



**Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΟΡΗΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ**  
**ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΙΟΔΙΚΟΥ LASER ΓΙΑ ΕΝΔΟΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ**  
**ΦΩΤΟΠΗΞΙΑ**

**Εισηγητής: ΤΖΑΓΚΑΡΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**  
**Σπουδαστής: ΑΚΡΑΣΑΚΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ, Ιανουάριος 2009**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ πρωταρχικό καθήκον να εκφράσω ένα θερμό ευχαριστώ προς τα πρόσωπα που με καθοδήγησαν προκειμένου να διεκπεραιώσω την εργασία αυτή και με ενίσχυσαν σε όλα τα στάδια εκπόνησής της, ώστε να αποτελέσει, αναμφίβολα, εφελτήριο αποκόμισης μεγάλου όγκου ειδικών γνώσεων και εμπειριών.

Κύριος υποστηρικτής της προσπάθειάς μου υπήρξε ο εισηγητής και καθηγητής Γ. Τζαγκαράκης, του οποίου η άρτια επιστημονική κατάρτιση αποδείχθηκε πολύτιμη βοήθεια σε κάθε βήμα και γι' αυτό τον ευχαριστώ ειλικρινά..

Επίσης, οφείλω να αναγνωρίσω τη σημαντικότερη ενίσχυση που μου παρείχε ο καθηγητής του ΤΕΙ Κρήτης, κος Λ. Ναουμίδης, ο οποίος παρακολούθησε με σχολαστικότητα την πορεία της εργασίας από την αρχή ως το τέλος, βοηθώντας με να ξεπεράσω όποιες θεωρητικές και πρακτικές δυσκολίες ανέκυψαν.

Τέλος, να ευχαριστήσω από καρδιάς και τους συνεργάτες μου στο εργαστήριο Φυσικής, οι οποίοι έθεσαν γενναιόδωρα στη διάθεσή μου τόσο τον εξοπλισμό, όσο και τις γνώσεις τους και, με την αμέριστη συμπαράστασή τους, αναβάθμισαν την ποιότητα του αποτελέσματος.

*Αφιερώνεται*

*Στην οικογένεια μου*

**Σκοπός** της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας πειραματικής διάταξης με διοδικό laser, κατάλληλης για χρήση σε χειρουργικές οφθαλμολογικές επεμβάσεις. Προβλέπεται η ανάπτυξη ενός χειρουργικού εργαλείου, με δυνατότητα εισαγωγής του μέσα στο οπίσθιο τμήμα του οφθαλμού για ακτινοβολήση του αμφιβληστροειδούς (φωτοπηξία). Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας θα υλοποιηθεί η φάση του προγράμματος στην οποία αναπτύσσεται και αξιολογείται το πειραματικό πρότυπο της συσκευής. Αρχικά, για την σχεδίαση της διάταξης με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των απαιτούμενων λειτουργικών χαρακτηριστικών χειρουργικών συσκευών με διοδικό laser, βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και πηγών διαδικτύου.

Θα ακολουθήσει μελέτη των δυνατοτήτων και λειτουργικών παραμέτρων των υπάρχοντων διοδικών laser, με σκοπό την επιλογή των χαρακτηριστικών ακτινοβολίας και του συγκεκριμένου μοντέλου διοδικού laser κατάλληλου για την ανάπτυξη του πειραματικού προτύπου.

Βασικά κριτήρια επιλογής θα αποτελέσουν το μήκος κύματος, η ισχύς, το είδος ακτινοβολήσης, η απόκλιση της δέσμης, οι διαστάσεις και το κόστος. Επίσης σημαντικό στόχο της εργασίας, θα αποτελέσει και η επιλογή κατάλληλου συστήματος ελέγχου και χειρισμού της διάταξης ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο εύχρηστο.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθούν ο σχεδιασμός και οι δοκιμές του πειραματικού προτύπου. Σε εργαστηριακό χώρο με κατάλληλο εξοπλισμών οπτικών μετρήσεων, θα πραγματοποιηθεί το τελευταίο στάδιο της εργασίας, δηλαδή οι πειραματικές δοκιμές της διάταξης και πιο συγκεκριμένα η καταγραφή της καμπύλης ισχύος της, η εύρεση του κατωφλίου έντασης και τάσης της, καθώς και της απόκλισης της δέσμης.

Η πτυχιακή εργασία θα γίνει στα πλαίσια της συνεργασίας ΤΕΙ Κρήτης με το Ιατρικό Τμήμα του Πανεπιστημίου Κρήτης.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΦΘΑΛΜΟΥ.....	- 7 -
1.1	Ο βολβός του οφθαλμού.....	- 7 -
1.2	Φωτοπηξία αμφιβληστροειδούς.....	- 10 -
1.2.1	Εφαρμογές.....	- 10 -
2.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ LASER.....	- 15 -
2.1	Αρχή λειτουργίας laser.....	- 15 -
2.2	Διάταξη laser.....	- 16 -
2.3	Ιδιότητες laser.....	- 17 -
2.3.1	Μονοχρωματικότητα.....	- 17 -
2.3.2	Συμφωνία.....	- 18 -
2.3.3	Κατευθυντικότητα.....	- 20 -
2.3.4	Πυκνότητα ενέργειας.....	- 22 -
2.3.5	Μήκος κύματος.....	- 23 -
2.3.6	Πόλωση.....	- 23 -
3.	ΔΙΟΔΙΚΑ LASERS.....	- 25 -
3.1	Παραγωγή συνεχούς ακτινοβολίας.....	- 25 -
3.2	Τύποι διοδικών lasers.....	- 27 -
•	DBR laser.....	- 27 -
•	DFB laser.....	- 30 -
•	Diode arrays (bars).....	- 31 -
•	DPSS laser.....	- 34 -
•	Fabry-Perot laser diode.....	- 38 -
•	Fiber coupled laser.....	- 39 -
•	Διοδικά laser ομοεπαφής (homojunction).....	- 42 -
•	Διοδικά laser ετεροεπαφής (heterojunction).....	- 43 -
•	Single emitter laser diode.....	- 45 -
•	Διοδικά lasers VCSEL.....	- 48 -
3.3	Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας.....	- 52 -
•	Q – switched laser.....	- 52 -
•	Mode locking.....	- 55 -
3.4	Λειτουργικά χαρακτηριστικά διοδικών lasers.....	- 59 -
3.4.1	Χαρακτηριστικές καμπύλες.....	- 59 -
3.4.2	Οπτικό φάσμα.....	- 60 -
3.4.3	Χαρακτηριστικά δέσμης.....	- 61 -
3.4.4	Συμπεριφορά θερμοκρασίας.....	- 63 -

3.4.5	Συμπεριφορά διαμόρφωσης.....	- 66 -
3.4.6	Θόρυβος και ανάδρομες ανακλάσεις.....	- 67 -
3.4.7	Προφυλάξεις κατά τον χειρισμό των διοδικών lasers.....	- 68 -
3.4.8	Ελεγκτές διοδικών lasers .....	- 69 -
4.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	- 70 -
4.1	Σκοπός.....	- 70 -
4.2	Επιθυμητά χαρακτηριστικά της διάταξης φωτοπηξίας.....	- 71 -
4.2.1	Κριτήρια επιλογής laser .....	- 71 -
4.3	Τεχνολογική τεκμηρίωση των σχεδιαστικών παραμέτρων της διάταξης -	75 -
4.3.1	Μπλοκ-διάγραμμα και αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής .....	- 75 -
4.3.2	Σχεδιαστικές προτάσεις .....	- 76 -
4.3.3	Συμπεράσματα του κεφ. 4.3 .....	- 80 -
4.4	Τεχνολογική τεκμηρίωση της επιλογής της πηγής laser.....	- 81 -
4.4.1	Hamamatsu L8446 Laser Diode.....	- 82 -
4.4.2	LDX Optronics Model LDX-2615-660.....	- 83 -
4.4.3	OSRAM diode lasers.....	- 83 -
4.4.4	Laser Module (Diode Pumped Solid State Frequency Doubled).....	- 85 -
4.4.5	Διοδικά laser module (Elite Optoelectronics).....	- 87 -
4.4.6	Laser Module (Changchun New Industries Optoelectronics).....	- 87 -
4.4.7	Συμπεράσματα του κεφ. 4.4 .....	- 88 -
4.5	Τεχνολογική τεκμηρίωση της επιλογής του διακόπτη τροφοδοσίας .....	- 90 -
4.5.1	Garrison LK-102R2 Remote Control Switch.....	- 91 -
4.5.2	RFMD RF 2436.....	- 91 -
4.5.3	Kyosera Bluetooth™ RF Modules RB04 Series.....	- 92 -
4.5.4	Peregrine Semiconductor PE 4259.....	- 92 -
4.5.5	Motorola MC13146.....	- 93 -
4.6	Λειτουργικά χαρακτηριστικά πηγής laser.....	- 94 -
4.6.1	Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας.....	- 94 -
4.6.2	Υπολογισμός απόκλισης δέσμης.....	- 100 -
4.7	Δοκιμαστικές μετρήσεις και δείγματα ακτινοβολήσης.....	- 106 -
4.7.1	Συμπεράσματα κεφ. 4.7.....	- 107 -
4.8	Συμπεράσματα.....	- 108 -
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	- 110 -
	Βιβλία.....	- 110 -
	Διευθύνσεις Internet.....	- 110 -

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

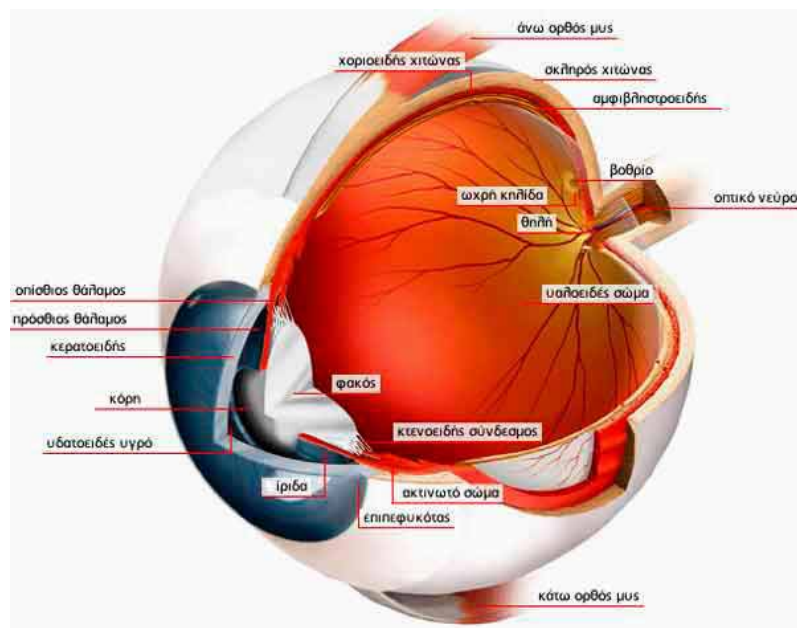
## 1. ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

### 1.1 Ο βολβός του οφθαλμού

Ο βολβός του οφθαλμού αποτελεί το κύριο όργανο της όρασης. Έχει σχήμα σφαιρικό σχεδόν σαν «μπάλα». Διακρίνουμε το εξωτερικό του (το τοίχωμα) και το εσωτερικό του (το περιεχόμενο).

Το **τοίχωμα** το αποτελούν τρεις χιτώνες (**Εικ.1.1**):

- 1) Ο έξω — ο ινώδης(κερατοειδής, σκληρός).
- 2) Ο μέσος — ο αγγειώδης ( ή ραγοειδής).
- 3) Ο έσω — ο νεύρινος (ο αμφιβληστροειδής).



**Εικ.1.1:Βολβός οφθαλμού.**

1. Ο **ινώδης**, που είναι και ο πιο ανθεκτικός χιτώνας αποτελεί το «σκελετό» του βολβού. Το πρόσθιο διαφανές μέρος αυτού, «το τζάμι του οφθαλμού»,ονομάζεται κερατοειδής, το πίσω, το αδιαφανές (το λευκό), λέγεται σκληρός. Το σημείο που γίνεται η μετάπτωση από το ένα στο άλλο τμήμα (μια κυκλική περιοχή στα όρια του κερατοειδούς σκληρού) λέγεται σκληρο-κερατοειδές όριο.

