
Lumenis	271	281	310	260	260
Palomar	54	75	105	130	140
Photomedex	18	29	38	36	37
PLC Systems	8	8	8	8	8
Spectranetics	35	42	50	70	73
Syneron	59	88	120	139	145
Trimedyne	7	6	6	7	8
VISX/AMO/Intralase	166	195	234	330	350
WaveLight	65	85	111	101	110
Total	1402	1634	1988	2081	2188
Year-over-year increase	19%	17%	22%	9%	9%

Σχήμα 3-3. Μεγαλύτεροι παραγωγοί οφθαλμιατρικών laser κατά τη τελευταία πενταετία.

Πρέπει να σημειωθεί ότι παράλληλα με την αναφερόμενη μείωση της μέσης τιμής οφθαλμιατρικού laser, παρατηρείται σημαντική αύξηση της αγοράς ιατρικών laser, στην οποία τα οφθαλμιατρικά laser παίζουν σημαντικό ρόλο (βλ. πίνακα στο Σχ. 3-2).

Όσον αφορά τους μεγαλύτερους παραγωγούς οφθαλμιατρικών laser, στον πίνακα του Σχ. 3-3 παρουσιάζονται οι πρώτες 20 σε πωλήσεις εταιρείες σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα των τελευταίων 5 ετών.

Η συμβολή των διοδικών laser στην δυναμική εξέλιξη των οφθαλμιατρικών laser είναι σημαντική. Στον πίνακα του σχήματος 3-4 φαίνεται η θέση των ιατρικών εφαρμογών στην παγκόσμια αγορά διοδικών laser.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παρουσιάζονται σε αυτόν τον πίνακα, οι ιατρικές εφαρμογές, οι τηλεπικοινωνίες, οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες, τα συστήματα οπτικής μνήμης κ.α., τομείς στους οποίους χρησιμοποιούνται τα διοδικά laser έχουν μεγαλύτερους ρυθμούς εξέλιξης την τελευταία τριετία.

Όσον αφορά συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των διοδικών laser, αξίζει να αναφερθούν τα εξής:

- **Μήκος κύματος.** Μεγαλύτερη εφαρμογή στη ιατρική βρίσκουν διοδικά laser κοντινού υπερύθρου ($\lambda = 750 \text{ nm} \div 980 \text{ nm}$). Όσον αφορά τα διοδικά laser που εκπέμπουν στην περιοχή του ορατού, δεν υπάρχουν αναφορές για οποιεσδήποτε σημαντικές κλινικές εφαρμογές τους στην ιατρική.
- **Ισχύς της ακτινοβολίας.** Οι παράμετροι ισχύος των περισσότερων ιατρικών διοδικών laser κυμαίνονται από $100 \text{ mW} \div 10 \text{ W}$, δηλαδή στην περιοχή μέσης ισχύος. Τα διοδικά laser με ισχύ άνω των 10 W έχουν πολύ μικρότερη ζήτηση, ενώ τα διοδικά laser με ισχύ ακτινοβολίας μικρότερη των 100 mW δεν βρίσκουν εφαρμογή στην ιατρική (πρέπει να τονιστεί ότι ο πίνακας του Σχ. 3-4 περιλαμβάνει μόνο συσκευές διοδικών laser για θεραπευτικές εφαρμογές).

Table 1. Worldwide commercial diode-laser sales 2006–2007 (units)

DIODE UNITS		Materials processing	Medical therapeutics	Instrumentation	Basic research	Telecommunications	Optical storage	Entertainment	Image recording	Inspection, measurement, and control	Barcode scanning	Sensing	Other	Solid-state laser pumping	TOTALS
<700 nm	2006	0	0	0	0	0	330,105,000	27,800,000	19,500	16,630,000	6,780,000	0	0	0	381,334,500
	2007	0	0	0	0	0	356,830,000	22,700,000	21,500	16,690,000	7,030,000	0	0	0	403,271,500
750–980 nm <100 mW	2006	0	0	0	0	0	392,000,000	0	10,400,000	0	0	9,900,000	13,430,000	0	425,730,000
	2007	0	0	0	0	0	391,000,000	0	11,100,000	0	0	13,365,000	17,170,000	0	432,635,000
750–980 nm 100 mW–10 W	2006	0	192,150	0	0	150,000	0	0	90,000	0	0	0	1,500	490,000	923,650
	2007	0	202,150	0	0	160,000	0	0	80,000	0	0	0	1,550	570,000	1,013,700
750–980 nm >10 W	2006	6,000	84,860	0	1,000	0	0	0	5,450	0	0	10,000	31,100	24,780	163,190
	2007	6,790	95,350	0	1,000	0	0	0	6,050	0	0	10,000	31,100	29,200	179,490
908–1550 nm	2006	0	600	0	0	4,660,000	0	0	0	0	0	0	1,997,400	0	6,658,000
	2007	0	800	0	0	5,390,000	0	0	0	0	0	0	2,550,900	0	7,941,700
>1550 nm	2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Stacks	2006	1,180	2,500	0	50	0	0	0	0	0	0	0	300	10,575	14,605
	2007	1,300	3,000	0	50	0	0	0	0	0	0	0	330	11,200	15,880
TOTAL UNITS	2006	7,180	280,110	0	1,050	4,810,000	722,105,000	27,800,000	10,514,950	16,630,000	6,780,000	9,910,000	15,460,300	525,355	814,823,945
	2007	8,090	301,300	0	1,050	5,550,000	747,830,000	22,700,000	11,207,550	16,690,000	7,030,000	13,375,000	19,753,880	610,400	845,057,270

Σχήμα 3-4. Βασικά πεδία εφαρμογής των διοδικών laser την περίοδο 2006-2007

Στον πίνακα αναφέρονται οι απόλυτοι αριθμοί μονάδων που πωλήθηκαν από κάθε κατηγορία.

Επιλογή του τύπου και του καθεστώτος λειτουργίας του διοδικού laser

Τα αποτελέσματα της έρευνας αγοράς παρουσιάζονται στον πίνακα του Σχ. 3-5, στον οποίο αναφέρονται τα μοντέλα διοδικών laser που συμπεριλαμβάνονται στην μελέτη. Η σύνταξη του πίνακα του Σχ. 3-5 πραγματοποιήθηκε με τα εξής κριτήρια:

- Το **μήκος κύματος** του laser πρέπει να ανήκει στην φασματική περιοχή από πράσινο μέχρι κοντινό υπέρυθρο, με προτίμηση το κόκκινο: από τη μια πλευρά, το κόκκινο φως έχει μικρότερη σκέδαση σε σύγκριση με άλλες περιοχές του ορατού, από την άλλη – είναι προτιμότερο από το αόρατο υπέρυθρο επειδή στην τελευταία περίπτωση χρειάζονται ειδικές λύσεις του προβλήματος στόχευσης. Όσον αφορά τον πόνο που, σύμφωνα με πολλές δημοσιεύσεις, προκαλούν τα διοδικά laser κόκκινου μήκους κύματος, πρέπει να τονιστεί ότι η υπό ανάπτυξη συσκευή προορίζεται για ενδοχειρουργική χρήση, σε συνθήκες τοπικής ή ολικής αναισθησίας, δηλαδή δεν υπάρχει πρόβλημα πόνου .
- Όσον αφορά το **καθεστώς λειτουργίας**, ο πίνακας περιλαμβάνει δυο διαφορετικούς τύπους laser: συνεχούς δράσης (continuous wave, CW) και παλμικά laser. Απορρίφθηκαν αρκετά laser με διάφορα σύνθετα καθεστώτα λειτουργίας (τα περισσότερα με μεγάλη συχνότητα επανάληψης παλμών, που χρησιμοποιούνται συνήθως στις τηλεπικοινωνίες), εξαιτίας του ότι, σύμφωνα με το σκοπό της μελέτης, η υπό ανάπτυξη συσκευή πρέπει να είναι απλή στη χρήση και να έχει χαμηλό κόστος.
- Επειδή η συσκευή προορίζεται για ενδοχειρουργική χρήση, μεγάλη σημασία έχουν οι **διαστάσεις του laser**: η συσκευή με ενσωματωμένο laser πρέπει να έχει αρκετά μικρές διαστάσεις, συγκρίσιμες με τις τυπικές διαστάσεις χειρουργικών εργαλείων.

Ο πίνακας του Σχ. 3-5 συμπεριλαμβάνει τα μοντέλα διοδικών laser που ανταποκρίνονται στις παραπάνω απαιτήσεις.