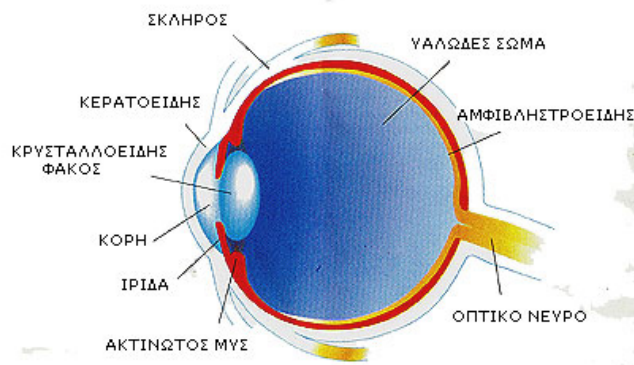
1.α Ο **κερατοειδής** είναι διαφανής, δεν έχει αγγεία, αλλά παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία – αισθητικότητα, επειδή αποτελείται από πολλές νευρικές ίνες.

1.β Ο **σκληρός** αποτελεί τον ανθεκτικό χιτώνα, επάνω στον οποίο καταφύονται οι τένοντες των εξ οφθαλμοκινητικών μυών. Διάφορα αγγεία διασχίζουν το σκληρό, όπως οι περιδίνητες φλέβες, που αποχετεύουν το αίμα κ.ά. Στο πίσω μέρος διαπερνά το σκληρό το οπτικό νεύρο.

2. Ο **αγγειώδης** χιτώνας μοιάζει με τη χοριοειδή μήνιγγα του εγκεφάλου και βοηθά με το οπίσθιο τμήμα του (το χοριοειδή) στη θρέψη του αμφιβληστροειδούς και το πρόσθιο, το ακτινωτό σώμα, στην παραγωγή του υδατοειδούς υγρού (προσφέρει θρεπτικά συστατικά στο φακό, την ίριδα και τον κερατοειδή). Επειδή έχει σκούρο χρώμα, μελανό, μοιάζει σαν μαύρο σταφύλι (ρόγα ή ράγα), γι' αυτό λέγεται και ραγοειδής.

2.α Ο χοριοειδής είναι ο τροφικός υμένας. Το χρώμα του είναι μαύρο επειδή περιέχει αρκετή χρωστική, όπως και πολλά αγγεία. Τα αγγεία αυτά, και πιο πολύ οι τελικές απολήξεις των αγγείων αυτών, τα τριχοειδή, βοηθούν στην θρέψη του αμφιβληστροειδούς.

2.β Το ακτινωτό σώμα ουσιαστικά είναι μια αγγειομυϊκή μεμβράνη. Δηλαδή έχει αρκετά αγγεία και ορισμένους ιδιαίτερους αγγειακούς σχηματισμούς (που λέγονται ακτινοειδείς προβολές) όπου παράγεται το υδατοειδές υγρό. Από την περιοχή αυτή ξεκινούν και οι ίνες που συγκρατούν το φακό(**Εικ.1.2**).

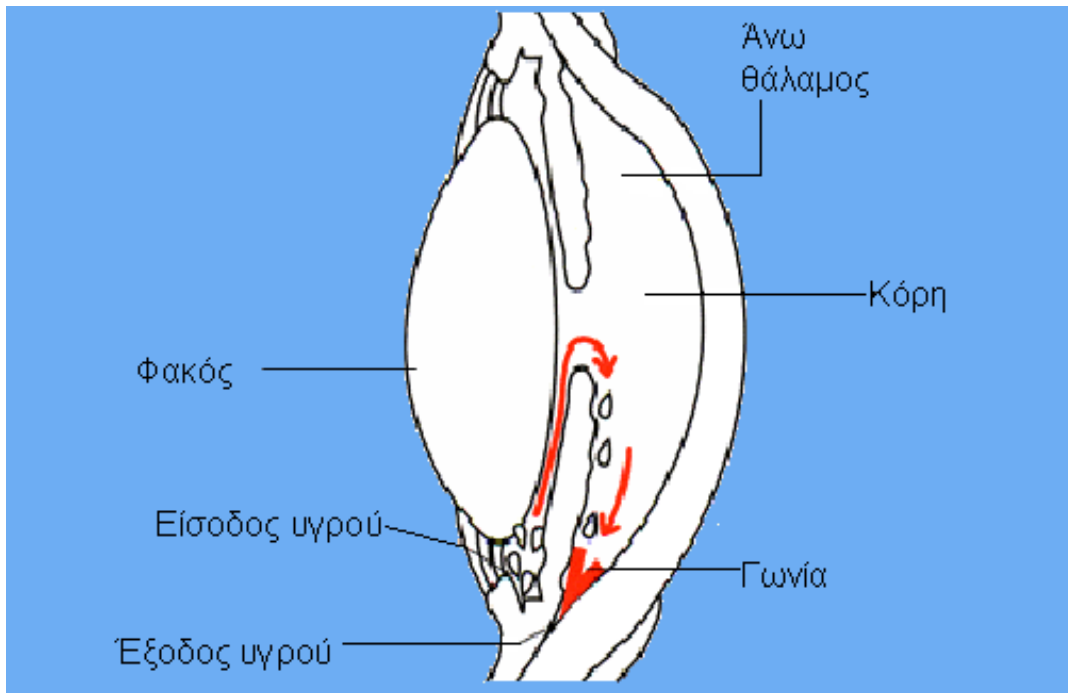


**Εικ.1.2: Δομή του οφθαλμού.**

2.γ Η ίριδα είναι σαν το διάφραγμα της φωτογραφικής μηχανής. Έχει μια οπή στο κέντρο, την κόρη, για να περάσουν οι ακτίνες του φωτός. Αν το φως είναι έντονο, η οπή κλείνει για να προστατεύσει τον αμφιβληστροειδή. Αν είναι λίγος ο φωτισμός (σούρουπο, βράδυ), τότε η κόρη μεγαλώνει. Το μέγεθος της κόρης που



καθορίζεται από το τους μυς που έχει η ίριδα, ρυθμίζεται με αντανακλαστικό (αυτόματο) μηχανισμό(Εικ.1.3).



Εικ.1.3: Ίριδα.

3. Ο **νεύρινος** χιτώνας αποτελείται από την κύρια φωτοευαίσθητη στοιβάδα αυτού, τον ιδίως αμφιβληστροειδή, και το «μελάγχρουν επιθήλιο». Το τελευταίο αυτό επαλείφει την εξωτερική επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς και έχει στηρικτική ιδιότητα και προστατευτική λειτουργία για να προφυλάσσει τα οπτικά κύτταρα του αμφιβληστροειδούς από τις ισχυρές ανακλάσεις του φωτός. Μεταξύ του μελάγχρου επιθηλίου και του αμφιβληστροειδούς υπάρχει σχισμοειδής χώρος, που σε παθολογικές καταστάσεις αυξάνει (γεμίζει από υγρό) και έτσι προκαλείται υπέγερση (ένα ανασήκωμα) αυτού που λέγεται «αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς».

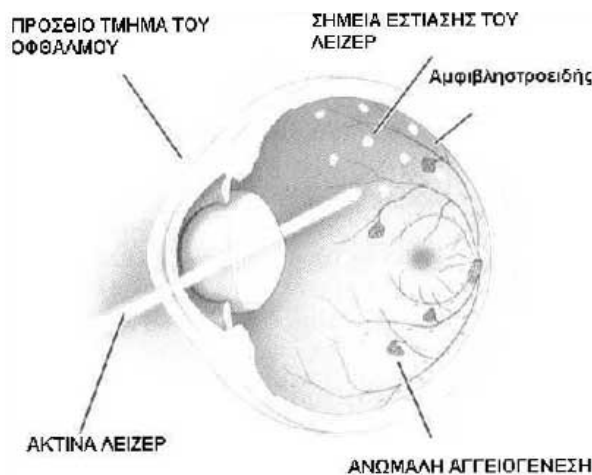
Οι χιτώνες που περιγράψαμε, ο ινώδης, ο αγγειώδης και ο νεύρινος, αποτελούν το τοίχωμα του βολβού και περιβάλλουν εξωτερικά το περιεχόμενό του.

Το **περιεχόμενο** του βολβού του οφθαλμού είναι *διαφανές*, για να μπορούν να περνούν οι ακτίνες του φωτός και να φθάνουν στον αμφιβληστροειδή και στην ωχρά κηλίδα. Το περιεχόμενο του βολβού σχηματίζουν το *υδατοειδές υγρό*, ο *φακός* (ο κρυσταλλοειδής, όπως λέγεται) και το *υαλοειδές σώμα*. Παρουσιάζει δε ορισμένες κοιλότητες, από εμπρός προς τα πίσω, τον πρόσθιο θάλαμο (μεταξύ κερατοειδούς και

ίριδας), τον οπίσθιο θάλαμο (μεταξύ ίριδας και φακού) και την υαλοειδική κοιλότητα (πίσω από το φακό, μεταξύ φακού και αμφιβληστροειδούς).

## 1.2 Φωτοπηξία αμφιβληστροειδούς

Μια φωτεινή ακτίνα laser εστιάζεται επάνω στον κατεστραμμένο αμφιβληστροειδή. Μικρές δόσεις της ακτίνας laser μπορούν να σφραγίσουν τη διαρροή από τα αμφιβληστροειδικά αγγεία για να ελαττώσουν το οίδημα της ωχράς. Αυτό καλείται φωτοπηξία. Για την ανώμαλη ανάπτυξη των αγγείων (νεοαγγείωση), οι δόσεις της ακτίνας laser διαχέονται στις πλαϊνές περιοχές του αμφιβληστροειδή. 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. Κατά τη φωτοπηξία, το laser εστιάζεται επάνω στον αμφιβληστροειδή για να σφραγίσει τις διαρροές από τα αγγεία και να ελαττώσει την ανώμαλη ανάπτυξη νέων αγγείων.<sup>VII</sup>



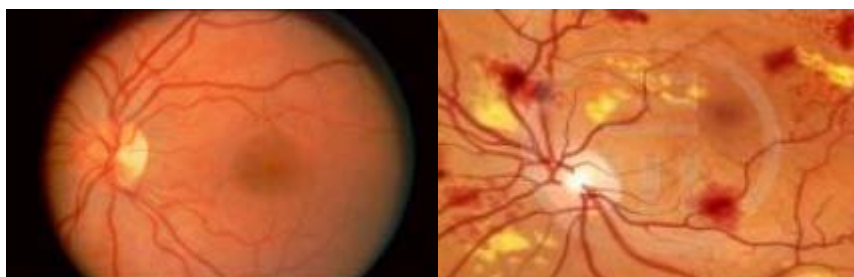
Εικ.1.4: Φωτοπηξία αμφιβληστροειδούς.

### 1.2.1 Εφαρμογές

- **Διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια**

**Περιγραφή:** Η διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια αποτελεί την κυριότερη αιτία τύφλωσης στα άτομα κάτω των 60 ετών. Σ' αυτή τη νόσο προσβάλλονται τα αγγεία του βυθού του οφθαλμού λόγω του αυξημένου σακχάρου στο αίμα και

παρουσιάζονται αιμορραγίες και διαρροή υγρού από τα αγγεία του βυθού. Το αποτέλεσμα είναι η πτώση της όρασης όταν οι βλάβες αφορούν την κεντρική περιοχή του βυθού (την περιοχή της ωχράς κηλίδας). Σε μερικούς διαβητικούς με σοβαρή νόσο εμφανίζονται παθολογικά αγγεία (νεοαγγεία) μέσα στο μάτι, που μπορούν να αιμορραγήσουν και να μειώσουν την όραση απότομα και σε μεγάλο βαθμό, χωρίς πάντα να είναι δυνατή η θεραπεία. Τέλος σε μερικές περιπτώσεις, τα φυσιολογικά αγγεία του οφθαλμού καταστρέφονται, με αποτέλεσμα τη διακοπή της κυκλοφορίας του αίματος στην κεντρική περιοχή του βυθού και τη μόνιμη πτώση της όρασης.



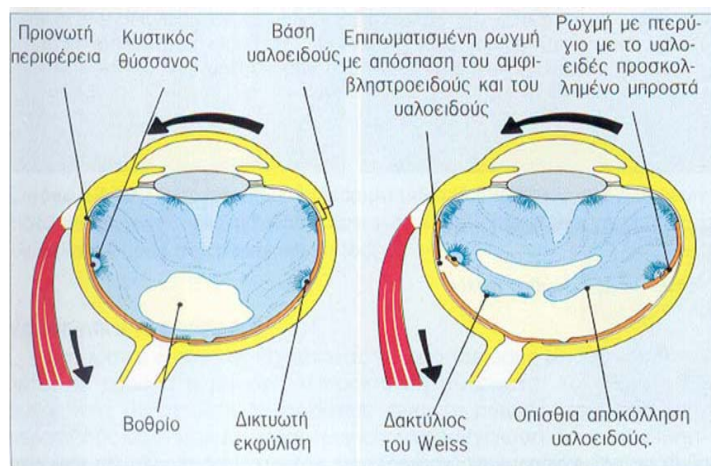
**Εικ.1.5: Φυσιολογικός βυθός οφθαλμού και Διαβητικός βυθός με αιμορραγίες και οίδημα.**

**Αντιμετώπιση:** Η θεραπεία γίνεται με laser στο βυθό του οφθαλμού όταν η διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια γίνει επικίνδυνη για την όραση. Με το laser επιχειρείται απόφραξη των σημείων διαρροής και αιμορραγίας, ώστε να διατηρηθεί ή και να βελτιωθεί η όραση. Στην περίπτωση ανάπτυξης παθολογικών αγγείων γίνεται laser σε μεγάλη έκταση του βυθού (όχι όμως στην κεντρική περιοχή) και αυτό προκαλεί την εξαφάνιση των παθολογικών αγγείων και την αποφυγή αιμορραγίας μέσα στον οφθαλμό.

- **Ιδιοπαθής ή ρηγματογενής αποκόλληση αμφιβληστροειδούς**

**Περιγραφή:** Ο αμφιβληστροειδής αποτελείται από δύο πέταλα: τον ιδίως αμφιβληστροειδή και το μελάγχρουν επιθήλιο. Τα δύο αυτά πέταλα φυσιολογικά βρίσκονται σε χαλαρή επαφή μεταξύ τους. Στην ιδιοπαθή αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς τα δύο πέταλα χωρίζονται διότι μεταξύ τους συναθροίζεται υγρό. Η ιδιοπαθής λοιπόν αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς είναι το αποτέλεσμα της άθροισης υγρού μεταξύ της στιβάδας των ραβδίων-κωνίων και του μελάγχρουν επιθηλίου. Για να δημιουργηθεί όμως η συλλογή του υγρού στον χώρο που αναφέραμε πρέπει να συμβεί ρήγμα στον ιδίως αμφιβληστροειδή (ρωγμή ή οπή). Μέσα από το ρήγμα περνούν υδαρή συστατικά του υαλοειδούς σώματος που αποκολλούν τον αμφιβληστροειδή. Για να γίνει όμως η ρωγμή πρέπει στις πιο πολλές

περιπτώσεις να συνυπάρχουν δύο παράγοντες: υαλοειδική έλξη και εκφυλιστική αλλοίωση του αμφιβληστροειδούς (δηλαδή περιοχή του αμφιβληστροειδή όπου είναι λεπτότερος από το φυσιολογικό) αντίστοιχα προς την έλξη (**Εικ.1.6**).



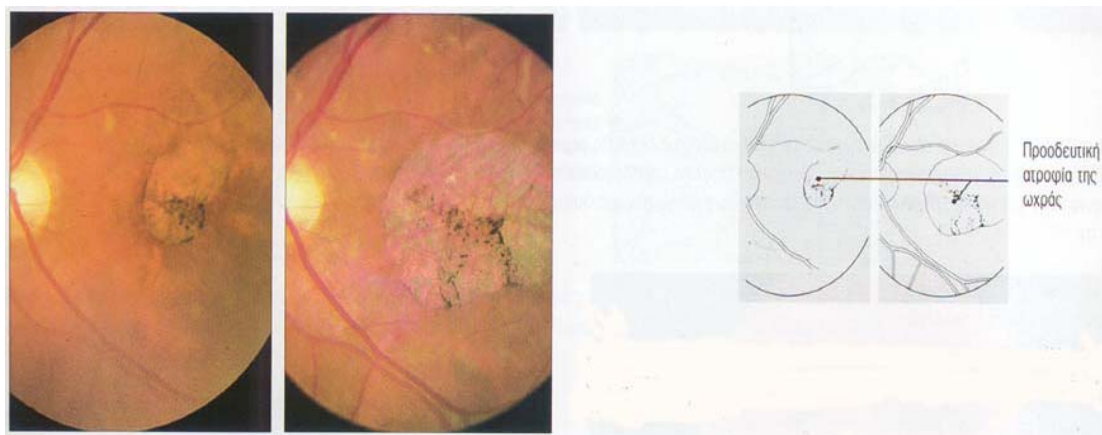
**Εικ.1.6:**Υαλοαμφιβληστροειδικές έλξεις κατά την αποκόλληση του αμφιβληστροειδούς.

**Αντιμετώπιση:** Η θεραπεία της ιδιοπαθούς αποκόλλησης του αμφιβληστροειδή είναι μόνο χειρουργική. Σκοπός της θεραπείας είναι η απόφραξη της οπής ή της ρωγμής που προκάλεσε την αποκόλληση. Η απόφραξη επιτυγχάνεται με τη δημιουργία στερεάς χοριοαμφιβληστροειδικής ουλής στην περιοχή της ρωγμής. Η θεραπεία είναι απλούστερη εάν υπάρχει μόνο ρωγμή του αμφιβληστροειδούς χωρίς υπέγερση. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζουμε γύρω από την ρωγμή διπλό στοίχο φωτοπηξίας με ακτίνες laser ή κρυοπηξία δια μέσου του σκληρού χιτώνα στην περιοχή της ρωγμής. Η εφαρμογή των ακτινών laser ή της κρυοπηξίας έχει σαν σκοπό τη δημιουργία άσηπτης χοριοαμφιβληστροειδικής φλεγμονής αρχικά και χοριοαμφιβληστροειδικής ουλής αργότερα.

- **Οικογενής εκφύλιση της ωχράς (v Stargardt)**

Είναι οικογενής και κληρονομική νόσος, μεταδιδόμενη συνήθως κατά τον αυτοσωμικό υπολειπόμενο χαρακτήρα. Προσβάλλει τα παιδιά μιας οικογένειας όταν φθάσουν σε ορισμένη ηλικία. Στην αρχή της νόσου μόλις διαφαίνονται ελαφρές μελαχρωστικές αλλοιώσεις στην ωχρά και, σπανίως, μικρά λευκοκίτρινα στίγματα. Με την πλήρη ανάπτυξη της νόσου η βλάβη εμφανίζεται αυστηρά στην περιοχή της ωχράς, με τη μορφή στρογγυλής ή ωσειδούς κηλίδας (ατροφία του μελάχρουν επιθηλίου) μεγέθους μέχρι 2 θηλαίων διαμέτρων. Τα κεντρικά αγγεία και ο υπόλοιπος

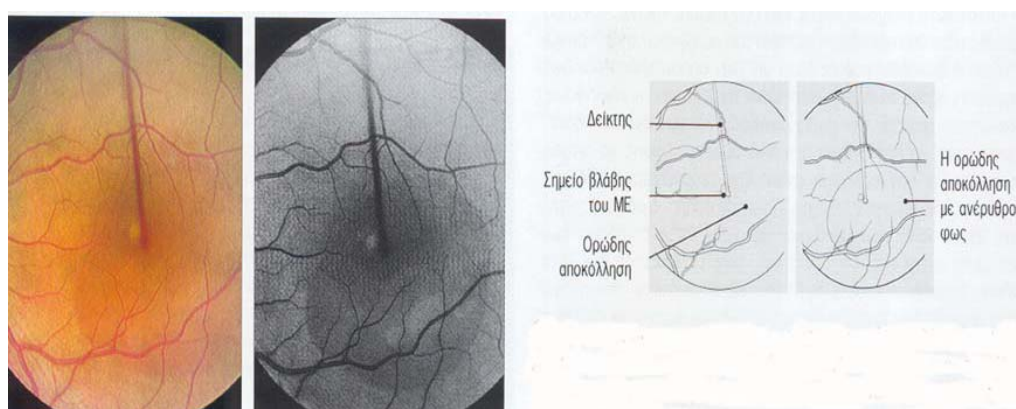
αμφιβληστροειδής είναι συνήθως φυσιολογικά και μόνο η θηλή μπορεί να παρουσιάσει αποχρωματισμό κροταφικά.



**Εικ.1. 7:** Βυθοσκοπικά ευρήματα σε ασθενή με v. Stargardt με προοδευτική ατροφία της ωχράς.

- **Κεντρική ορώδης χοριοαμφιβληστροειδοπάθεια**

Είναι αρκετά συχνή νόσος, αγνώστου αιτιολογίας, κατά την οποία παρατηρείται οίδημα του αμφιβληστροειδούς στην περιοχή της ωχράς. Η όραση είναι μετρίως ελαττωμένη (5-7/10) και, συχνά, η προσθήκη μικρής υπερμετροπικής διόρθωσης (+0.75 έως +1.00 sph) αποκαθιστά τη φυσιολογική όραση, γεγονός που οφείλεται σε υπέγερση του ιδίως αμφιβληστροειδή λόγω του οιδήματος. Σπάνια η όραση πέφτει κάτω του 1/10. Οφθαλμοσκοπικός παρατηρείται διαφανές οίδημα στην περιοχή της ωχράς, σαφώς περιγεγραμμένο από τον υπόλοιπο αμφιβληστροειδή (**Εικ.1.8**). Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρούνται στην περιοχή του οιδήματος χαρακτηριστικά λευκοκίτρινα σημεία, το δε οίδημα οριοθετείται από έντονη αντανάκλαση.



**Εικ.1.8:** Κεντρική ορώδης χοριοαμφιβληστροειδοπάθεια.

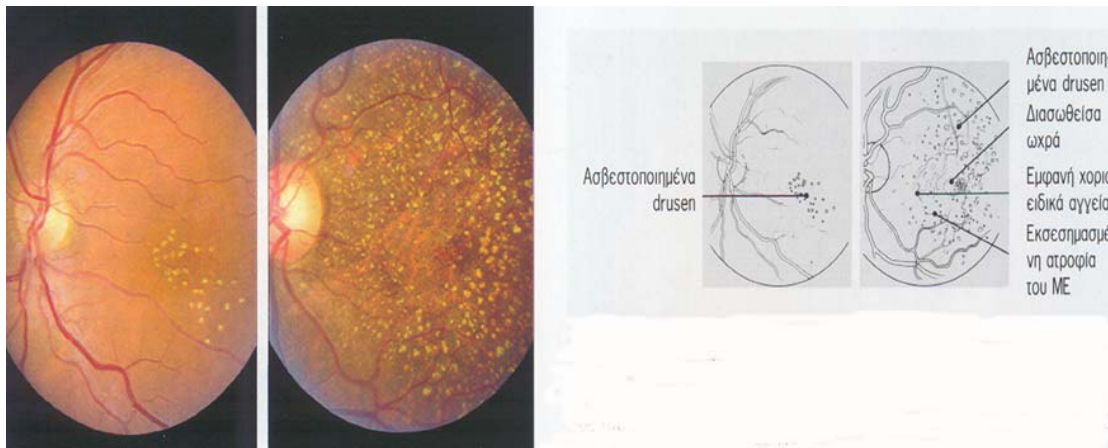
- **Ηλικιακή εκφύλιση της ωχράς (ΗΕΩ)**

Η ΗΕΩ αποτελεί την κυριότερη αιτία τύφλωσης ατόμων ηλικίας >65 ετών στον Δυτικό κόσμο. Είναι νόσος αμφοτερόπλευρη, με έναρξη στον ένα οφθαλμό σε ηλικία κατά μέσο όρο 65 ετών και συχνότητα εμφάνισης στον έτερο οφθαλμό 12% κάθε χρόνο

Η ΗΕΩ διακρίνεται σε δύο μορφές: την ξηρά μορφή και την εξιδρωματική.