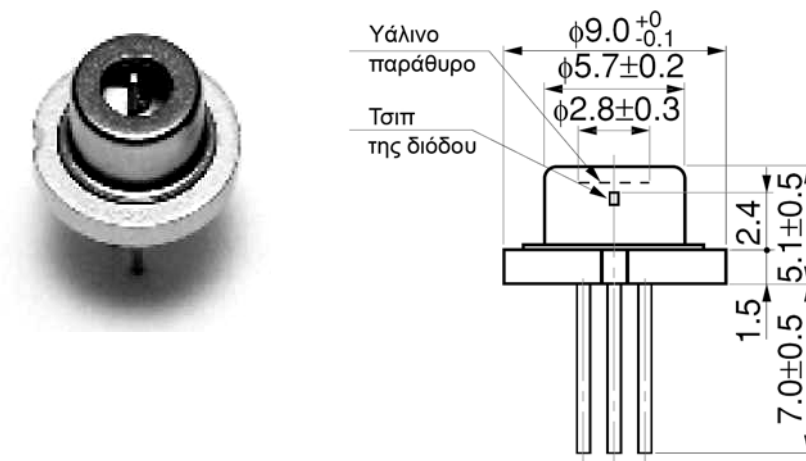
		>> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >>	1 mW - 5 mW 0,9 mW -4,5 mW 0,95 mW -4,2 mW 7 mW -25 mW 1mW - 5mW 0,95 mW -4,9 mW 20 mW - 30 mW 1.1mW - 1.4mW 0,95 mW -4,2 mW 0,6 mW -4,2 mW	635 & 670 635 ±10 & 670 ±10 670 635-830 635 ±5 - 655 ±5 635 - 670 635 670 635 & 670	€31.25 - €337.50 €231.25 - €461.25 €562.50 - €623.75 €148.75 - €166.25 €1,373.75 - €1,868.75 €431.25 - €956.25 €623.75 - €718.75 €56.25 - €7,493.75 €418.75 €173.75 - €236.25 €218.75 - €331.25	Mini Structured Light Laser Diode Modules Miniature LDM Focusable Laser Diode Modules Modulated / Variable Power Laser Diode Modules Optics for LDM Focusable Laser Diode Modules Precision Bright Diode LabLasers™ Premier Laser Diode Modules VHK™ Circular Beam Visible Laser Modules Violet Thermoelectrically Cooled Diode Lasers VLM™2 Focusable Line Generators VLM™ High Quality Laser Diode Module- Micro Series VLM™ High Quality Laser Diode Modules	>> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >>
11	Hamamatsu	http://sales.hamamatsu.com	4 mW - 5000 mW	680 ±10 & 980 ±3			
12	Melles Griot	http://www.mellesgriot.com	5 mW - 3000 mW >> >> >> >> >>	473 - 561 561±0.5 473±0.5 532±1 532±0.5		Diode-Pumped Solid-State Lasers Yellow DPSS Laser Systems Blue DPSS Laser Systems Green DPSS Laser Systems High Power Green DPSS Laser Systems	
13	New Venture Gear (NVG)	www.nvg.com	5 mW >> >> >> >> >> >>	660 780 - 980 635 -980 635 - 660 635 - 660 635 - 670 780 +/-10 - 904 +/-10	\$69.00 - 359.25 \$69.00 - 125.00 \$ 53.20 - 390.00 \$ 15 - 48 \$53.20 - 593.25 \$ 35.25 - 171.00	RED LASER MODULE Infrared Laser Diode Module Systems Micro-Laser Modules Visible and Infrared Red Visible Laser Diode Module Systems Red Visible Laser Diodes Variable Output Laser Diode Module Visible and Infrared Laser Diodes	
14	Sarnoff	www.sarnoff.com	20 mW - 1 W	1,8 μm - 3,3μm			
15	US-Lasers Inc.	http://www.us-lasers.com	5 mW	635 -850	\$ 9 - 116		
16	Sharp	www.sharp.com	7 mW -120 mW	654 - 784	\$13.56 - 74.03		
17	Lumex	www.lumex.com	5 mW - 50 mW	650 - 1550	\$5.37 - 136.90		
18	Quarton	www.quarton.com	2,5 mW - 3 mW	635 - 655	\$ 10.68 - 42.17		
19	Thotlabs	http://www.thorlabs.com	405mW - 2004mW	0,4 - 1000			
20	Vision Light Tech	http://www.visionlighttech.com	3mW - 2600 mW	532 - 1550			
21	Sony	http://products.sel.sony.com/semi/	0,55 - 4400	635 - 830			
22	Finisar Adopco (Advanced Optical Components)	http://www.adopco.com	5 mW >> >> >> >> >>	850 850 700-1600 850 850 850		1.25 Gbps VCSEL Connectorized - Datacom (780 & 670 nm, σε αναπτύξη) 1.25 Gbps VCSEL Components - Datacom(780 & 670 nm, σε αναπτύξη) 2.5 Gbps Detectors - Datacom (780 & 670 nm, σε αναπτύξη) 2.5 Gbps VCSEL Components - Datacom (780 & 670 nm, σε αναπτύξη) 2.5Gbps VCSEL Connectorized - Datacom (780 & 670 nm, σε αναπτύξη) 4.25 Gbps VCSEL & Detectors - Connectorized - Datacom (780 & 670 nm, σε αναπτύξη)	
23	Alfa Light	http://www.alfalight.com	2 W - 27 W	785 - 976			
24	Applied Optonics	http://www.applied-optonics.com	550 mW - 650 Mw >> >> >> >> >>	1550 - 1950 1065 - 1450 780 - 980 905 & 1550 635 - 690 635nm - 2μm		FAR INFRARED LASER DIODES MID INFRARED LASER DIODES NEAR INFRARED LASER DIODES PULSED LASER DIODES VISIBLE LASER DIODES	

25	Appointech	http://www.appointech.com >> >> >> >> >> >> >> >> >>	0,5 - 1 1 - 1,4 1 - 1,4 0,1 - 0,85 0,5 - 1 0,05 - 0,07 0,1 - 1,2 0,1 - 1,2 0,1 - 1,2	850 1310 1550 650 850 850 1310 1490 1550		2.5Gbps 850 VCSEL MM Module 2.5Gbps FP Laser Diode SM Module 2.5Gbps FP Laser Diode SM Module Laser Diode SM Module VCSEL MM Module VCSEL SM Module FP Laser Diode SM Module FP Laser Diode SM Module FPLaserDiodeSMModule	
26	Archcom Technology	http://www.archcomtech.com >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >> >>	100 - 140 110 - 330 0,3 - 0,5 0,3 - 0,5 4,0 - 5,0 4,0 - 5,0 0,5 - 2 4,0 - 6,0 4,0 - 5,0 4,0 - 6,0 10,0 - 15,0 12	975 - 985 975 - 985 1550 1550 1550 1550 1550 1550 1550 1550 1550 1550		Uncooled Pump Laser Module Cooled Pump Laser Module Uncooled 1. 25 Gbps Fabry Perot Laser in TOSA Package Uncooled 2.5 Gbps Fabry Perot Laser in TOSA Package Uncooled 1.25 Gbps Fabry Perot Laser in TO Package Uncooled 2.5 Gbps Fabry Perot Laser in TO Package Uncooled 2.5 Gbps Distributed Feedback Laser (DFB) in TOSA Package Uncooled 1.25 Gbps DFB Laser in TO Package Uncooled 1.25 Gbps DFB Laser in TO Package Uncooled 2.5 Gbps DFB Laser in TO Package AC5900 Series CW DFB Laser MQW-DFB 2.5Gbps Direct Modulation Laser	
27		http://www.aocepi.com >>	5 - 500 0,6 - 4	635 - 660 635 - 650		Laser Diode Product Lineup Visible Laser Module Line up	
28	CyOptics	http://www.asipinc.com >> >>		1310 -1550 1310 1550		Cooled Electroabsorption Modulated Laser Uncooled TOSA LIM	
29	A.W.I. Industries Inc.	http://www.awi-industries.com >>	< 1 - < 5 < 5	635 - 650 532		RED GREEN	
30	Axcel Photonics	http://www.axcelphotonics.com >>	50 - 500 0,2 W - 30 W	785 - 1060 785 - 1060		Single mode lasers Multi mode lasers	
31		http://www.ayaseamerica.com	5 - 500	635 - 808			
32		http://www.furukawaamerica.com	>= 20	488 +/- 2		Blue Laser Module	
33		http://www.jameco.com >> >>	< 5 5 5	650 650 650	\$44.95 \$14.95(DIODE) 7,95(DFB) \$114.95/89.95/19.95/49	Laser Diode Module Laser Diode and Driver Line and Dot Laser Diodes	
34		http://www.jdeclaser.com >>	4W - 5W 5 - 500	850 - 1550 635 - 980		High Power Pulsed Laser Diodes High Power CW Laser Diodes	
35		http://www.princetel.com >>		635-1790 532-1790		Diode laser beam combiners Laser Pigtailling	
36		http://www.mouser.com	0,97 - 8,2	635 - 670			
37		http://www.bwtek.com >> >> >> >> >>	4,0 - 20,0 0 - 2.5 >1 3 - 100 3 - 100	375+/-10 - 475+/-2 635 -2000 980+/-10 - 1610+/-15 532 +/- 1 - 830 +/- 10 532 +/- 1 - 830 +/- 10		LOW NOISE VIOLET/RED LASERS Pig High Power Fiber Coupling Laser Diode Pigtailed Diode Laser (Low Noise Green / Yellow / Red / NIR Lasers SmartLaze™ Lasers	PWB BWK BWKM BWN >>

	>>	20 - 2500	1064		Diode Pumped Solid State NIR Laser	BWR
38	http://www.bea-eo.com	0,5 - 35	532 - 670	\$ 10 - 1050	LASER DIODE MODULES	
39	http://www.bookham.com	30 W - 50 W	806 980		Multimode Laser Diode Solutions	
40	http://www.calpaclasers.com	0,5-5 (CW)	532 - 650	\$ 25 - 199		
41	http://www.bostonlaserinc.com	15 mW - 40 W	635 - 1550			
42	http://www.coherent.com	22 W - 1280 W	795 - 990			
43	http://www.crystalaser.com	2,0 - 3000	262 - 1550			
44	http://www.dmgtechusa.com	0,4 - 1	1269 - 1580			
45	http://www.ealingcatalog.com/	0,97 - 27,5	635 - 650			
46	http://www.roithner-laser.com	10 - 140	980 - 1480		EDFA PUMP LASER DIODES	
	>>	5mW - 150 W	635 - 2340		HIGH POWER LASER DIODES	
	>>	200 µW - 15KW	670 - 1310		HIOE HIGH POWER LASER DIODES	
	>>	3 mW - 50 W	735 nm - 3.8 µm		INFRARED LASER DIODES	
	>>	5,0 - 30,0	637 - 685		QSI LASER DIODES	
	>>	5,0 - 35,0	635 - 785		SAMSUNG LASER DIODES	
	>>	50 & 200	650 & 1150		VIOLET LASER DIODES	
	>>	3 - 300	635 - 685		RED LASER DIODES	
47	http://www.cdhittec.com	< 1	635 ±10nm		RED LASER DIODES	
48	http://www.elliotscientific.com	70	375 - 1600			
49	http://www.lasermate.com	1W & 2W	808 & 980			
50	http://www.sacher-laser.com	1 - 200	375 - 1700		Fabry Perot Laser Diodes	
	>>	1 W - 10 W	630 1080		Broad Area Laser Diodes	
	>>	1 - 150	773 - 2330		DFB and DBR Laser Diodes	
	>>		375 - 1700		Antireflection Coated Laser Diodes	
	>>	10 - 1500	730 - 1080		Tapered Amplifier Diodes	
51	http://www.sanyo.com		780 - 830		AlGaAs	Laser Diodes
	>>		635 - 675		AlGaInP	>>
	>>	1,0 - 4,0				LASER DRIVE SYSTEM
	>>	90 mW - 60 W	770 - 840			INFRARED LASER DIODES
52	http://www.spectra-physics.com/	10 W - 40 W	808 ±3 - 980 ±10		Fiber Coupled Diode Laser Bars	
	>>	50 W - 600 W	808		Multi-Bar Modules	
	>>	14 W - 50 W	808 - 980		Open Heatsink Diode Laser Bars	
	>>	0,6 W - 6 W	808 ±3 - 830 ±10		Open Heatsink Single Emitter	
	>>	19 W - 30 W	808 ±3 - 980 ±10		Single Fiber Coupled Diode Laser Bars	
53	http://www.wholesaleforeveryone.com	3,0 - 4,0	640 - 660	\$ 7,00	Laser Diode with wire leads	
	>>	3,0 - 4,0	640 - 660	\$ 7,00	Laser Diode with contact spring	
	>>	3,0 - 4,0	640 - 660	\$ 7,00	Laser Diode with contact spring and momentary switch	
54	http://www.opticalfibersystems.com	0,3 W - 1 W	636 - 1060		SCFC fiber-coupled laser diode module	
	>>	15 W - 30 W	808		SPCO-1808 - pump diode module	
	>>	7 W - 20 W	805 - 1060		FCP laser module	
	>>	15 W - 30 W	805 - 976		SPCO laser diode package	
55	http://www.firstphase.com	3,0 - 80,0	635 - 780			
56	http://www.eqismos.com/	3,0 - 100,0	635 - 980			

Με τη βοήθεια των αρχικών κριτηρίων επιλογής laser που αναπτύσσονται παραπάνω, επιλέχθηκαν για σύγκριση τα ακόλουθα μοντέλα:

1. Hamamatsu L8446 Laser Diode. Το διοδικό laser αυτού του μοντέλου παράγει ακτινοβολία στην περιοχή κοντινού υπερύθρου $\lambda=808\text{nm}$, σε καθεστώς συνεχούς δράσης (cw), με μέγιστη ισχύ 1W.