α. Ξηρά μορφή

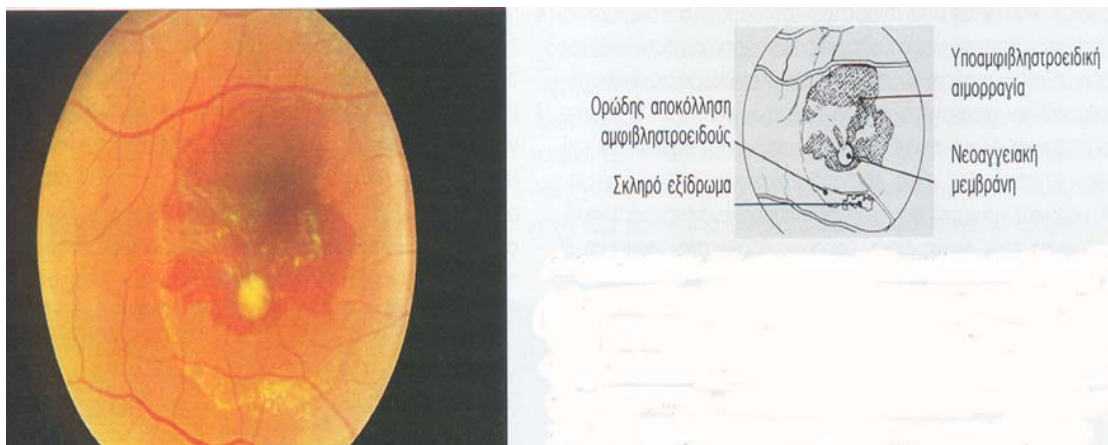
Προκαλεί προοδευτική απώλεια της κεντρικής όρασης κατά τη διάρκεια μηνών ή ετών.



**Εικ.1.9: Βυθοσκοπικά ευρήματα σε ασθενή με ηλικιακά εκφύλιση ωχράς ξηρού τύπου.**

β. Εξιδρωματική μορφή (ή δισκοειδής εκφύλιση ωχράς των Junius-Kuhnt)

Είναι η λιγότερο συχνή μορφή που προκαλεί απώλεια της κεντρικής όρασης μέσα σε λίγες ημέρες, σε αντίθεση με την προηγούμενη που η απώλεια της όρασης είναι προοδευτική, σε διάστημα μηνών ή ετών.



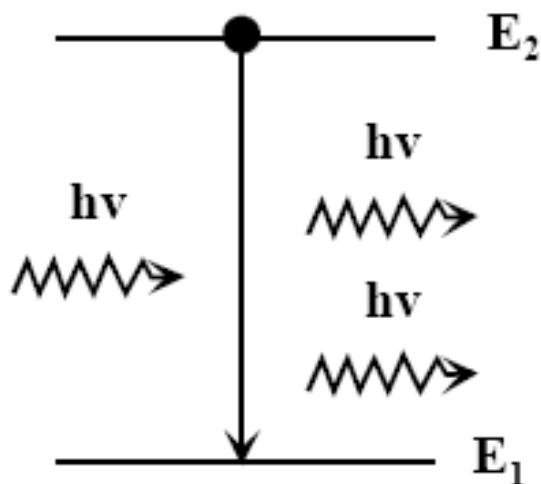
**Εικ.1.10: Βυθοσκοπικά ευρήματα σε ασθενή με ηλικιακά εκφύλιση ωχράς εξιδρωματικού τύπου.**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ LASER

#### 2.1 Αρχή λειτουργίας laser

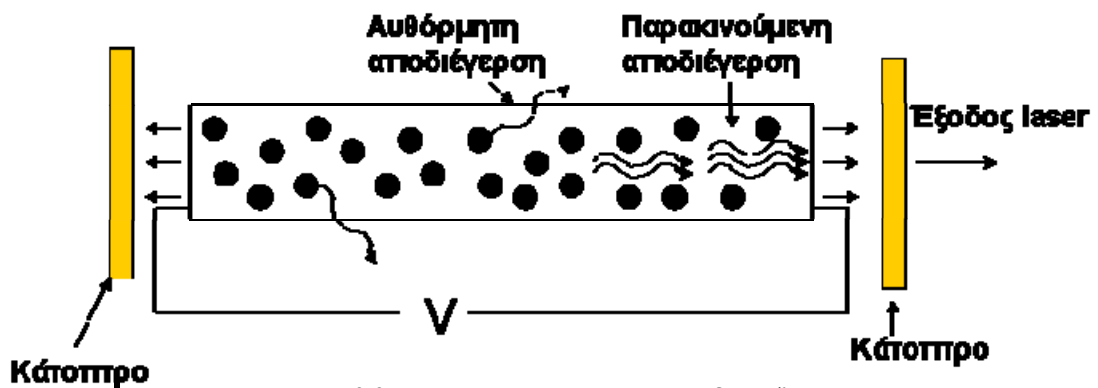
Η λέξη LASER είναι ακρωνύμιο της φράσης Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, και χρησιμοποιείται λόγω της βασικής αρχής λειτουργίας ενός συστήματος laser που είναι η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας από άτομα ή μόρια που βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση. Η κλασσική διαδικασία δημιουργίας φωτός είναι η αυθόρμητη εκπομπή κατά την οποία τα διεγερμένα άτομα αποδιεγείρονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, δίνοντας φωτόνια των οποίων οι ιδιότητες δεν παρουσιάζουν καμία συμφωνία ή συσχέτιση. Επομένως, η ακτινοβολία που εκπέμπεται αυθόρμητα από κλασσικές πηγές, αφενός διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο και αφετέρου η κατανομή της συχνότητας της (ή του μήκους κύματος) είναι ιδιαίτερα πλατιά. Αντίθετα, κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή (Εικ. 2.1), η δημιουργία του φωτονίου εξαρτάται από ήδη υπάρχοντα φωτόνια (δημιουργημένα αρχικά με αυθόρμητη εκπομπή), τα οποία εξαναγκάζουν τα διεγερμένα άτομα να εκπέμψουν φωτόνια πανομοιότυπα με τα ήδη υπάρχοντα. Δηλαδή, ο μηχανισμός της εξαναγκασμένης εκπομπής προκαλεί το πολλαπλασιασμό των φωτονίων, με τα δημιουργημένα φωτόνια να έχουν όλα ακριβώς τις ίδιες ιδιότητες. Σαν αποτέλεσμα, η δέσμη laser έχει μοναδικές ιδιότητες όπως συμφωνία, μονοχρωματικότητα, κατευθυντικότητα και πυκνότητα ενέργειας.



Εικ.2.1: Μηχανισμός εξαναγκασμένης εκπομπής.

## 2.2 Διάταξη laser

Μια απλοποιημένη διάταξη laser φαίνεται στην **Εικ.2.2**. Το laser αποτελείται από το ενεργό υλικό (active medium), τον μηχανισμό άντλησης (excitation mechanism) και την οπτική κοιλότητα που υποστηρίζει τον μηχανισμό ανάδρασης (feedback) και αποτελείται από δύο κάτοπτρα, ένα με ανακλαστικότητα 100% και ένα ημιδιαπερατό από το οποίο εξέρχεται η χρήσιμη ακτινοβολία. Το ενεργό υλικό μπορεί να είναι στερεό (π.χ. κρύσταλλο ή ημιαγώγιμο υλικό), υγρό (π.χ. διάλυμα οργανικής χρωστικής) ή αέριο (π.χ. He-Ne ή CO<sub>2</sub>). Το ενεργό υλικό διεγείρεται μέσω του μηχανισμού άντλησης (που μπορεί να είναι ηλεκτρική, οπτική ή χημική διαδικασία) με αποτέλεσμα την δημιουργία μέσω αυθόρμητης εκπομπής μικρού αριθμού φωτονίων, το μήκος κύματος των οποίων εξαρτάται από τις ενεργειακές στάθμες του ενεργού υλικού που συμμετέχουν στην διαδικασία διέγερσης. Τα φωτόνια αυτά ταξιδεύουν μέσα στο διεγερμένο ενεργό υλικό και πολλαπλασιάζονται μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, με τα δημιουργημένα φωτόνια να παρουσιάζουν πανομοιότυπες ιδιότητες όπως μήκος κύματος, διεύθυνση διάδοσης και φάση. Ο πολλαπλασιασμός των φωτονίων συνεχίζεται μέσω πολλαπλών διαδρομών μέσα στην οπτική κοιλότητα και όταν ο αριθμός τους υπερβεί κάποιο όριο, εξέρχεται δέσμη laser από το ημιδιαπερατό κάτοπτρο.



Εικ.2.2: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης laser.

Σήμερα υπάρχει πληθώρα συστημάτων laser τα οποία διαφέρουν ως προς διάφορες λειτουργικές παραμέτρους τους όπως μήκος κύματος εκπομπής, ενέργεια εξόδου, χρονική εξέλιξη της λειτουργίας (παλμική ή συνεχή) κλπ. Οι δυνατότητες τους επεκτείνονται από το υπεριώδες στο υπέρυθρο, από συνεχή λειτουργία έως παλμούς διάρκειας fsec και συστήματα με ενέργεια κατάλληλη για ευθυγράμμιση έως και την κοπή ανοξείδωτου χάλυβα μεγάλου πάχους. Αντίστοιχα, είναι τεράστια η



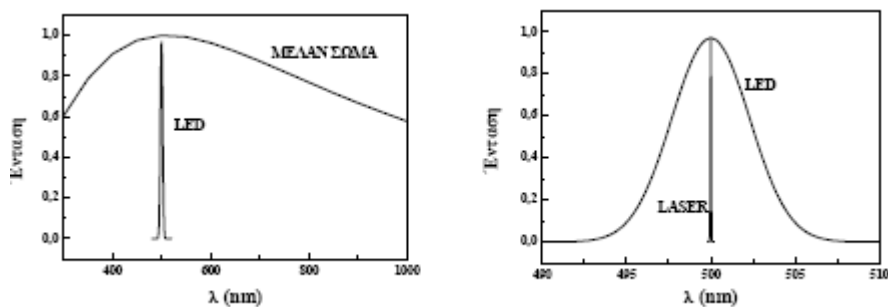
πληθώρα των εφαρμογών όπου τα laser μπορούν να παίξουν ουσιαστικό ρόλο. Διάφοροι τομείς όπως βιομηχανία, επικοινωνίες, ιατρική, διαγνωστική και φυσική-χημεία, έχουν παρουσιάσει τα τελευταία τεράστια εξέλιξη λόγω των νέων οριζόντων που άνοιξαν τα laser.

## 2.3 Ιδιότητες laser

Όπως ήδη αναφέρθηκε, λόγω της αρχής λειτουργίας του, το laser παρουσιάζει μερικές μοναδικές ιδιότητες οι οποίες το καθιστούν μοναδικό εργαλείο σε μία πληθώρα εφαρμογών. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες αυτές καθώς ο τρόπος που οδηγούν σε εφαρμογές μέτρησης, ανίχνευσης, ανάλυσης και ελέγχου.

### 2.3.1 Μονοχρωματικότητα

Η φασματική γραμμή εκπομπής από μία πηγή laser είναι ιδιαίτερα λεπτή, μία ιδιότητα την οποία η επιστήμη δεν είχε καταφέρει να επιτύχει με κλασσικές πηγές ακόμα και μετά από προσπάθειες πολλών ετών. Για να γίνει κατανοητή η πρόοδος που πέτυχε το laser, η φασματική γραμμή του βρέθηκε να είναι περίπου ένα εκατομμύριο φορές στενότερη από τα καλύτερα αποτελέσματα των κλασσικών πηγών. Ένα παράδειγμα πλάτους φασματικής γραμμής εκπομπής κοντά στα 500 nm παρουσιάζεται στην **Εικ.2.3** για μέλαν σώμα (εκπομπή λόγω θερμοκρασίας), LED και laser, όπου είναι εμφανής η τεράστια διαφορά που επιτυγχάνεται με το laser.



**Εικ.2.3: Φασματική κατανομή εκπομπής από μέλαν σώμα, LED και LASER.**

Συνοπτικά, η ιδιότητα του στενού φασματικού πλάτους προέρχεται από δύο βασικές προϋποθέσεις της λειτουργίας ενός συστήματος laser:

α) στο ενεργό υλικό μπορούν να πολλαπλασιαστούν μόνο τα φωτόνια με συχνότητα  $\nu=(E_2-E_1)/h$ , όπου  $E_2$  και  $E_1$  η διεγερμένη και η βασική ενεργειακή

κατάσταση αντίστοιχα. Με βάση αυτήν την προϋπόθεση, σε μία ιδεατή κατάσταση όπου οι ενεργειακές καταστάσεις θα είχαν μηδενικό φασματικό πλάτος, το laser θα είχε μία και μοναδική συχνότητα, δηλαδή μηδενικό φασματικό πλάτος.

β) μέσα στην οπτική κοιλότητα του laser μπορούν να συντηρηθούν μόνο οι συχνότητες συντονισμού αυτής της κοιλότητας. Η τελευταία προϋπόθεση μπορεί να οδηγήσει σε ένα πλάτος γραμμής εκπομπής του laser πολύ στενότερο από το συνηθισμένο πλάτος γραμμής της μετάπτωσης, όπως αυτό παρατηρείται συνήθως στην αυθόρμητη εκπομπή. Δηλαδή, το πλάτος της φασματικής εκπομπής του laser εξαρτάται από το συνδυασμό (αλληλοεπικάλυψη) του φάσματος αυθόρμητης εκπομπής και του φάσματος συχνοτήτων συντονισμού της οπτικής κοιλότητας.

Ταυτόχρονα, το στενό φασματικό πλάτος αποτελεί ένα ισχυρότατο εργαλείο σε διάφορες διατάξεις σχετικές με στοιχειακή ανάλυση όπως TOF-MS, LIF κλπ. Λόγω της ιδιότητας αυτής, η ακτινοβολία laser μπορεί να διεγείρει επιλεκτικά άτομα ή μόρια και να οδηγήσει στην αναγνώριση τους μέσω του συνεπαγόμενου ιονισμού ή φθορισμού.

### 2.3.2 Συμφωνία

Η άλλη ιδιότητα με τεράστια σημασία είναι η συμφωνία που παρουσιάζει η ακτινοβολία laser. Η συμφωνία σαν έννοια είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και ο απλούστερος τρόπος για να περιγραφεί είναι η θεώρηση των φωτονίων ως επίπεδων ΗΜ κυμάτων οπότε και κάθε ένα από αυτά, για διάδοση στην διεύθυνση z, περιγράφεται από μία εξίσωση της μορφής:

$$y = Ae^{-j(\omega t - kz + \varphi)} \quad \text{ή} \quad y = A \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

όπου y η στιγμιαία τιμή του πλάτους του κύματος,

A είναι το μέγιστο πλάτος,

$\omega$  η γωνιακή συχνότητα ( $\omega = 2\pi f$  όπου f η συχνότητα),

k το κυματο-άνυσμα που ορίζεται ως  $k = 2\pi/\lambda$  (με  $\lambda$  το μήκος κύματος),

$\varphi$  η αρχική φάση του κύματος (στην πηγή του) και

$\omega t - kz + \varphi$  η φάση του κύματος για διάφορες τιμές του t και z.

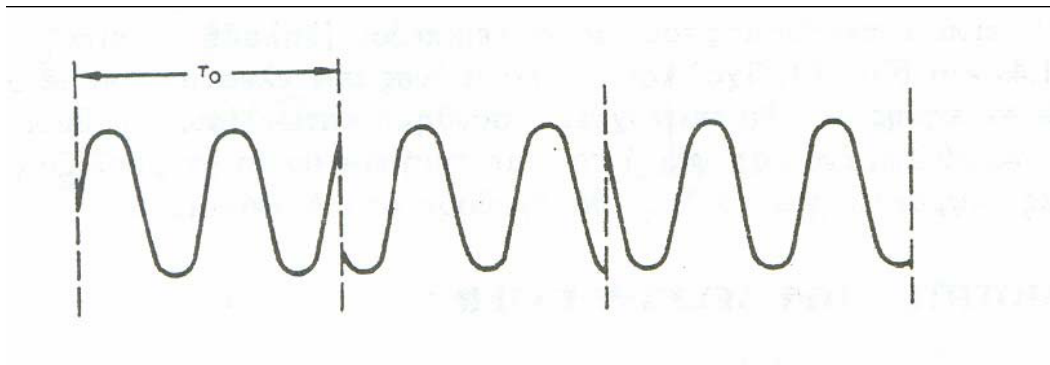
Σε ένα laser, όλα τα φωτόνια είναι πανομοιότυπα, δηλαδή παρουσιάζουν και την ίδια αρχική φάση αλλά και πολύ στενή κατανομή γωνιακών συχνοτήτων και κυματανυσμάτων, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό έχει σαν

αποτέλεσμα η φάση των ΗΜ κυμάτων να παραμένει περίπου ίδια για μεγάλο χρονικό διάστημα  $t$  (ή απόσταση  $z$  αντίστοιχα), δηλαδή τα φωτόνια παραμένουν σε φάση για μεγάλο χρόνο (αλλά και σε μεγάλη περιοχή του χώρου). Η συνθήκη αυτή καθορίζει την συμφωνία της ακτινοβολίας laser, ιδιότητα η οποία οδηγεί ιδανικά στην ικανότητα μόνιμης γνώσης της φάσης σε μία δέσμη laser με δυνατότητα πρόβλεψης σε σχέση με την μεταβολή του χώρου ή του χρόνου. Επιπλέον οδηγεί σε μερικές μοναδικές εφαρμογές όπως π.χ. η συμβολομετρία ή η ολογραφία, όπου η ύπαρξη συμφωνίας είναι αναγκαία προϋπόθεση.

Για κάθε Η.Μ. κύμα, μπορούμε να εισαγάγουμε δύο έννοιες συμφωνίας, τη χωρική και τη χρονική συμφωνία. Για να ορίσουμε τη χωρική συμφωνία, θεωρούμε δύο σημεία του χώρου  $P_1$  και  $P_2$ , τα οποία κατά τη χρονική στιγμή  $t=0$ , βρίσκονται πάνω στο ίδιο μέτωπο κύματος ενός δεδομένου Η.Μ. κύματος. Τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία είναι  $E_1(t)$  και  $E_2(t)$ , με την διαφορά μεταξύ των φάσεων των δύο πεδίων να είναι μηδέν στο χρόνο  $t=0$ . Αν αυτή η διαφορά παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή  $t>0$ , θεωρούμε ότι υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων. Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε δύο σημεία του Η.Μ κύματος, το κύμα έχει ιδανική χωρική συμφωνία. Στην πράξη βέβαια, για κάθε σημείο  $P_1$ , το σημείο  $P_2$  πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κάποια πεπερασμένη περιοχή γύρω από το  $P_1$ , εάν θέλουμε να έχουμε καλό φασικό συσχετισμό. Σε αυτήν την περίπτωση, το κύμα έχει μερική χωρική συμφωνία και για κάθε σημείο  $P$  μπορούμε να εισαγάγουμε μια κατάλληλα ορισμένη περιοχή συμφωνίας  $S$ .

Για να ορίσουμε τη χρονική συμφωνία, θεωρούμε τώρα το ηλεκτρικό πεδίο του Η.Μ κύματος σε ένα δεδομένο σημείο  $P$  σε χρόνους  $t$  και  $t+\pi$ . Εάν για δεδομένη χρονική υστέρηση  $\tau$ , η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο τιμών του πεδίου παραμένει η ίδια για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , υπάρχει χρονική συμφωνία για το χρονικό διάστημα  $\tau$ . Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή του  $\tau$ , το Η.Μ. κύμα, έχει τέλεια χρονική συμφωνία. Εάν αυτό συμβαίνει μόνο για χρονική υστέρηση  $\tau$  τέτοια ώστε  $0<\tau<\tau_0$ , το κύμα έχει μερική χρονική συμφωνία, με χρόνο συμφωνίας ίσο προς  $\tau_0$ . Ένα παράδειγμα ενός Η.Μ κύματος με χρόνο συμφωνίας ίσο προς  $\tau_0$  φαίνεται στην **Εικ.2.4**, όπου το ημιτονοειδές πεδίο υφίσταται φασικά πηδήματα σε χρονικά διαστήματα ίσα προς  $\tau_0$ . Οι δυο έννοιες της χρονικής και χωρικής συμφωνίας μπορούν να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους καθώς μπορούν να δοθούν παραδείγματα κυμάτων που να έχουν τέλεια χωρική συμφωνία αλλά μόνο περιορισμένη χρονική (ή

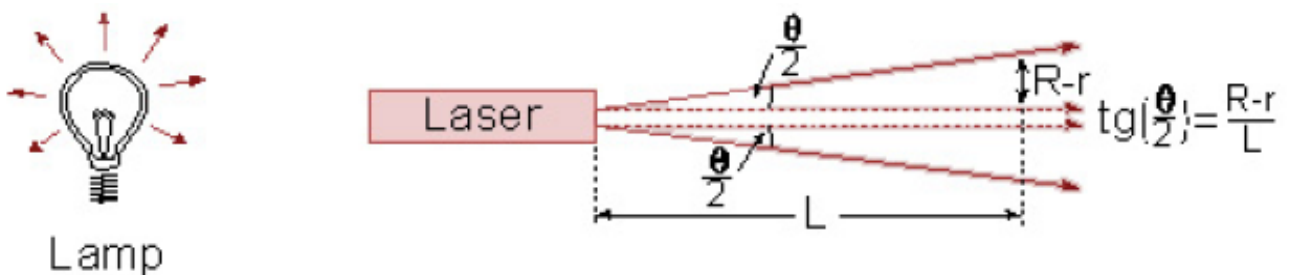
και αντίστροφα).



Εικ.2.4: Η.Μ. κύμα με χρονική συμφωνία.

### 2.3.3 Κατευθυντικότητα

Ενώ στις κλασσικές πηγές ΗΜ ακτινοβολίας, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις, η δέσμη από ένα laser εμφανίζει ισχυρή κατευθυντικότητα, η οποία περιγράφεται σαν μία ελάχιστη απόκλιση της δέσμης όπως αυτή διαδίδεται (Εικ.2.5). Αυτή η ιδιότητα είναι άμεσο επακόλουθο της διαδικασίας εξαναγκασμένης εκπομπής και της ύπαρξης οπτικής κοιλότητας. Η μεν διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής προκαλεί την δημιουργία πανομοιότυπων φωτονίων ενώ η οπτική κοιλότητα περιορίζει την ενίσχυση μόνο στα φωτόνια που διαδίδονται ακριβώς παράλληλα στον άξονα της.



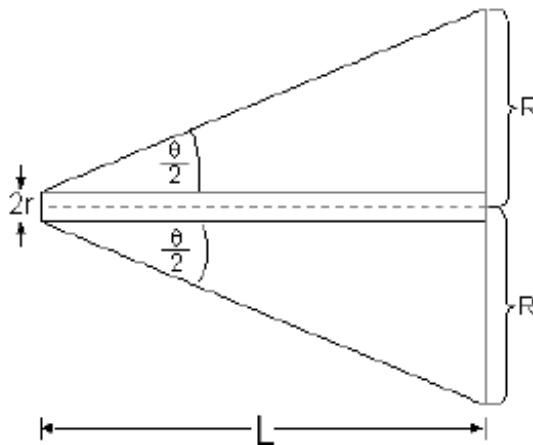
Εικ.2.5: Κατευθυντικότητα κλασσικής πηγής και laser.

Με βάση την Εικ.2.6 μπορεί να οριστεί η έννοια της απόκλισης μιας δέσμης laser. Έστω μια κυκλική δέσμη εξερχόμενη από laser με διατομή  $2r$ , η οποία σε απόσταση  $L$  γίνει  $2R$ .

Η απόκλιση της δέσμης  $\theta$  σε rad, ορίζεται με βάση την σχέση:

$$\tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2} = \frac{R - R}{L}$$

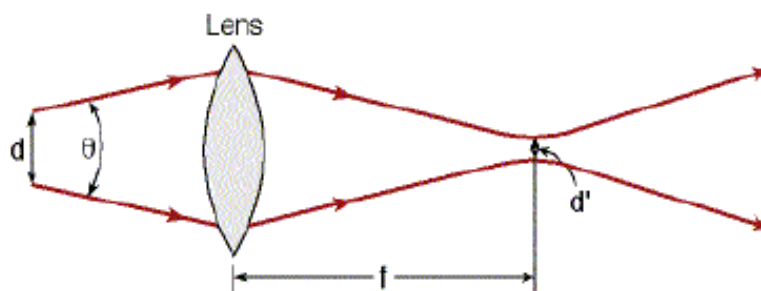
Όπου η προσέγγιση έχει γίνει λαμβάνοντας υπόψη ότι λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας της δέσμης,  $2R \ll L$ . Στην πράξη, η γωνία  $\theta$  έχει τιμές τουλάχιστον της τάξης 1 mrad ή και αρκετά μικρότερες, ειδικά σε συστήματα που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις ευθυγράμμισης. Αυτό σημαίνει ότι δέσμη με αρχική διάμετρο 2 mm, έχει διάμετρο 12 mm περίπου.