Σχήμα 3-6. Διοδικό laser Hamamatsu L8446-04.
Α - γενική όψη, Β - βασικές διαστάσεις

Τα πιθανά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της επιλογής του L8446 για χρήση σε ενδοφθάλμιο στείλεό συνοψίζονται παρακάτω:

- **Ισχύς:** Για οφθαλμιατρικές ενδοχειρουργικές εφαρμογές, η ισχύς 1W είναι υπεραρκετή.
- **Διαστάσεις:** Η μέγιστη εξωτερική διάμετρος 9mm επιτρέπει ενσωμάτωση του laser σε στείλεό αρκετά ικανοποιητικών διαστάσεων.
- **Μήκος κύματος:** Επειδή το laser εκπέμπει σε περιοχή 808nm, η αόρατη ακτινοβολία κοντινού υπερύθρου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στόχευση της δέσμης πάνω στο ακτινοβόλο αντικείμενο. Χρειάζεται σχεδιασμός ενός ειδικού συστήματος στόχευσης και τοποθέτησή του μέσα στο στείλεό αυξάνοντας αναπόφευκτα τις διαστάσεις του.

- **Τιμή.** Το laser Hamamatsu L8446 έχει σχετικά υψηλή τιμή (πάνω από €1000) και αυτό το μειονέκτημα θέτει αντιοικονομική την ανάπτυξη συσκευής «μιας χρήσης» βασισμένης σε αυτό το μοντέλο διοδικού laser.

2. LDX Optronics Model LDX-2615-660.




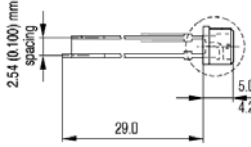

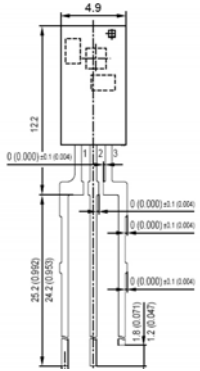
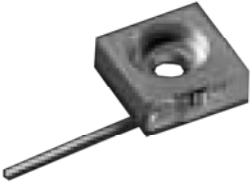
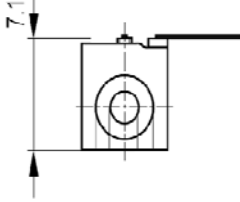
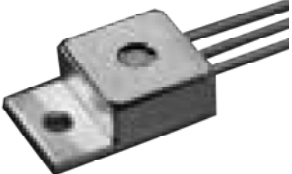
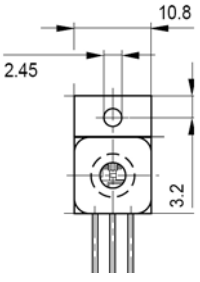
Ισχύς	600mW – 800mW
Μήκος κύματος	660nm
Θερμοκρασία λειτουργίας	20°C
Απόκλιση δέσμης	7° x 40°

Παρακάτω ακολουθεί η σύντομη ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών του διοδικού laser αυτού του μοντέλου:

- **Ισχύς:** Η ισχύς 600mW – 800mW υπερκαλύπτει τις ανάγκες συγκεκριμένης εφαρμογής.
- **Μήκος κύματος:** Κόκκινη περιοχή του ορατού ($\lambda=660\text{nm}$). Η ακτινοβολία αυτής της περιοχής είναι πιθανόν η πιο κατάλληλη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Από τη μια πλευρά, η σκέδαση της δέσμης από τα οπτικά μέσα του οφθαλμού είναι ελάχιστη, δεν δημιουργεί απώλειες της ακτινοβολίας και δεν εμποδίζει τη παρατήρηση της ακτινοβόλου περιοχής. Από την άλλη, η ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος είναι η πιο κατάλληλη για τη στόχευση με τη βοήθεια πιλοτικής δέσμης (pilot beam).
- **Διαστάσεις:** Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου μοντέλου είναι μεν σε κάποιο βαθμό μεγαλύτερες από τις επιθυμητές, αλλά θα μπορούσαν να γίνουν αποδεκτές σε περίπτωση που πληρούνται όλα τα άλλα κριτήρια επιλογής.
- **Τιμή.** Η τιμή του συγκεκριμένου μοντέλου υπερβαίνει €1000. Όμως, παρόλο που η χρήση του LDX-2615-660 σε ένα χειρουργικό εργαλείο «μιας χρήσης» είναι μάλλον αντιοικονομική,

η πειραματική δοκιμή τέτοιου τύπου laser θα είχε ενδιαφέρον ως πιλοτική μελέτη.

3. OSRAM diode lasers. Τα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα της OSRAM που μπορούν να συμπεριληφθούν στην παρούσα ανάλυση παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

	Μοντέλο	Καθεστώς λειτουργίας	Μήκος κύματος	Ισχύς	Διαστάσεις
	OSRAM SPL PL85	Παλμικό $\tau \sim 100\text{ns}$	$\lambda = 850\text{nm}$	25W	
	OSRAM SPL LL85	Παλμικό $\tau \sim 50\text{ns}$	$\lambda = 850\text{nm}$	25W	
	OSRAM SPL CG81	CW	$\lambda = 808\text{nm}$	2W	
	OSRAM SPL 2Y81	CW	$\lambda = 808\text{nm}$	2W	

Όσον αφορά τα δυο τελευταία μοντέλα, τα οποία λειτουργούν σε καθεστώς συνεχούς δράσης, πρέπει να τονιστεί ότι, παρά την υψηλή

ισχύ και σχετικά μικρές διαστάσεις, υπάρχουν δυο σημαντικά μειονεκτήματα που είναι χαρακτηριστικά και για τα δυο μοντέλα, όπως:

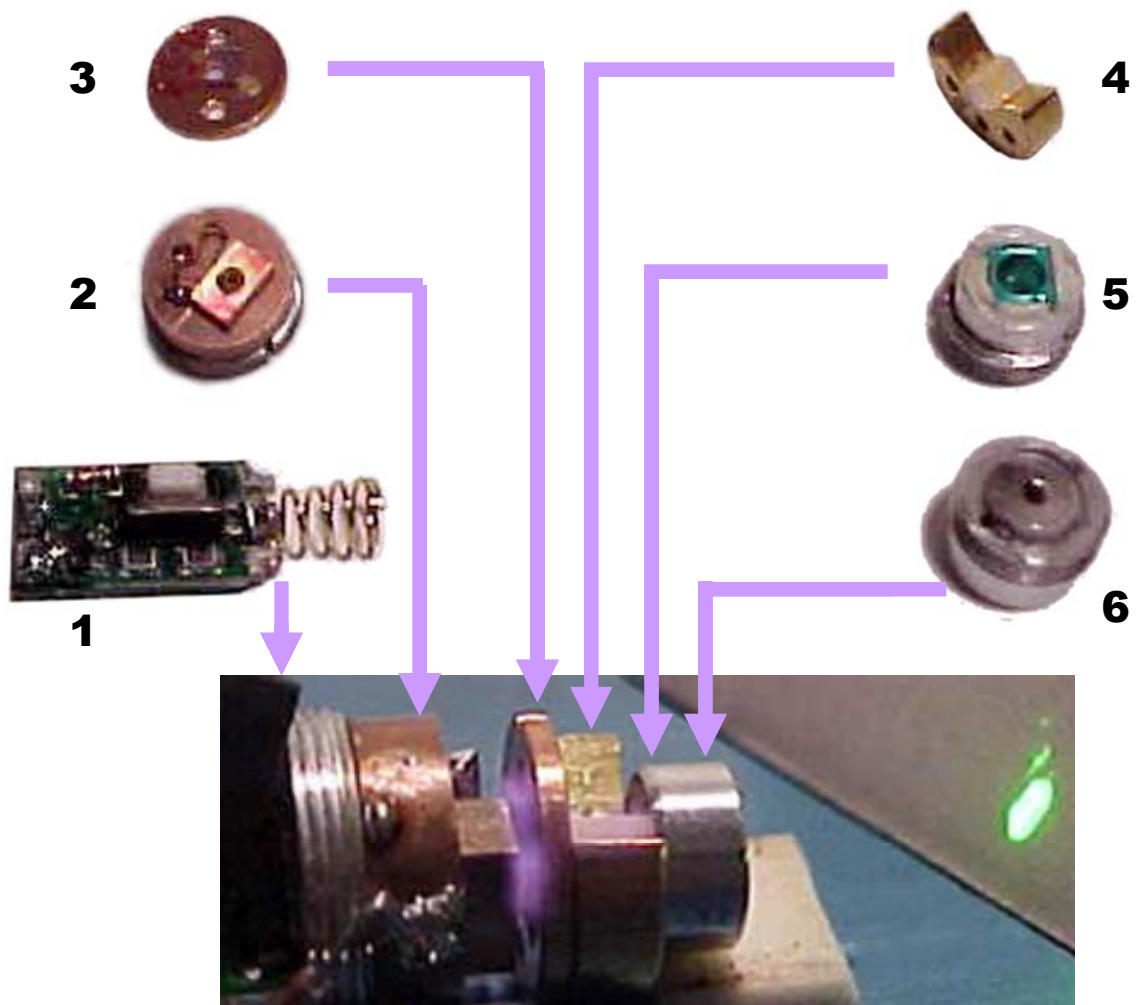
- Το **μήκος κύματος** ακτινοβολίας (περιοχή κοντινού υπερέθρου).
- Ο **σχεδιασμός** και των δυο μοντέλων δεν προβλέπει ενσωμάτωση του laser σε ένα κυλινδρικό περίβλημα με τη δέσμη κατευθυνόμενη κατά τον άξονα του κυλίνδρου.

Η **τιμή** των διοδικών laser OSRAM θα μπορούσε να είναι αποδεκτή για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Τα δυο πρώτα μοντέλα του παραπάνω πίνακα αντιπροσωπεύουν τα **διοδικά laser με παλμικό καθεστώς λειτουργίας**. Το παλμικό καθεστώς παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης χρονικών χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας σε μια ευρεία περιοχή. Στη περίπτωση του CW (συνεχούς δράσης) διοδικού laser αυτή η ρύθμιση είναι αδύνατη: η μοναδική ρυθμιζόμενη χρονική παράμετρος είναι η διάρκεια της ακτινοβολήσης. Επίσης, στα διοδικά laser συνεχούς δράσης η ρύθμιση της διάρκειας ακτινοβολήσης απαιτεί κατασκευή ειδικού κλείστρου ανάλογου του φωτοφράκτη, με ρυθμιζόμενη διάρκεια έκθεσης, ενώ στα παλμικά laser η ρύθμιση της έκθεσης μπορεί να πραγματοποιηθεί καθαρά με ηλεκτρονικό τρόπο, δηλαδή με κατασκευή ενός κυκλώματος ρύθμισης της διάρκειας, της μορφής και της συχνότητας των παραγόμενων παλμών.

Η συγκριτική μελέτη της χρήσης παλμικών διοδικών laser για ενδοχειρουργικές εφαρμογές αποτελεί ένα από τους επόμενους στόχους της παρούσας έρευνας. Ωστόσο, τα στενά χρονικά περιθώρια του μεταπτυχιακού προγράμματος περιορίζουν τις δυνατότητες ολοκλήρωσης της σύγκρισης των laser συνεχούς δράσης και των παλμικών laser. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία συμπεριλαμβάνονται μόνο διοδικά laser συνεχούς δράσης.