**Εικ.2.6: Ορισμός απόκλισης δέσμης.**

Γενικά, η κατευθυντικότητα της δέσμης laser σχετίζεται με την ικανότητα της δέσμης να μεταφέρει την ΗΜ ακτινοβολία σε μεγάλη απόσταση, χωρίς παρουσία εξασθένησης. Αντιθέτως, σε μια λάμπα πυρακτώσεως παρατηρείται εξασθένηση της πυκνότητας ακτινοβολίας σύμφωνα με τον νόμο  $1/r^2$ . Επομένως, η πυκνότητα ενέργειας της δέσμης laser είναι ιδιαίτερα μεγάλη, με αποτέλεσμα μία πληθώρα εφαρμογών στην βιομηχανία, την ιατρική κλπ. Μάλιστα, η πυκνότητα ενέργειας μπορεί να γίνει πάρα πολύ μεγαλύτερη λόγω της δυνατότητας που προσδίδει η κατευθυντικότητα για ισχυρή εστίαση της δέσμης (**Εικ.2.7**).

Ας υποθέσουμε ότι μία δέσμη laser με αρχική διάμετρο  $d$  και απόκλιση  $\theta$  εστιάζεται με φακό εστιακής απόστασης  $f$ . Το μέτρο της διαμέτρου στο εστιακό επίπεδο αποδεικνύεται ότι θα είναι της τάξης  $d' = f\theta$ , δηλαδή με  $\theta = 1$  mrad και  $f = 10$  cm έχουμε  $d' \approx 10$   $\mu$ m. Στις διαστάσεις αυτές, οι πυκνότητες ενέργειας είναι τεράστιες. Επίσης, λόγω της κατευθυντικότητας που παρουσιάζει μία δέσμη laser, υπάρχει η δυνατότητα ανάπτυξης διαφόρων διατάξεων ευθυγράμμισης και τηλεπισκόπισης.



Εικ.2.7: Εστίαση δέσμης laser.

### 2.3.4 Πυκνότητα ενέργειας

Για να ορίσουμε την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας με την ακτινοβολία, έχει οριστεί το μέγεθος πυκνότητα ενέργειας (fluence) με μονάδες  $J/m^2$ , δηλαδή η ενέργεια που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφανείας. Αντίστοιχα ορίζεται η πυκνότητα ισχύος ή ένταση ακτινοβολίας με μονάδες  $W/m^2$  (power density ή radiation intensity), όπου σε αυτή την περίπτωση, ιδιαίτερη σημασία παίζει η χρονική εξέλιξη της εξόδου του laser. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μία δέσμη laser παρουσιάζει ισχυρή κατευθυντικότητα. Επομένως, η πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρεται όχι μόνο είναι ιδιαίτερα μεγάλη αλλά και σε μία πρώτη προσέγγιση παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την απόσταση.

Μία δέσμη laser μεταφέρει τεράστια πυκνότητα ενέργειας ή ισχύος αντίστοιχα.. Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με την κατευθυντικότητα δίνει στο laser τεράστιες δυνατότητες σε σχέση με εφαρμογές μέτρησης απόστασης, radar laser αλλά και συστήματα ευθυγράμμισης, καθώς η δέσμη μπορεί να ταξιδέψει πάρα πολύ μακριά. Ταυτόχρονα όμως, αυτή η πυκνότητα ενέργειας, ειδικά η σχετική με εστιασμένες δέσμες από μεγάλα συστήματα laser, προσφέρει τεράστιες δυνατότητες σε κατεργασία υλικών καθώς δίνει την ικανότητα εφαρμογής τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας σε πολύ μικρές διαστάσεις. Σαν παράδειγμα, η εφαρμογή αυτής της πυκνότητας ενέργειας προκαλεί τεράστια αύξηση της θερμοκρασίας καθιστώντας την ικανή για κοπή, διάτρηση ή συγκόλληση ακόμα και μεταλλικών τμημάτων. Οι τεράστιες δυνατότητες φαίνονται ακόμα καλύτερα στην περίπτωση παλμικών laser με πολύ μικρή διάρκεια παλμού (της τάξης  $10^{-15}$  sec). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι πυκνότητες ισχύος είναι τόσο μεγάλες ώστε το σχετιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο υπερβαίνει κατά πολύ αυτό που συγκρατεί τα ηλεκτρόνια στα άτομα.

### 2.3.5 Μήκος κύματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα laser εκπέμπουν στην περιοχή γύρω από το ορατό. Λαμβάνοντας υπόψη και την μεγάλη κατευθυντικότητα της δέσμης laser, αυτή αποτελεί μία τέλεια ορατή γραμμή πολύ μεγάλου μήκους. Δηλαδή, είναι το τέλειο εργαλείο για ευθυγραμμίσεις. Ταυτόχρονα, το μήκος κύματος είναι της τάξης μm. Επομένως, αν η ακτινοβολία χρησιμοποιείται σε σύστημα αντίστοιχο του radar, η διακριτική της ικανότητα είναι της τάξης μm (σε αντίθεση με cm έως m σε κλασσικά radar). Για παράδειγμα η ιδιότητα αυτή δίνει την δυνατότητα παρακολούθησης των ανέμων μέσω της μετακίνησης αερολυμάτων που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα μήκη κύματος αυτά είναι ιδανικά για την διέγερση υλικών (ηλεκτρονικές μεταπτώσεις), οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τεχνικές στοιχειακής ανάλυσης αλλά και για χρήσεις σε οπτικές ίνες.

### 2.3.6 Πόλωση

Γενικά, η πόλωση καθορίζεται από τις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου. Για ένα ΗΜ κύμα που διαδίδεται στον άξονα z, αν το E έχει μόνο μία συνιστώσα (x ή y) τότε έχουμε γραμμική πόλωση και το E ταλαντώνεται πάντα στο ίδιο επίπεδο (**Εικ.2.8**).

Αν όμως το ηλεκτρικό πεδίο έχει δύο μη μηδενικές συνιστώσες, x και y αντίστοιχα, οι οποίες είναι της ίδιας συχνότητας, τότε η πόλωση ονομάζεται ελλειπτική και το διάνυσμα του E περιστρέφεται κατά τη διάδοση του Η/Μ κύματος. Αν  $E_x=E_y$  και η διαφορά φάσης μεταξύ τους είναι  $\pi/2$ , τότε η πόλωση είναι κυκλική. Γενικά, κάθε Η/Μ κύμα θα έχει δύο συνιστώσες και θα ισχύει:

$$E_x = E_1 \sigma \nu \nu(\omega t - kz) \quad E_y = E_2 \sigma \nu \nu(\omega t - kz + \delta) \quad \text{με} \quad \vec{E} = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y$$

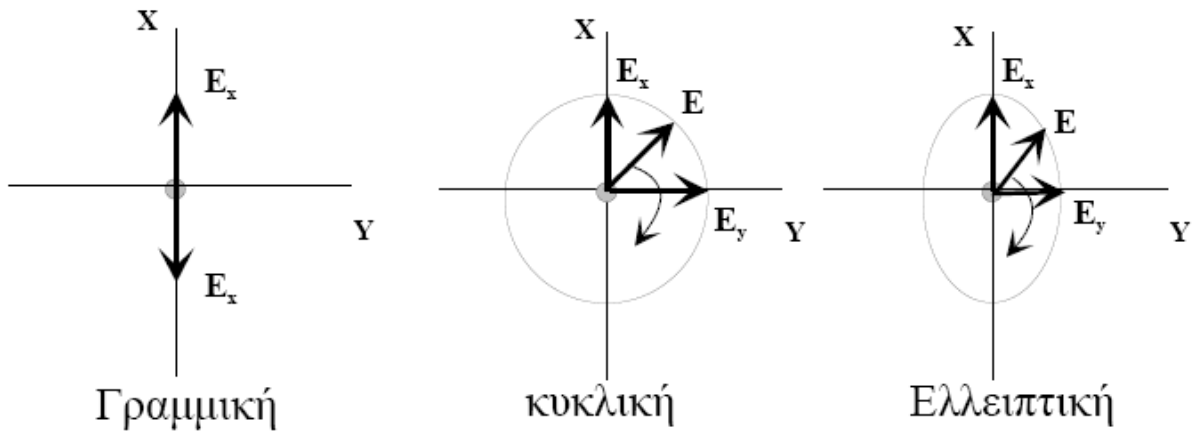
Για  $E_2=0$  έχω γραμμική πόλωση, για  $E_1=E_2$  και  $\delta=\pi/2$  έχω κυκλική πόλωση, ενώ για  $E_1 \neq E_2$  και  $\delta \neq \kappa$ , με  $\kappa$  τυχαίο έχω ελλειπτική πόλωση.

Γενικά, στις κλασσικές πηγές η ΗΜ ακτινοβολία δεν είναι πολωμένη και το φως ονομάζεται φυσικό. Σίγουρα όμως υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πόλωσης στο φυσικό φως, όμως η διαδικασία αυτή είναι σε βάρος άλλων ιδιοτήτων όπως η ενέργεια.

Αντίθετα, η οπτική κοιλότητα ενός συστήματος laser μπορεί πολύ εύκολα να

υποστηρίζει την δυνατότητα εκπομπής πολωμένης ακτινοβολίας. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, όπως η χρήση παραθύρου εξόδου υπό γωνία Brewster, οι οποίες προσφέρουν δέσμη με πολύ καλά χαρακτηριστικά πόλωσης.

Αναφορικά με τις δυνατότητες που προσφέρει η πόλωση, εκτός από την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών όπως οι αισθητήρες πεδίων, διευκολύνει την πολύ καλή ποιότητα λειτουργίας των συμβολομετρικών διατάξεων.



Εικ.2.8: Διάφορα είδη πόλωσης.

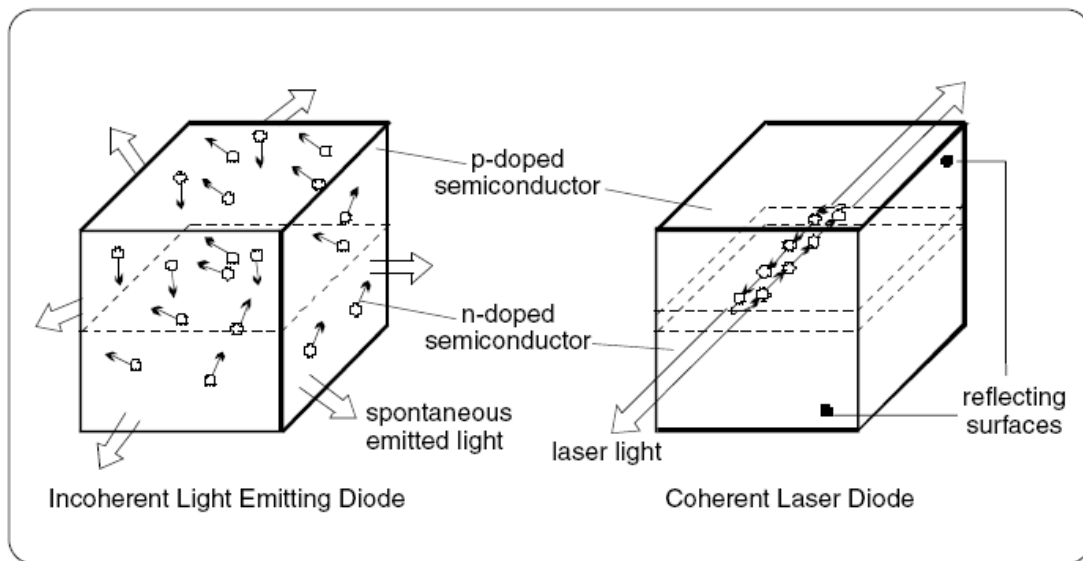


# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## 3. ΔΙΟΔΙΚΑ LASERS

### 3.1 Παραγωγή συνεχούς ακτινοβολίας

Τα διοδικά laser είναι ημιαγωγίμες συσκευές με επαφές p-n. Ανάλογα με το είδος της ακτινοβολίας, υπάρχει διαφορά στα διοδικά με επιφανειακή εκπομπή και στα διοδικά με εκπομπή ακμής. Τα κοινά διοδικά laser είναι πάντα εκπομποί ακμής. Ενώ τα LEDs μπορούν να εκπέμπουν μόνο ασύμφωνο φως, τα διοδικά laser εκπέμπουν συνεχόμενο φως όταν λειτουργούν πάνω από το όριο. Αυτό οφείλεται στην διεγερμένη εκπομπή. Το διεγερμένο εκπεμπόμενο φωτόνιο προσαρμόζεται στο φωτόνιο που έχει απελευθερώσει την ακτινοβολία, ανάλογα με την ενέργεια (μήκος κύματος εναντίον συχνότητας), τη φάση και την κατεύθυνση της μετάδοσης. Η **Εικ3.1** δείχνει τις διαφορές μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς ακτινοβολίας.

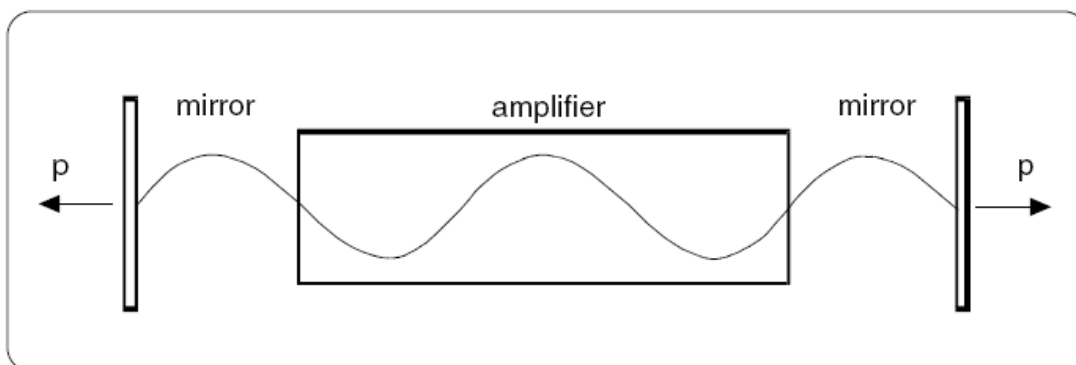


**Εικ.3.1:** Παραγωγή ακτινοβολίας από ένα LED και από το Διοδικό laser.

Για να προκληθεί ενίσχυση του φωτός από διεγερμένη ακτινοβολία, η πιθανότητα ακτινοβολίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη της απορρόφησης για την ενδιαφερόμενη φασματική περιοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με άντληση του laser. Ο ημιαγωγός έχει μετακινηθεί σε κατάσταση αντιστροφής. Στο ανώτερο ενεργειακό επίπεδο, η πυκνότητα ηλεκτρονίων, είναι μεγαλύτερη απ' ό τι στο κατώτερο ενεργειακό επίπεδο.

Η αντιστρέψιμη πυκνότητα μπορεί να επιτευχθεί μέσω ακραίας πρόσμιξης ενός n- ή p- υλικού με έγχυση φορέων μειονότητας.

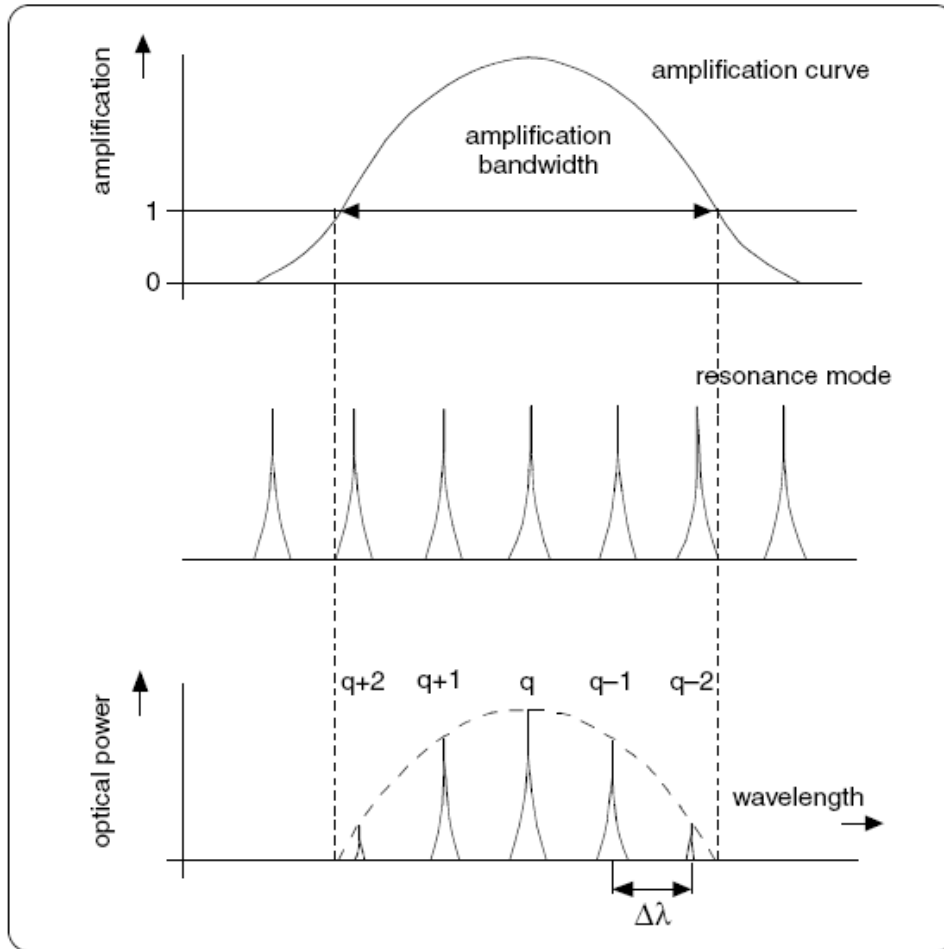
Η εκπομπή γίνεται συνεχής, εξαιτίας μιας επιλέξιμης ανάδρασης που δημιουργείται από έναν οπτικό συντονιστή. Ο οπτικός συντονιστής Fabry-Perot, είναι ένα παράδειγμα οπτικού συντονιστή. Στην **Εικ3.2** μπορείτε να δείτε ότι ένας οπτικός συντονιστής μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τοποθέτηση δύο κατόπτρων.



**Εικ3.2: Fabry-Perot συντονιστής.**

Στάσιμα κύματα μπορούν να δημιουργηθούν για συγκεκριμένα διακριτά μήκη κύματος, λόγω της πολύπλοκης ανάδρασης που προκαλείται από τον οπτικό συντονιστή. Ο ημιαγωγός σε αναστροφή, λειτουργεί ως ενισχυτής. Οι διαχωρισμένες επιστρώσεις του κρυστάλλου, χρησιμοποιούνται ως κάτοπτρα. Αυτό το φαινόμενο της ανάκλασης, οφείλεται στην αλλαγή του δείκτη διάθλασης. Καθώς το φως προσπαθεί να περάσει από το κρύσταλλο στον αέρα, το 30% περίπου της ακτινοβολίας ανακλάται.

Η λειτουργία laser είναι δυνατή στις συχνότητες συντονισμού (διαμήκεις τρόποι) για τις οποίες, η οπτική ενίσχυση υπερβαίνει τις απώλειες εξαιτίας της σύνδεσης και της απορρόφησης (**Εικ.3.3**).<sup>73</sup>



Εικ.3.3: Ενισχυμένες και συντονισμένες συχνότητες στον οπτικό συντονιστή.

### 3.2 Τύποι διοδικών lasers

- **DBR laser**

Ένα laser κατανεμημένου ανακλαστήρα Bragg, είναι ένα laser, όπου ο οπτικός συντονιστής του laser κατασκευάζεται μ' ένα τουλάχιστον κατανεμημένο ανακλαστήρα Bragg (DBR), εξωτερικά του μέσου κέρδους (ενεργός περιοχή). Ένα DBR, είναι ένα κάτοπτρο Bragg, δηλαδή, μια συσκευή αντανάκλασης φωτός (καθρέπτης) βασισμένη στην αντανάκλαση Bragg σε μια περιοδική δομή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο καθρέπτης Bragg είναι μια πλάκα που αντιστοιχεί σ' ένα τέταρτο μήκος κύματος παρέχοντας το μέγιστο ποσό αντανάκλασης, για το δεδομένο πλήθος στρωμάτων.

Τα lasers τύπου DBR, είναι συνήθως διοδικά lasers, αλλά ο όρος επίσης μερικές φορές χρησιμοποιείται για τα lasers ινών που περιέχουν ίνες με διαφράγματα Bragg. Και οι δύο τύποι lasers περιγράφονται παρακάτω.

Τα περισσότερα “συμπαγείς” lasers στερεάς κατάστασης, στην πραγματικότητα επίσης χρησιμοποιούν τους καθρέφτες laser που είναι κάτοπτρα Bragg. Εντούτοις, τέτοια lasers, δεν καλούνται DBR lasers.

Ένα DBR laser είναι διαφορετικό από ένα laser κατανεμημένης ανάδρασης, όπου ολόκληρο το ενεργό υλικό, ενσωματώνεται σε μια ενιαία διανεμημένη δομή ανακλαστήρων.

## **ΔΙΟΔΙΚΑ DBR LASERS**

Ένα διοδικό DBR laser, περιέχει μία δομή αυλακωτού κυματοδηγού (περιοχή διαφράγματος) που συσχετίζει το μήκος κύματος με την ανάδραση και έτσι ορίζει το μήκος κύματος της εκπομπής. Ένα άλλο τμήμα του κυματοδηγού του laser, συμπεριφέρεται ως μέσο ενίσχυσης (ενεργός περιοχή). Η άλλη πλευρά του οπτικού συντονιστή μπορεί να περιλαμβάνει ένα δεύτερο DBR.

Τα διοδικά DBR lasers, συνήθως είναι lasers απλής συχνότητας με έξοδο περιορισμένης διάθλασης και συχνά είναι ρυθμιζόμενου μήκους κύματος (ρυθμιζόμενα lasers). Ο συντονισμός μέσα στην ελεύθερη φασματική σειρά του οπτικού συντονιστή του laser, μπορεί να ολοκληρωθεί με ένα χωριστό τμήμα φάσης, το οποίο μπορεί π.χ. να θερμανθεί ηλεκτρικά. Εάν η θερμοκρασία ολόκληρης της συσκευής διαφοροποιείται, η απόκριση του μήκους κύματος, είναι σημαντικά μικρότερη απ’ ότι για ένα μονοτροπικό διοδικό laser, δεδομένου ότι η περιοχή αντανάκλασης του διαφράγματος μετατοπίζεται λιγότερο από το μέγιστο κέρδους. Μετάβαση λειτουργίας ελεύθερου συντονισμού, πέρα από μια μεγαλύτερη περιοχή μήκους κύματος, είναι δυνατή, με τον συντονισμό συντεταγμένων του διαφράγματος Bragg.

Υπάρχουν περιπλοκότερα σχέδια συσκευών, που εκμεταλλεύονται ένα είδος επίδρασης Vernier με τα διαφράγματα προτύπου (SG-DBR laser), τα οποία προσφέρουν μια περιοχή συντονισμού, χωρίς να αποφεύγουν μεταβάσεις λειτουργίας.

Το πλάτος δέσμης (πλάτος οπτικού φάσματος του laser) ενός διοδικού DBR laser, είναι μερικά MHz. Λόγω του σχετικά μικρού μήκους του οπτικού συντονιστή του laser, είναι μεγαλύτερο απ’ το αντίστοιχο ενός διοδικού laser εξωτερικής κοιλότητας.

Υπάρχουν δομές MOPA όπου ένα πρόσθετο τμήμα ενίσχυσης (ένας οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού) τοποθετείται στο ίδιο ημιαγωγό τσιπ. Με τέτοιες συσκευές, μπορεί να επιτευχθεί ισχύς εξόδου πάνω από 100 MW.

Τα lasers κάθετης επιφανειακής εκπομπής (VCSELs) στην πραγματικότητα, είναι επίσης lasers κατανεμημένου ανακλαστήρα Bragg.