4. Laser πράσινης φασματικής περιοχής. Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα διοδικών laser έχουν φέρει στην αγορά μεγάλο αριθμό συσκευών με πράσινο μήκος κύματος, οι οποίες συνδυάζουν διοδικό laser με laser Νεοδυμίου, με $\lambda=532\text{ nm}$ (Σχ. 3-7).



Σχήμα 3-7. Βασικά μέρη της συσκευής Diode Pumped Solid State Frequency Doubled (DPSSFD) Laser, συνδυασμού διοδικού Laser και laser Nd:YVO₄ (Yttrium Vanadate Laser):

- 1 - ηλεκτρονικό κύκλωμα του διοδικού laser,
- 2 - διοδικό laser πάνω σε χάλκινο δίσκο,
- 3 - κρύσταλλος Vanadate πάνω σε χάλκινο δίσκο,
- 4 - κρύσταλλος KTP διπλασιασμού της συχνότητας
- 5 - φίλτρο υπέρυθρου με φακό διεύρυνσης της δέσμης
- 6 - ευθυγραμμιστικός φακός (collimating lens)

Τα εμπορικά πράσινα laser που είναι διαθέσιμα στην αγορά είναι κυρίως κινέζικης παραγωγής, με ευρύτερη ποικιλία να προσφέρεται από

την εταιρία Bob Laser Company (Guandzhou, China). Ωστόσο, τα μοντέλα πράσινων laser δεν έχουν ουσιαστική διαφορά στα χαρακτηριστικά της παραγόμενης ακτινοβολίας.

Σχήμα 3-8. DPSSFD Laser
Μοντέλο BGP-0018
(BOB Laser Company, China)



Τα μοντέλα πράσινων laser που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης είναι BGP-0014, BGP-0016, BGP-0018 (Σχ. 3-8), Σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύει η εταιρεία, παράγουν συνεχή ακτινοβολία ισχύος μέχρι 300mW με ικανοποιητική ποιότητα της δέσμης.

Τα πράσινα DPSSFD Laser αποτελούν ενδιαφέρουσα επιλογή για ενδοχειρουργική χρήση στις οφθαλμιατρικές εφαρμογές. Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματά τους είναι η σχετικά χαμηλή μέγιστη ισχύς και η υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με τα κόκκινα διοδικά laser συνεχούς δράσης (βλ. παρακάτω), λόγω του σχετικά περίπλοκου σχεδιασμού. Όμως, το πλεονέκτημα του μήκους κύματος ($\lambda=532\text{nm}$) το οποίο είναι το πιο συνηθισμένο στην οφθαλμιατρική, μπορεί να θεωρηθεί καθοριστικό στην φάση κλινικής αξιολόγησης της συσκευής.

5. Διοδικά laser συνεχούς δράσης κόκκινης φασματικής περιοχής. Τα πιο απλά μοντέλα κόκκινων διοδικών laser είναι πασίγνωστα, χάρη στη ποικιλία των δεικτών laser (laser pointers). Ωστόσο, η εμφάνιση στην αγορά των κόκκινων διοδικών laser με λειτουργικά χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης, καθυστέρησε τουλάχιστο 10 χρόνια σε σύγκριση με διοδικά laser που εκπέμπουν σε φασματική περιοχή κοντινού υπερύθρου. Αυτή η σχετική καθυστέρηση ήταν ακόμα μεγαλύτερη για τα κόκκινα διοδικά laser συνεχούς δράσης. Στην παρούσα φάση εξέλιξης αυτού του τεχνολογικού τομέα έχουν αναπτυχθεί μοντέλα κόκκινων διο-

δικών laser ικανοποιητικών διαστάσεων ισχύος μέχρι 0,5W (βλ. Σχ.3-9).



Σχήμα 3-9. Διοδικά laser κόκκινης περιοχής (Elite Optoelectronics Co., China)

1 – Μοντέλο EL65C05CP2

2 – Μοντέλο EL65D60IG2

3 – Μοντέλο EL65D05IG1

Μέγιστη ισχύς και των τριών μοντέλων ~300mW.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3-9, οι διαστάσεις των συγκεκριμένων μοντέλων επιτρέπουν την ενσωμάτωσή τους σε ενδοφθάλμιο σπειροειδές αρκετά μικρής διαμέτρου. Επίσης, επειδή στις περισσότερες ενδοχειρουργικές εφαρμογές των οφθαλμιατρικών laser η ισχύς της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας σπάνια υπερβαίνει 200mW-300mW, από την άποψη αυτής της παραμέτρου τα διοδικά laser Elite ικανοποιούν, έστω οριακά, τις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης, τουλάχιστο στην πειραματική φάση της εργασίας. Η τιμή των συγκεκριμένων μοντέλων δεν υπερβαίνει €500.

Συμπεράσματα του κεφαλαίου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα διερεύνησης της αγοράς και ανάλυσης λειτουργικών παραμέτρων των υπάρχοντων διοδικών laser, οι πιο κατάλληλες κατηγορίες διοδικών laser που ανταποκρίνονται στις αρχικές απαιτήσεις της μελέτης είναι μερικά μοντέλα παλμικών διοδικών laser υπέρυθρου $\lambda \approx 850\text{nm}$, πράσινα DPSSFD Laser (Diode Pumped Solid State Frequency Doubled) $\lambda \approx 532\text{nm}$ και κόκκινα διοδικά laser συνεχούς δράσης $\lambda \approx 660\text{nm}$. Η επιλογή οποιασδήποτε από αυτές τις τρεις κατηγορίες έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

A. Τα παλμικά laser κοντινού υπερύθρου έχουν απορριφθεί για δυο κύριους λόγους:

- Η επιλογή τους απαιτεί ανάπτυξη σχετικά περίπλοκου ηλεκτρονικού κυκλώματος ρύθμισης των παραμέτρων της ακτινοβολίας.
- Οι ρυθμιζόμενοι παράμετροι της ακτινοβολίας πρέπει να έχουν βιολογική επίδραση στους ιστούς συγκρίσιμη με την επίδραση της συνεχούς ακτινοβολίας η οποία χρησιμοποιείται σήμερα σε αυτές τις εφαρμογές. Δηλαδή, χρειάζονται κλινικές μελέτες με σκοπό τον προσδιορισμό των λειτουργικών παραμέτρων αυτών των laser. Τέτοια μελέτη θα ήταν έγκαιρη μόνο στη περίπτωση τεκμηριωμένης ανάγκης για laser αυτής της κατηγορίας. Στην παρούσα φάση η ανάγκη για χρήση οποιασδήποτε συγκεκριμένης κατηγορίας laser δεν έχει διευκρινιστεί. Για αυτό το λόγο η παρούσα μελέτη οδηγείται στη χρήση πιο γνωστών laser συνεχούς δράσης.

B. Αντιθέτως στα παλμικά laser $\lambda=850\text{nm}$, τα πράσινα laser παράγουν ακτινοβολία $\lambda=532\text{nm}$ η χρήση της οποίας είναι πολύ γνωστή στην οφθαλμιατρική. Συνεπώς, στην περίπτωση επιλογής του πράσινου DPSSFD laser δεν χρειάζονται διεξοδικές πειραματικές μελέτες και κλινικές δοκιμές. Τα μειονεκτήματα χρήσης του πράσινου laser για ενδοχειρουργικές εφαρμογές είναι:

- η σκέδαση της πράσινης ακτινοβολίας από τα οπτικά μέσα του οφθαλμού, η οποία περιορίζει τις δυνατότητες παρατήρησης, και
- το σχετικά μεγάλο κόστος της συσκευής, ιδιαίτερα σε σύγκριση με ένα απλό διοδικό laser.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα καθιστούν το πράσινο laser δεύτερη επιλογή ως πηγή ακτινοβολίας σε ενδοφθάλμιο στείλει laser, με πρώ-

τη επιλογή να είναι κόκκινο διοδικό laser συνεχούς δράσης. Αυτό όμως δεν αποκλείει την χρήση πράσινου laser σε επόμενες φάσεις της μελέτης, λόγω της υπάρχουσας μεγάλης εμπειρίας από τη χρήση της πράσινης ακτινοβολίας laser στις οφθαλμιατρικές επεμβάσεις.

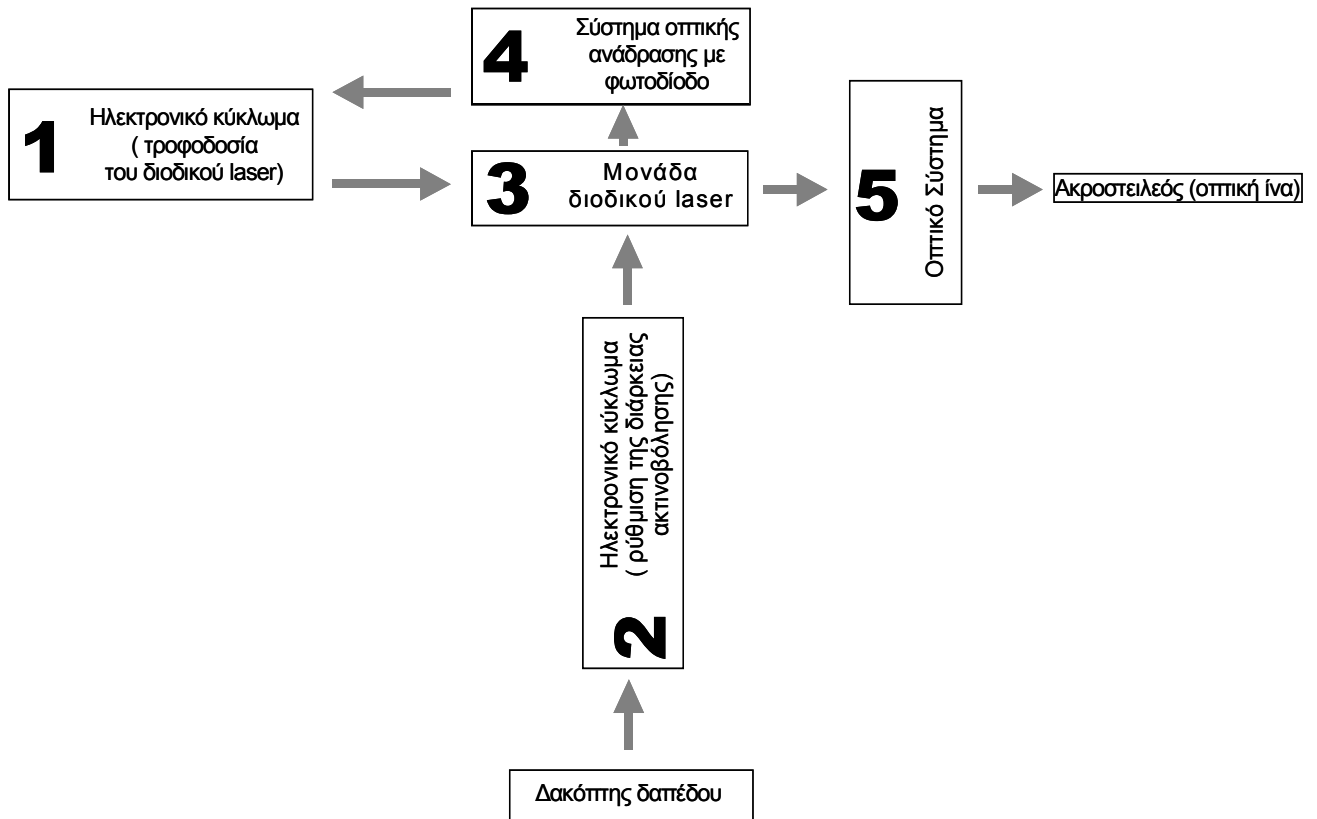
Γ. Με κριτήρια, την ευχρηστία και την οικονομία , το κόκκινο laser με $\lambda=660\text{nm}$ αποτελεί την βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Η λεπτομερής ανάλυση του συγκεκριμένου μοντέλου δίδεται στο κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 4

Μπλοκ-διάγραμμα και αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής

Στο τρίτο κεφάλαιο έχει ήδη αναφερθεί το ζήτημα του συνδυασμού της χαμηλής τιμής της πηγής laser με την ποιότητα και σταθερότητα των λειτουργικών χαρακτηριστικών της δέσμης. Στην πρώτη προϋπόθεση (χαμηλή τιμή) βασίζεται όλη η φιλοσοφία της πειραματικής συσκευής, επειδή μόνο η σχετικά χαμηλή τιμή επιτρέπει τη δημιουργία συσκευής «μιας χρήσης». Η δεύτερη προϋπόθεση είναι κοινή για όλα τα laser που χρησιμοποιούνται στην οφθαλμιατρική: η ποιότητα και η σταθερότητα των βασικών χαρακτηριστικών της δέσμης πρέπει να ανταποκρίνονται στις υψηλές απαιτήσεις οφθαλμιατρικών χειρουργικών επεμβάσεων. Για αυτό το λόγο, στην αρχική φάση αξιολόγησης της επιλεγμένης διόδου laser κρίνεται απολύτως αναγκαία η βελτιστοποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του laser με σκοπό την ικανοποίηση των αυστηρών απαιτήσεων ενδοχειρουργικής χρήσης laser.

Στο σχήμα 4-1 φαίνεται ένας αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης στον οποίο περιλαμβάνονται τα βασικά μέρη της συσκευής.



Σχήμα 4-1. Μπλοκ-διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Σχετικά με το μπλοκ-διάγραμμα της πειραματικής διάταξης, είναι απαραίτητο να διευκρινιστούν τα εξής:

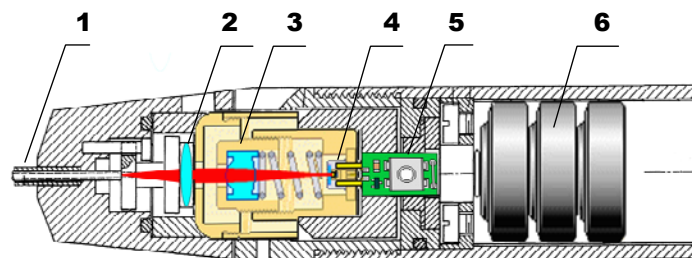
- Το ηλεκτρονικό κύκλωμα τροφοδοσίας ,το διοδικό laser και το σύστημα οπτικής ανάδρασης με φωτοδίοδο υπάρχουν στο σύστημα του laser module PGL-3.
- Να τονιστεί ότι σ' αυτή τη φάση είναι απαραίτητος ο πειραματικός έλεγχος των παραμέτρων αυτών των συστημάτων.

Αν κριθεί αναγκαίο θα τροποποιηθούν με σκοπό την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της δέσμης.

Όσον αφορά το ηλεκτρονικό κύκλωμα ρύθμισης της διάρκειας ακτινοβολητής και το οπτικό σύστημα με τον ακροστελειό αυτά ανα-

πτύσσονται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Η πορεία της ανάπτυξης αυτών των συστημάτων αναφέρεται παρακάτω.

Ο αρχικός σχεδιασμός της συσκευής είχε σκοπό τη διερεύνηση της πιο κατάλληλης τοποθέτησης των τμημάτων του μπλοκ-διαγράμματος στο τελικό χειρουργικό εργαλείο, καθώς και του συσχετισμού των διαφόρων τμημάτων της συσκευής. Το Σχήμα 4-2 παρουσιάζει αποτελέσματα προκαταρκτικού σχεδιασμού του ενδοφθάλμιου στείλεου με διοδικό laser.

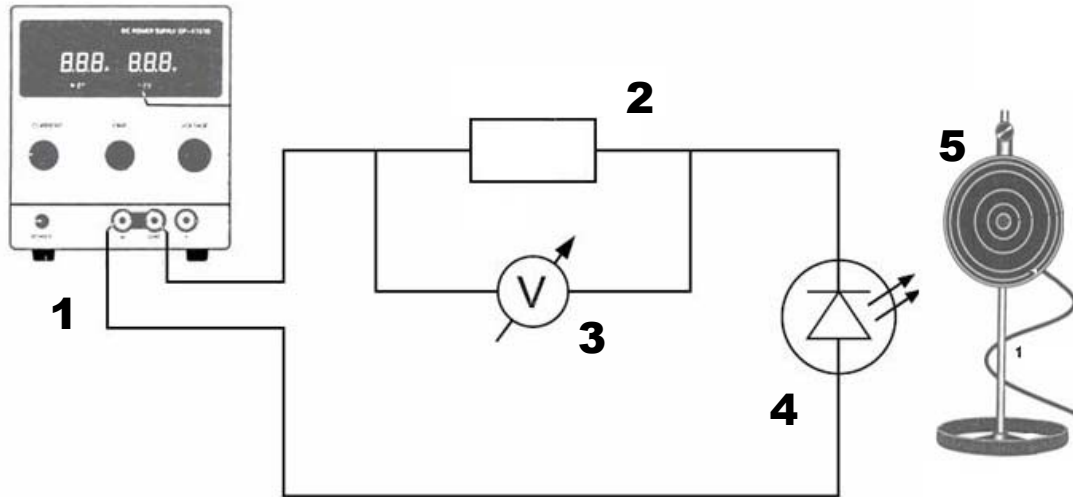


Σχήμα 4-2. Σχεδιασμός του ενδοφθάλμιου στείλεου με διοδικό laser

- 1 – οπτική ίνα
- 2 – φακός εστίασης της δέσμης στην οπτική ίνα
- 3 – οπτικό σύστημα του διοδικού laser
- 4 – διοδικό laser
- 5 – ηλεκτρονικό κύκλωμα του διοδικού laser
- 6 – τροφοδοσία

Μέτρηση του ρεύματος κατωφλίου και του ρεύματος Λειτουργίας

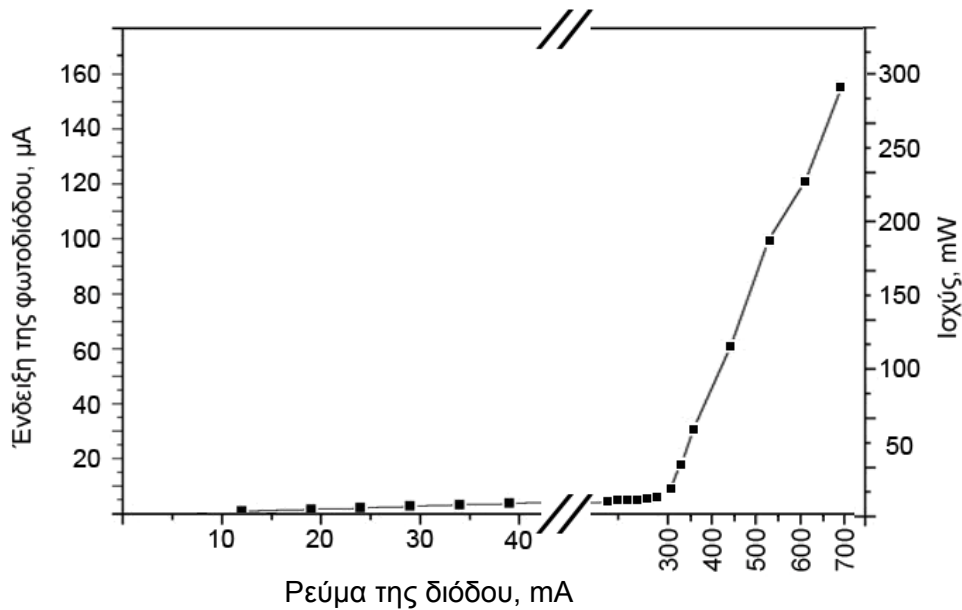
Η μέτρηση του ρεύματος κατωφλίου έγινε με τη βοήθεια του παρακάτω κυκλώματος:



Σχήμα 4-3. Μέτρηση του ρεύματος κατωφλίου του διοδικού laser.

- 1 – τροφοδοτικό GP-4303 (EZ Digital, Κορέα)
- 2 – αντίσταση 150Ω
- 3 – βολτόμετρο
- 4 – δίοδος laser
- 5 – μετρητής ισχύος LaserMate (Coherent Inc., ΗΠΑ)

Για την έμμεση μέτρηση ρεύματος χρησιμοποιήθηκε το βολτόμετρο του κυκλώματος με το οποίο μετρήθηκε η πτώση τάσης στην αντίσταση η οποία είναι γνωστή ($R=150\Omega$). Τα αποτελέσματα μέτρησης του ρεύματος κατωφλίου παρουσιάζονται στο Σχ. 4-4.



Σχήμα 4-4. Ισχύς του laser συναρτήσει του ρεύματος της διόδου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον μετρητή ισχύος LaserMate, και παράλληλα με την φωτιοδίοδο, για την αύξηση της ακρίβειας ανίχνευσης του κατωφλίου. Οριζόντιος άξονας: ρεύμα της διόδου, mA. Αριστερός κατακόρυφος άξονας: ένδειξη της φωτιοδίοδου σε μΑ. Δεξιός κατακόρυφος άξονας: ένδειξη του μετρητή ισχύος LaserMate σε mW.

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ρεύματος κατωφλίου και του ρεύματος λειτουργίας, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου laser είναι:

- Ρεύμα κατωφλίου: $I_{th} \approx 300 \text{ mA}$
- Ρεύμα λειτουργίας: $I_{op} \approx 700 \text{ mA}$
- Slope efficiency (κλίση της καμπύλης του Σχ. 4-4):
0,70mW/mA.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ως ρεύμα λειτουργίας ορίζεται η τιμή του ρεύματος που αντιστοιχεί στην βέλτιστη ισχύ του laser. Στο συγκεκριμένο πείραμα, η μέγιστη τιμή της ισχύος η οποία επετεύχθη χωρίς υπέρβαση των παραμέτρων ασφαλούς λειτουργίας του Laser, ήταν 270 mW.

Η παράμετρος slope efficiency = $\Delta P / \Delta I$ χαρακτηρίζει την απόδοση

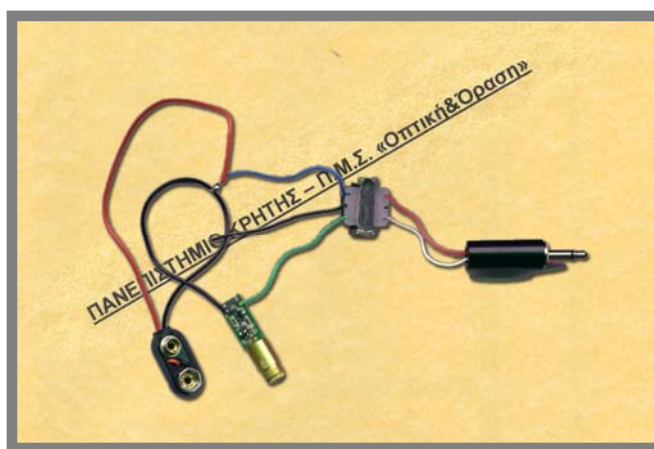
μετατροπής του ηλεκτρικού ρεύματος σε οπτική ισχύ, δηλαδή πόση αύξηση ισχύος ΔP προκαλεί η αύξηση του ρεύματος κατά ΔI . Στη συγκεκριμένη περίπτωση slope efficiency είναι περίπου $0,70 \text{ mW/mA}$. (Η κλίση της καμπύλης του Σχήματος 4-4).

Η τροφοδοσία της διόδου στο πείραμα ήταν $2,0 \text{ V}$. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διόδος είναι πολύ ευαίσθητη στη μεταβολή της τάσης: αύξηση της τάσης κατά μερικά δέκατα του V προκαλούσε αύξηση της ισχύος κατά σχεδόν 100 mW . Παράλληλα παρατηρήθηκε αύξηση του ρεύματος κατωφλίου κατά περίπου 100 mA . Αυτή η πειραματική παρατήρηση χρησιμοποιήθηκε στην επόμενη φάση για ρύθμιση της ισχύος εξόδου σε συνάρτηση με τη ρύθμιση της τάσης.

Για βελτιστοποίηση, και ιδιαίτερα για σταθεροποίηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της πηγής laser πραγματοποιήθηκε η τροποποίηση του ηλεκτρονικού κυκλώματος τροφοδοσίας και ελέγχου της συσκευής.

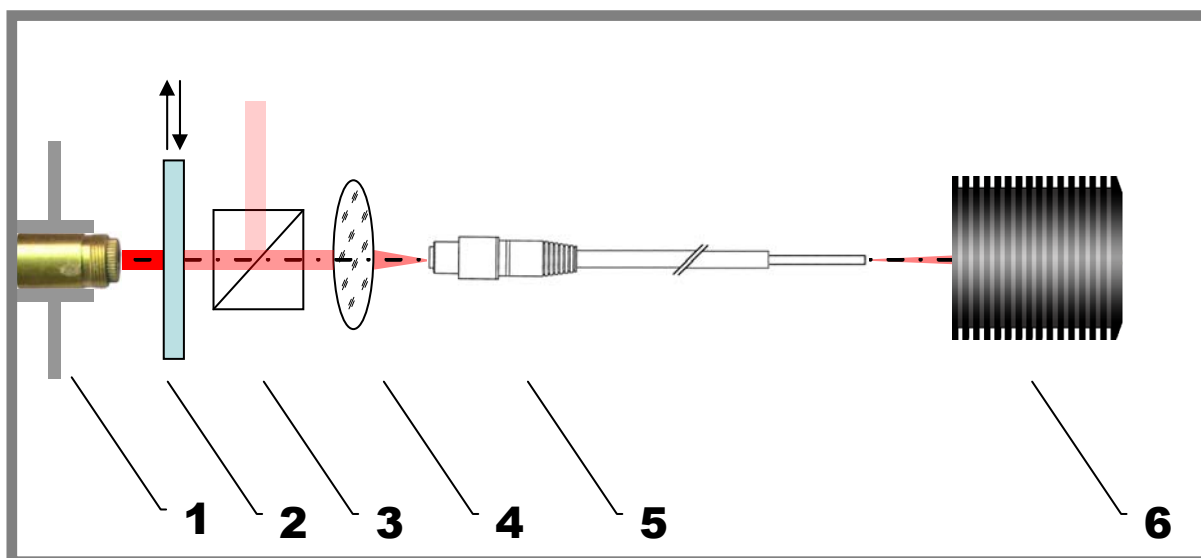
Μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης στον οπτικό πάγκο

Στο σχήμα 4-5 φαίνεται η τροφοδοσία του διοδικού laser που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη:



Σχήμα 4-5. Τροφοδοσία του διοδικού laser για μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης στον οπτικό πάγκο.

Στο σχήμα 4-6 που ακολουθεί, φαίνεται το σχέδιο της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στις αρχικές πειραματικές δοκιμές



Σχήμα 4-6. Σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης.

- 1 – μονάδα laser τοποθετημένη σε ευθυγραμμιζόμενο στήριγμα
- 2 – αφαιρούμενο μπλε φίλτρο με διαπερατότητα 1% για $\lambda=660\text{nm}$ (φωτοφράκτης)
- 3 – οπτικός διαχωριστής δέσμης laser (beamsplitter).
- 4 – φακός εστίασης της δέσμης στην είσοδο οπτικής ίνας
- 5 – οπτική ίνα
- 6 – κεφαλή του μετρητή ισχύος Coherent Lasermate.

Το αφαιρούμενο φίλτρο έχει διαπερατότητα 1% στη φασματική περιοχή εκπομπής ($\lambda=660\text{ nm}$) του χρησιμοποιούμενου laser. Το φίλτρο περιορίζει την ισχύ της δέσμης που φτάνει στο ακτινοβολούμενο αντικείμενο, στα 3mW.

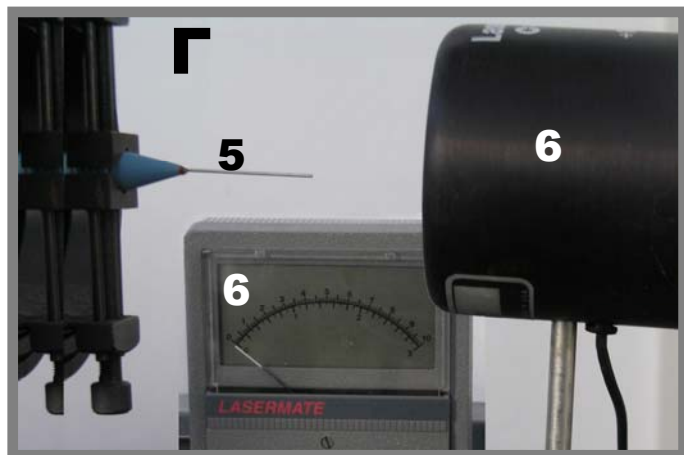
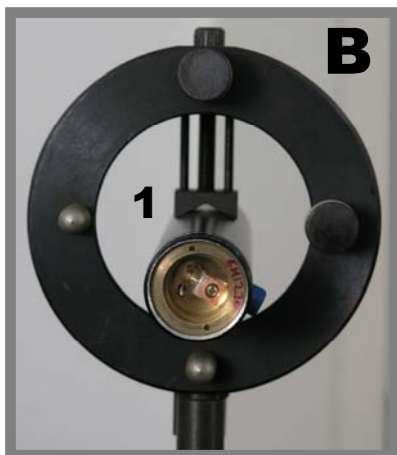
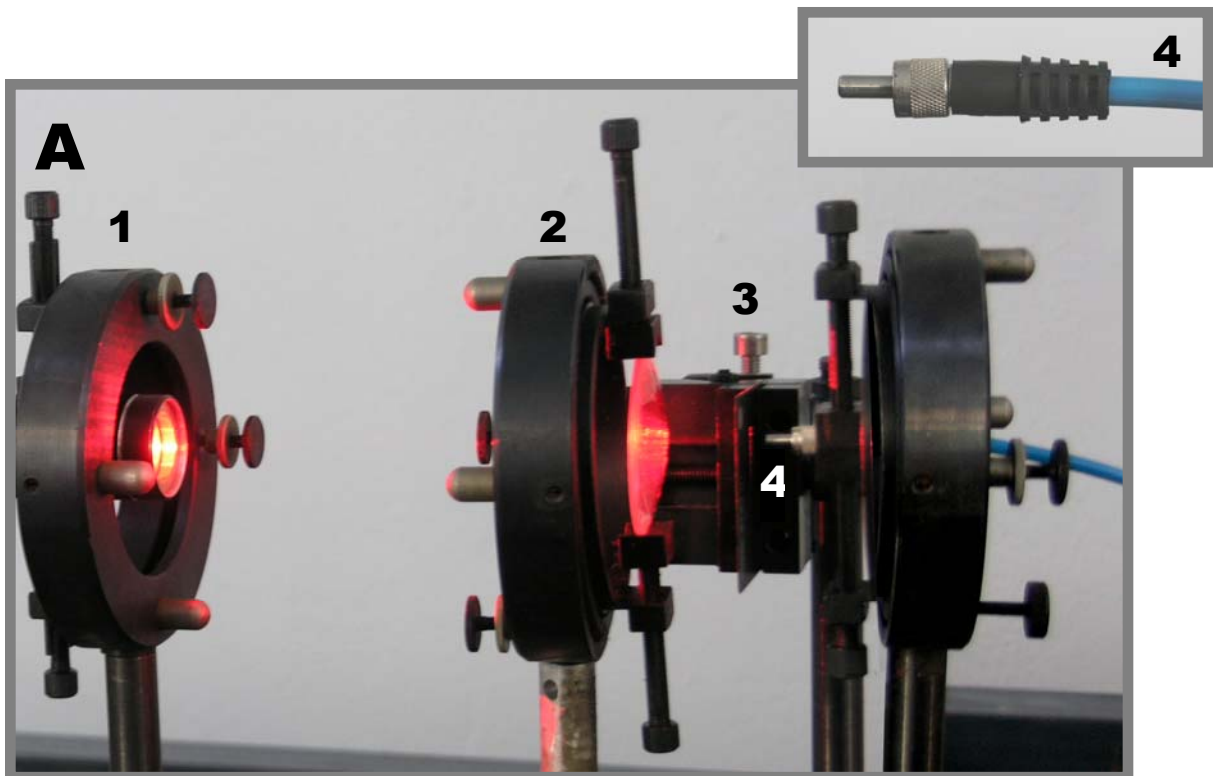
Πατώντας το διακόπτη δαπέδου (Σχ. 4-1), το φίλτρο έλκεται με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικού σωληνοειδούς έξω από τη ζώνη της δέσμης, και έτσι η πλήρης ισχύς της δέσμης laser φτάνει στο ακτινοβολούμενο αντικείμενο. Η διάρκεια ακτινοβολήσης ρυθμίζεται με απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα (Σχ. 4-1) και οι τιμές της έκθεσης καθορίστηκαν στα 0.05 s, 0.1 s, 0.15 s και 0.2 s.

Ο διαχωριστής της δέσμης (3) (Σχ. 4-6) χρησιμοποιείται στην περίπτωση μέτρησης της ισχύος πριν την εισαγωγή της δέσμης στην οπτική ίνα. Μετά την εκτροπή, περίπου 2% της δέσμης κατευθύνεται στον μετρητή ισχύος.

Ο φακός (4) εστιάζει τη δέσμη πάνω στην είσοδο της οπτικής ίνας (5). Η οπτική ίνα είναι πλαστική κοινής χρήσης με διάμετρο $\varnothing 200\mu\text{m}$. Έχει αφαιρεθεί το πλαστικό περίβλημα από το περιφερικό της άκρο και το μήκος της γυμνής ίνας είναι περίπου 4cm.

Το γεγονός ότι η οπτική ίνα συμπεριλαμβάνεται στη πειραματική διάταξη οφείλεται στο ότι η συσκευή προορίζεται για ενδοφθάλμια χρήση. Η είσοδος της δέσμης στον οφθαλμό και η μεταφορά της στον ακτινοβολούμενο ιστό πραγματοποιείται από το εμπρός άκρο της συσκευής. Για αυτό το σκοπό στο μπροστινό άκρο του υπό ανάπτυξη σπειροειδούς θα τοποθετηθεί ένα μικρό (περίπου 3-4 cm) τμήμα οπτικής ίνας (Σχ. 4-1, Σχ. 4-2).

Ο μετρητής ισχύος (5) (LaserMate, Coherent Inc., ΗΠΑ) μετρά την ισχύ της δέσμης στη θέση ακτινοβολούμενου αντικειμένου. Συνήθως πριν τον αισθητήρα του μετρητή ισχύος τοποθετείται φίλτρο ή/και διάφραγμα για μείωση ισχύος και βελτίωση ποιότητας της προσπίπτουσας δέσμης. Στην συγκεκριμένη διάταξη η ισχύς της προσπίπτουσας δέσμης Laser είναι μικρή και δεν μπορεί να προκαλέσει οποιαδήποτε ζημιά στον αισθητήρα του μετρητή ισχύος, και έτσι η χρήση φίλτρου δεν κρίθηκε απαραίτητη.



Σχήμα 4-7. Μέτρηση των οπτικών χαρακτηριστικών της πειραματικής διάταξης:

A – γενική όψη της διάταξης,

B – μονάδα laser τοποθετημένη σε ευθυγραμμισμένο στήριγμα,

Γ – το εγγύς άκρο της οπτικής ίνας

1 – μονάδα laser,

2 – φακός,

3 – διάφραγμα (φωτοφράκτης),

4 – οπτική ίνα

5 – περιφερικό άκρο της ίνας

6 – μετρητής ισχύος LaserMate

Το Σχ. 4-7 απεικονίζει την πειραματική διάταξη που ανταποκρίνεται στο Σχ. 4-6. Το μπλε φίλτρο και ο διαχωριστής της δέσμης (2 και 3 στο Σχ. 4-6) έχουν αφαιρεθεί για να φαίνεται η πορεία της δέσμης. Το ρόλο του φωτοφράκτη παίζει το διάφραγμα 4.

Δοκιμαστικές μετρήσεις και δείγματα ακτινοβόλησης

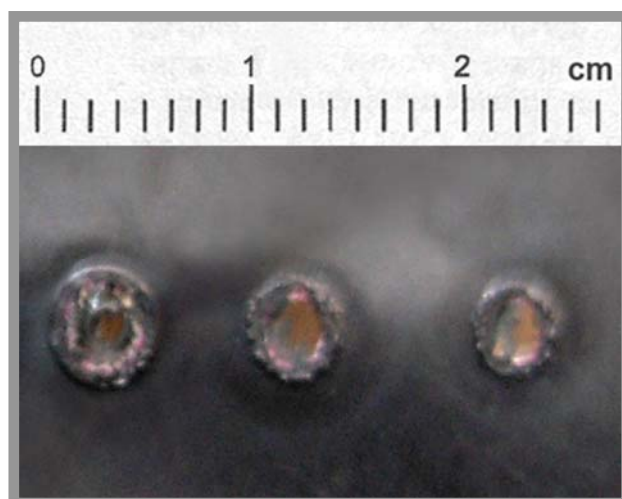
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η μέγιστη ισχύς της δέσμης laser στην είσοδο της οπτικής ίνας είναι 270 mW. Πρέπει να σημειωθεί ότι η υπέρβαση του ορίου ασφαλείας του ρεύματος λειτουργίας (βλ. Σχ. 4-4) θα μπορούσε να αυξήσει την ισχύ της δέσμης μέχρι τουλάχιστο 300 mW, αλλά θα είχε ως αποτέλεσμα πρόωρη, πιθανόν και απότομη, καταστροφή της διόδου laser.

Οι απώλειες ακτινοβολίας στην οπτική ίνα είναι περίπου 10%, σύμφωνα με τις μετρήσεις ισχύος της ακτινοβολίας στην έξοδο της . Οι προσπάθειες μείωσης της απώλειας ακτινοβολίας στην οπτική ίνα δεν απέβησαν αποτελεσματικές, κυρίως λόγω της δομής και της απόκλισης της δέσμης. Έτσι, η ισχύς στην έξοδο της πειραματικής συσκευής περιορίζεται περίπου στα 245 mW, ισχύς που σύμφωνα με την υπάρχουσα εμπειρία από την ενδοχειρουργική χρήση laser, πρέπει να θεωρείται ως οριακά αποδεκτή.

Οι τεχνικές δοκιμές της πειραματικής διάταξης στον οπτικό πάγκο ολοκληρώθηκαν με δοκιμαστική ακτινοβόληση αποτυπωτικού χαρτιού (καρμπόν) με διαφορετική πυκνότητα ισχύος της εστιαζόμενης δέσμης.

Σκοπός της ακτινοβόλησης ήταν ο έλεγχος των χωρικών χαρακτηριστικών της δέσμης όπως η χωρική ομοιογένεια, η έλλειψη "θερμών σημείων" (hot spots), η κυκλικότητα της κηλίδας εστιασμένης δέ-

σμης κ.α. Χαρακτηριστικά δείγματα ακτινοβόλησης παρουσιάζονται στο Σχ. 4-8, για τρία διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας ισχύος η οποία καθορίστηκε με ρύθμιση της διαμέτρου της κηλίδας της εστιασμένης δέσμης.



Σχήμα 4-8. Δείγματα δοκιμαστικής ακτινοβόλησης αποτυπωτικού χαρτιού (καρμπόν). Η πυκνότητα ισχύος αυξάνεται προς δεξιά

Πειραματικές δοκιμές: Πειραματική ακτινοβόληση του βυθού εξορυχθέντων οφθαλμών χοίρου

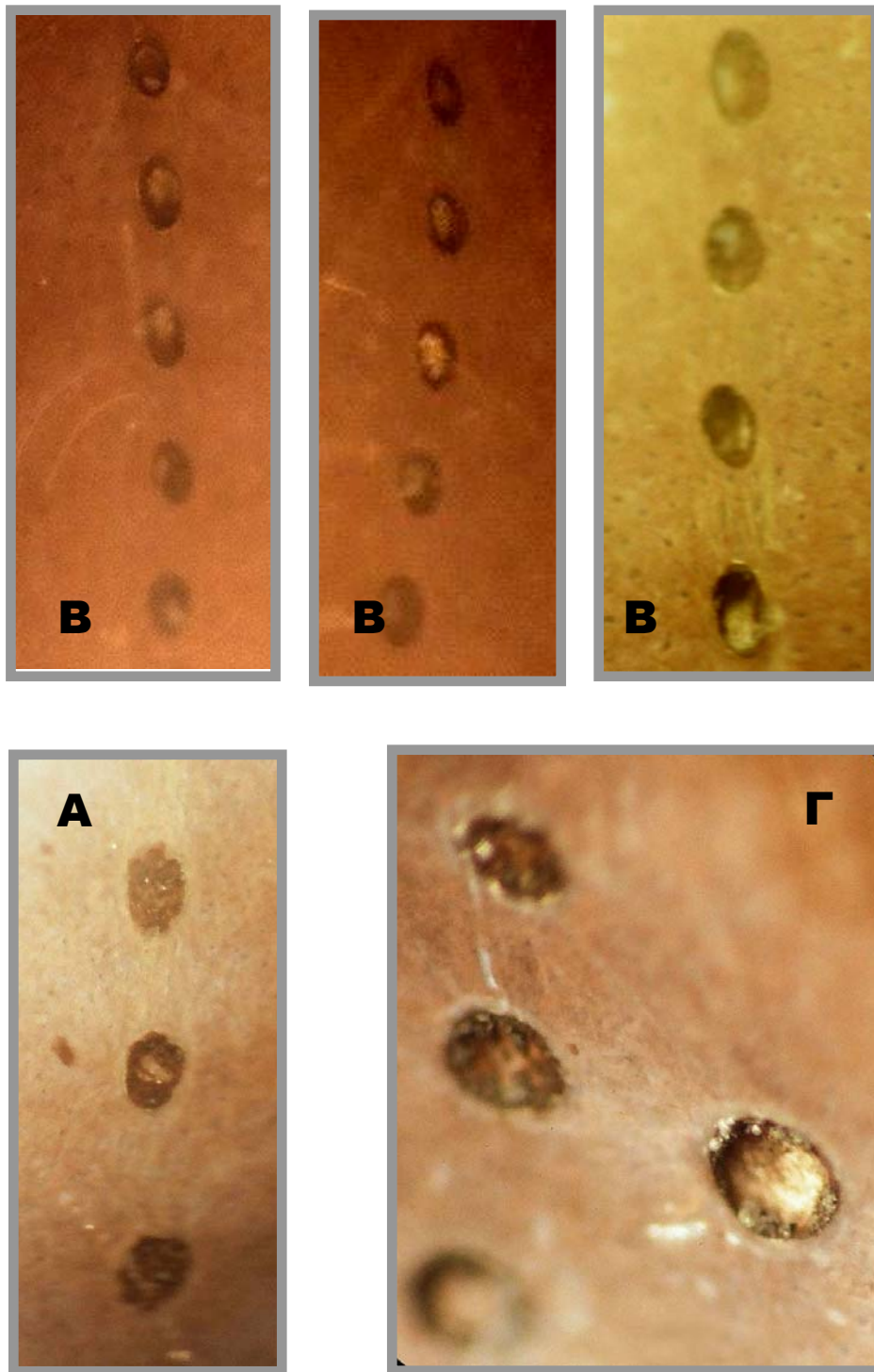
Στις δοκιμές του πειραματικού προτύπου της συσκευής χρησιμοποιήθηκαν σκευάσματα οφθαλμών χοίρου. Η προετοιμασία του σκευάσματος ακολουθούσε τυποποιημένη τεχνική που περιγράφεται στην πλειονότητα των σχετικών δημοσιεύσεων. Σύμφωνα με τη συνηθισμένη τεχνική (open-sky technique), μετά την αφαίρεση των οφθαλμικών μυών και του επιπεφυκότα, πραγματοποιείται τομή με νυστέρι σε όλο το μήκος ισημερινού και αφαιρείται όλο το πρόσθιο



Σχήμα 4-8. Προετοιμασία του πειραματικού οφθαλμού

ημιμόριο του οφθαλμού. Το οπίσθιο ημιμόριο τοποθετείται και σταθεροποιείται με τη βοήθεια κενού σε μια ειδική πειραματική βάση (Σχήμα 4-9). Η ακτινοβολία του αμφιβληστροειδούς των πειραματικών οφθαλμών πραγματοποιήθηκε με την πειραματική διάταξη των Σχ. 4-6 και Σχ. 4-7.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών, παρασκευάσματα με δείγματα φωτοπηξίας με διοδικό laser υποβλήθηκαν στην ακτινοβολία με laser Nd:YAG $\lambda=532\text{nm}$ (Aescular Meditec, Γερμανία). Οι παράμετροι της ακτινοβολίας αντιστοιχούσαν στην 0%, 30%, 50% και 100% υπέρβαση του πειραματικά προσδιορισμένου κατωφλίου φωτοπηξίας. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων φωτοπηξίας με διοδικό laser και με Nd:YAG $\lambda=532\text{nm}$ παρουσιάζεται στα Σχήματα 4-10 και 4-11. Από τη σύγκριση των δυο ομάδων μικροφωτογραφιών συνάγεται το συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία του αμφιβληστροειδούς με τις επιλεγμένες παραμέτρους προκαλεί αλλοιώσεις των ιστών του βυθού συγκρίσιμες με τις αλλοιώσεις από ένα κλινικό laser Nd:YAG $\lambda=532\text{nm}$. Η περαιτέρω συγκριμενοποίηση παραμέτρων ακτινοβολίας της πειραματικής διάταξης προβλέπεται μετά την αξιολόγηση της συσκευής στις συνθήκες οφθαλμοχειρουργικής επέμβασης.



Σχήμα 4-10. Φωτοπηξία του βυθού οφθαλμού χοίρου με laser Nd:YAG $\lambda=532\text{nm}$.

- A - υπέρβαση του κατωφλίου φωτοπηξίας 30%
- B - υπέρβαση του κατωφλίου φωτοπηξίας 50%
- Γ - υπέρβαση του κατωφλίου φωτοπηξίας 100%



Σχήμα 4-11. Δείγματα φωτοπηξίας του βυθού οφθαλμού χοίρου με διοδικό laser

Συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών

Ένας από τους βασικούς στόχους της ανάλυσης αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών είναι ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης των επόμενων σταδίων έρευνας. Από αυτή την άποψη, τα πιο σημαντικά συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών συνοψίζονται ως εξής:

A) Επιλογή του μήκους κύματος. Η χρήση της κόκκινης ακτινοβολίας για τη φωτοπηξία του βυθού είναι αρκετά γνωστή και μελετημένη. Η οπτική μικροσκοπία των ακτινοβολημένων ιστών (Σχ. 4-10 και 4-11) αποδεικνύει ότι οι αλλοιώσεις που προκαλούν οι δυο συσκευές είναι συγκρίσιμες σε μέγεθος και έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Χρειάζεται περισσότερο λεπτομερές συγκριτική μελέτη για πιο τεκμηριωμένη επιλογή του μήκους κύματος. Η μελέτη αυτή πρέπει να περιλαμβάνει και πράσινο μήκος κύματος $\lambda=532\text{nm}$.

B) Επιλογή του καθεστώτος λειτουργίας. Το καθεστώς συνεχούς δράσης είναι το πιο συνηθισμένο καθεστώς ακτινοβολίας των ιστών του βυθού. Ωστόσο, η επιλογή του παλμικού καθεστώτος μπορεί να προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα όσον αφορά τον σχεδιασμό της συσκευής, και ιδιαίτερα του ηλεκτρονικού της τμήματος. Η μελέτη των δυνατοτήτων των laser με παλμικό καθεστώς λειτουργίας αποτελεί μια από τις επόμενες φάσεις της μελέτης.

Γ) Σταθεροποίηση παραμέτρων. Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου, η φιλοσοφία του υπό ανάπτυξη εργαλείου βασίζεται στο συνδυασμό χαμηλής τιμής της συσκευής και υψηλής ποιότητας της ακτινοβολίας. Το τελευταίο περιλαμβάνει την ασφάλεια λειτουργίας και σταθερότητα των λειτουργικών παραμέτρων. Τα διοδικά laser χαμηλού κόστους δεν διαθέτουν συστήματα ακριβούς σταθεροποίησης των παραμέτρων. Οι πειραματικές δοκιμές απέδειξαν ότι υπάρ-

χει δυνατότητα ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος αρκετά υψηλών προδιαγραφών. Ωστόσο, το κόστος μιας τέτοιας προσπάθειας δεν έχει προσδιοριστεί. Έτσι λοιπόν, πρέπει να διερευνηθεί ποια λύση είναι προτιμότερη:

- η ανάπτυξη του συστήματος σταθεροποίησης των παραμέτρων ακτινοβολίας
- ή η αγορά διοδικού laser υψηλότερης τιμής το οποίο περιλαμβάνει αυτό το σύστημα.

Δ) Επιλογή του συστήματος ελέγχου διάρκειας έκθεσης.

Ο αρχικός σχεδιασμός του πειραματικού προτύπου προέβλεπε χρήση ενός ηλεκτρομαγνητικού σωληνοειδούς με κινούμενο φωτοφράκτη για έλεγχο της ακτινοβολήσης. Οι δοκιμές αυτής της λύσης στον οπτικό πάγκο (Σχ. 4-6) αποκάλυψαν αρκετά προβλήματα όπως η μείωση της ακρίβειας ακτινοβολήσης λόγω δόνησης, έλλειψη χώρου στο σπειρό για τοποθέτηση του σωληνοειδούς, και την ανάγκη σχεδιασμού ειδικού συστήματος στόχευσης με πιλοτική δέσμη. Η χρήση ενός ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου της διάρκειας της έκθεσης μέσω του κυκλώματος τροφοδοσίας της διόδου καταργεί τα ανωτέρω προβλήματα και σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών αυξάνει την ακρίβεια και την ασφάλεια χρήσης της συσκευής.

Βιβλιογραφία

1. Ιατρικά lasers: Επιστήμη και κλινική εφαρμογή”, G. Carruth and A. McKenzie, μετάφραση, σύγχρονη ενημέρωση και επιμέλεια Α.Α. Σεραφετινίδης και Μ.Ι. Μακροπούλου, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1994.
2. “Biophysics of the photoablation process”, G. Muller, K. Dorschel, H. Kar, *Lasers in Medical Science*, V.6, p. 241, 1991.
3. “Role of tissue optics and pulse duration on tissue effects during high-power laser irradiation”, S.L. Jaques, *Applied Optics*, V.32, p. 2447, 1993.
4. Α.Α. Σεραφετινίδης, Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική, Εκδόσεις Συμμετρία, 1989.
5. Ο.Svelto, Αρχές των lasers, 2η έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1986.
6. G.P.Agrawal, Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές Ίνες, 2η έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2000.
7. Α.Αλεξανδρής, ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ, Εκδόσεις, ΤΖΙΟΛΑ, 2004.
8. Ν. Θεοφάνους, *Οπτρονική: Ηλεκτρο-οπτικές διατάξεις και lasers*, Εκδ. Γ. Β. Βασδέκης, Αθήνα, 1989.
9. Α. Ανδριτσάκης, *Laser και Οπτοηλεκτρονικές Διατάξεις*, Εκδόσεις Λύχνος, 1988.
10. Π. Περσεφόνης, *Laser: Φυσική και τεχνολογία*, Εκδ. Παπασωτηρίου, 2001.
11. G. P. Agrawal, *Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές Ίνες*, 2η έκδοση, Εκδ. Τζιόλα, 2000.
12. Χ. Ι. Γεωργόπουλος, *Οπτικές ίνες : Θεωρία κι εφαρμογές*, Πάτρα, 1993.
13. Ν. Ουζούνουγλου, *Τηλεπικοινωνίες Οπτικών Ινών*, Εκδόσεις Συμμετών, Αθήνα 1990.
14. Α. Αλεξανδρής, *Οπτικές Ίνες*, Εκδ. Ίων, 2001.

Πηγές Διαδικτύου

1. Laser Diode Modules. Rolyn Optics Co.,
<http://rolynoptics.thomasnet.com/item/lasers-and-related-modules-laser-diode-modules>.
2. Laser Diodes: Multiple Single Emitters. RPMC Lasers,
<http://www.rpmclasers.com/Catalog/622-627-632.pdf>.
3. ProLite Series Diode Lasers. Newport Corp.,
<http://www.newport.com/ProLite-Diode-Lasers/499179/1033/catalog.aspx>.
4. High-Power Laser Diodes. OSRAM Opto Semiconductors Co.,
http://www.osram-os.com/osram_os/EN/Products/High-Power_Laser_Diodes/index.html .
5. Laser Diode Module Selection Catalogue. Power Technology Inc.,
<http://www.powertechnology.com/PDFs/07-08catalog.pdf>.
6. Laser Diodes 2007. ROHM Electronics Co. Ltd.
<http://www.rohmelectronics.com/rohmnnet/CMSFiles/File/Sections/downloads/products/opto/opto-50p5817e.pdf>.
7. Standard Diode Laser Modules. DLC - Diode Laser Concepts, Inc.
<http://www.diodelaserconcepts.com/Datasheet-HTML/standard.html>.
8. Pulsed Laser Diodes. Hamamatsu Corp.,
<http://sales.hamamatsu.com/en/products/laser-group/pulsed-laser-diode.php>.
9. CW Laser Diodes. Hamamatsu Corp.,
<http://sales.hamamatsu.com/en/products/laser-group/cw-laser-diode-array.php>.
10. High-Power Diode Lasers. New Venture Gear (NVG),
<http://www.nvg.com/index.html>.

11. Custom Wavelength DFB Diode Lasers. Sarnoff Corp.,
<http://www.sarnoff.com/products/lasers>.
12. Sharp Laser Diodes. Sharp Microelectronics,
<http://www.sharpsma.com/Page.aspx/americas/en/e9bbd53c-e490-44ff-9904-e8af85f83020>.
13. Light Emitting Diodes. Lumex Inc.,
<http://www.lumex.com/products.aspx?id=19>.
14. Laser Diode Modules. Quarton Inc,
http://www.quarton.com/laser_module.html.
15. VCSEL Laser Modules. Thorlabs GmbH,
http://www.thorlabs.com/NewGroupPage11.cfm?ObjectGroup_ID=7&visNavID=457.
16. Lasiris DLS and DLSC Lasers. Vision Light Tech Co.,
http://www.visionlighttech.com/document.asp?path=/upload/shop/documents/dls_dlsc.pdf.
17. Super High Power Laser Diodes. Sony Corp.,
http://www.sony.net/Products/SC-HP/pro/laser_diode/shp.html.
18. High Power Diode Lasers. AlphaLight Co.,
<http://www.alfalight.com>.
19. Single Emitter CW High Power Laser Diodes. Applied Optronics Co., <http://www.applied-optronics.com>.
20. 650 nm Laser Diode Module. Appointech, Inc.,
http://www.appointech.com/pdf/fiber_optic_module/fp_ld/650nm%20LD%20SM%20Module.pdf.
21. Lasers for Optical Communications. Archcom Technology,
<http://www.archcomtech.com/products.asp>.
22. 785 nm Single Mode Lasers. Axcel Photonics, Inc.,
<http://www.axcelphotonics.com/785SM.html>.