Οι εφαρμογές των διοδικών DBR lasers περιλαμβάνουν τις επικοινωνίες οπτικής ίνας, τις ελεύθερου χώρου οπτικές επικοινωνίες, την ψύξη laser, την οπτική μετρολογία, τους αισθητήρες και την φασματοσκοπία υψηλής ευκρίνειας. Τα DBR lasers ανταγωνίζονται τα διοδικά lasers εξωτερικής κοιλότητας (ECDLs), τα οποία επίσης προσφέρουν απλή συχνότητα εξόδου, ρυθμιζόμενου μήκους κύματος, με την ενδεχομένως καλύτερη απόδοση, όσον αφορά το θόρυβο, αλλά και την απαίτηση μιας σημαντικά πιο σύνθετης οργάνωσης. Τα τσιπ που περιέχουν τις σειρές DBR lasers, μπορούν να χρησιμεύσουν ως πολύ συμπαγείς πηγές για τη χρήση στα συστήματα πολυπλεξίας διαίρεσης μήκους κύματος.

## DBR LASERS ΙΝΑΣ

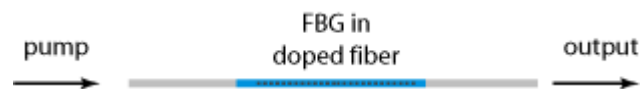


Εικ. 3.4: Μικρού μήκους DBR laser ίνας για εκπομπή περιορισμένου εύρους πλάτος δέσμης.

Ένα DBR laser ίνας συνήθως διαμορφώνει ένα γραμμικό οπτικό ενισχυτή από μια ενεργό ίνα (με πρόσμιξη σπάνιων γαιών), μεταξύ δύο ινών με διάφραγμα Bragg. Συγκρινόμενο μ' ένα DFB laser ίνας, ένα DBR laser ίνας έχει μεγαλύτερο σε μήκος οπτικό ενισχυτή με δυνατότητα μεγαλύτερης ισχύς εξόδου, μεγαλύτερης απόδοσης ισχύος και στενότερου πλάτος δέσμης. Κάτι τέτοιο μπορεί να οδηγήσει στην ελάχιστη δυνατή μονοτροπική λειτουργία (λειτουργία απλής συχνότητας) ή στην πολυτροπική λειτουργία με ένα αντίστοιχα πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης εκπομπής. Τα DBR lasers ίνας απλής συχνότητας προσφέρουν παρόμοια ισχύς εξόδου με τα διοδικά DBR lasers: δεκάδες mW ή μερικές φορές > 100 mW. Τα πρότυπα σχέδια διαφραγμάτων όπως περιγράφονται στην παράγραφο των διοδικών DBR lasers μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στα DBR lasers ίνας. Η επιτεύξιμη περιοχή συντονισμού μπορεί πάλι να έχει ένα πλάτος δεκάδων nm.<sup>80</sup>

- **DFB laser**

Ένα laser κατανεμημένης ανατροφοδότησης, είναι ένα laser όπου ολόκληρος ο οπτικός συντονιστής αποτελείται από μία περιοδική δομή που λειτουργεί σαν ένας κατανεμημένος ανακλαστήρας στη περιοχή του μήκους κύματος λειτουργίας του laser. Έχει πολλούς αξονικούς τρόπους ταλάντωσης, αλλά τυπικά μόνο ένας τρόπος ευνοείται εξαιτίας των απωλειών. Συχνά, είναι δυνατή η επίτευξη της λειτουργίας απλής συχνότητας, ασχέτως με τη χωρική επανασύνδεση. Λόγω της μεγάλης ελεύθερης περιοχής φάσματος, ο συντονισμός μήκους κύματος χωρίς μεταβάσεις λειτουργίας είναι πιθανός σε περιοχή πάνω από αρκετά nm. Ωστόσο η περιοχή συντονισμού μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλη για ένα laser με ανακλαστήρα κατανομής Bragg.



**Εικ.3.5: DFB laser με ίνα, περιέχοντας ίνα με διάφραγμα Bragg.**

Τα περισσότερα laser κατανεμημένης ανάδρασης που είναι είτε laser ίνας είτε διοδικά laser, λειτουργούν με ένα τρόπο ταλάντωσης, δηλαδή με τη μέθοδο του αντηχείου (λειτουργία απλής συχνότητας). Σε περίπτωση laser ίνας, η κατανεμημένη ανάκλαση εμφανίζεται σε ίνα με διάφραγμα Bragg. Αυτό το είδος laser με ίνα ενιαίας συχνότητας είναι πολύ απλό και συμπαγές.

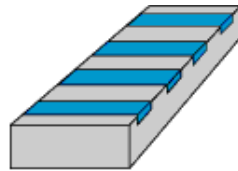
Τα διοδικά laser DFB μπορούν να παραχθούν με δομή ενιαίου διαφράγματος, π.χ. συζευγμένος κυματοδηγός. Τέτοιες συσκευές είναι διαθέσιμες σε μια ευρεία περιοχή φάσματος, τουλάχιστον μεταξύ 0,8μm και 2,8μm. Τυπικές ισχείς εξόδου είναι μερικών δεκάδων mW. Το γραμμικό εύρος τυπικά είναι μερικών εκατοντάδων MHz και ο συντονισμός μήκους κύματος είναι συχνά άνω αρκετών nm. Οι θερμοκρασιακά σταθεροποιημένες συσκευές όπως χρησιμοποιούνται π.χ. στα DWDM συστήματα μπορούν να εμφανίσουν μεγάλη σταθερότητα μήκους κύματος.

Τα DFB lasers δεν πρέπει να συγχέονται με τα DBR lasers.<sup>80</sup>

- **Diode arrays (bars)**

Οι διοδικές ράβδοι, είναι lasers ημιαγωγών (διοδικά lasers) υψηλής ισχύος που περιέχουν μια μονοδιάστατη διάταξη ευρείας περιοχής εκπομπών.

Τυπικά, περιέχουν μεταξύ 20 και 50 εκπομπούς, που ο καθένας είναι π.χ. 100 μm φαρδύς. Μια χαρακτηριστική εμπορική συσκευή όπου περιλαμβάνει έναν οπτικό συντονιστή laser, μήκους της τάξης του 1 mm, είναι 10 mm φαρδύς, παράγει δεκάδες Watts ισχύς εξόδου. Μερικά πρωτότυπα φθάνουν ακόμη και στις εκατοντάδες των Watts (ενδεχομένως, με μειωμένη διάρκεια ζωής). Μέσα στα τελευταία 20 έτη, η απόδοση ανά Watt έχει πέσει σχεδόν κατά δύο τάξεις μεγεθών, ενώ συγχρόνως η φωτεινότητα έχει βελτιωθεί πολύ σημαντικά.



**Εικ.3.6: Τσιπ ημιαγωγών μιας ράβδου διοδικού laser.**

Οι περισσότερες διοδικές ράβδοι που λειτουργούν στην περιοχή μήκους κύματος από 780 nm σε 860 nm ή μεταξύ 940 nm και 980 nm, με μήκος κύματος 808 nm (για lasers άντλησης νεοδυμίου) και 940 nm (για άντληση Yb:YAG) είναι περισσότερο σημαντικές. Ένα άλλο σημαντικό μήκος κύματος είναι από 975 σε 980 nm για άντληση προσμιγνυομένου ερβίου ή lasers ίνας υψηλής ισχύος προσμιγνυομένου υπερερβίου ή ενισχυτές.



**Εικ.3.7: Διοδική ράβδος με ενεργή ψύξη.**

Μια μη ιδανική ιδιότητα των διοδικών ράβδων είναι η χωρική μορφή της εκπομπής τους. Στην κάθετη κατεύθυνση, στις **Εικ.3.6** και **Εικ.3.7**, η εκπομπή προέρχεται από μια πολύ στενή περιοχή, έτσι ώστε η ποιότητα της δέσμης να μην είναι πολύ μακριά από το περιορισμό διάθλασης (συντελεστής  $M^2$ , όχι πολύ πάνω από 1) παρά την μεγάλη γωνία απόκλισης, τυπικά  $30^0 - 40^0$  FWHM (πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο). Ωστόσο, η οριζόντια κατεύθυνση στις **Εικ.3.6** και **Εικ.3.7** έχει αρκετά μεγάλη περιοχή εκπομπής. Έτσι, παρόλο τη μικρότερη γωνία απόκλισης (τάξης από  $6^0$  σε  $10^0$ ), η ποιότητα δέσμης είναι πολύ μικρή με τον συντελεστή  $M^2 > 1000$ .

Επομένως, απαιτούνται συχνά σημαντικές προσπάθειες για τη διαμόρφωση της εξόδου μίας διοδικής ράβδου (ή πολλαπλών ράβδων υπό τη μορφή διοδικής στοιβάδας).

Μία ενδεχομένως ενοχλητική ιδιότητα των διοδικών ράβδων, είναι το “χαμόγελο”- μια μικρή καμπύλη της οριζόντιας γραμμής, που συνδέει τους εκπομπούς. Το φαινόμενο αυτό, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη δυνατότητα εστίασης δεσμών από τις διοδικές ράβδους. Υπάρχουν μερικές προηγμένες διατάξεις ρύθμισης δέσμης, όπου το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζεται στις ατομικές διοδικές ράβδους.

Η χρήση των διοδικών διατάξεων είναι προτιμότερη ως προς την επιλογή ευρέων ενιαίων εκπομπών, διότι στους τελευταίους θα εμφανιζόταν αυθόρμητη ενισχυμένη εκπομπή ή παρασιτική λειτουργία laser στην εγκάρσια κατεύθυνση. Οι διοδικές διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ένα πιο σταθερό προφίλ λειτουργίας περιέχοντας έναν “απελευθερωτή δέσμης” από κάθε εκπομπό. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που αξιοποιούν κάποιο βαθμό συνοχικής σύζευξης γειτονικών εκπομπών, οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα δέσμης. Σ’ αυτές τις τεχνικές περιλαμβάνονται αυτές που εφαρμόζονται άμεσα στη δημιουργία διοδικών ράβδων και άλλες, που περιλαμβάνουν επιφανειακές κοιλότητες. Οι περισσότερες διοδικές ράβδοι ωστόσο, χρησιμοποιούνται χωρίς την αντίστοιχη τεχνική.

Να σημειωθεί, ότι η γεωμετρική διάταξη καθιστά τις διοδικές ράβδους, ιδιαίτερα κατάλληλες για μεθόδους συνοχικού ή φασματικού συνδυασμού δεσμών, με πολύ καλύτερη ποιότητα δέσμης.



### **Αποδοτικότητα ισχύος**

Ηλεκτρικά, οι διαφορετικοί εκπομποί συνδέονται όλοι παράλληλα. Αυτό σημαίνει ότι το συνολικό ρεύμα οδήγησης είναι αρκετά σημαντικό, της τάξης δεκάδων ή ακόμα εκατοντάδων Amperes. Ένας εκπομπός λαμβάνει κατά προσέγγιση 1 W οπτικής ισχύς εξόδου για 1 A ρεύματος. Σε συνδυασμό με τη συνήθη πτώση τάσης ( $\approx 2$  V), αυτό οδηγεί σε μία αποδοτικότητα ισχύος της τάξης του 50%. Κρίσιμα τεχνολογικά ζητήματα αποτελούν, η μείωση της τάσης λειτουργίας με τη βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών επαφών και των δομών στρώματος, η επιπρόσθετη μείωση της θερμικής σύνθετης αντίστασης και η βελτιστοποίηση των μεθόδων για την παθητικότητα ανακλαστικής έδρας, επιτρέποντας αποτελεσματικά μεγαλύτερες οπτικές εντάσεις χωρίς το κίνδυνο καταστροφικής ζημιάς. Η βελτιωμένη αποδοτικότητα ισχύος μειώνει τις συνολικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος καθώς και τις απαιτήσεις για το σύστημα ψύξης, επιτρέποντας συνήθως την υψηλή φωτεινότητα.

### **Διάρκεια ζωής**

Σε ιδανικές συνθήκες, οι διοδικές ράβδοι μπορεί να έχουν πολλές χιλιάδες ώρες διάρκεια ζωής. Ωστόσο, οι συσκευές καταστρέφονται συχνά πολύ πριν να επιτευχθεί η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής. Αυτό δεν είναι απαραίτητα μια συνέπεια ελαττωματικής παραγωγής ή αρχικού σχεδιασμού, αλλά μπορεί να προκληθεί από ποικίλους παράγοντες έξω από τον έλεγχο του κατασκευαστή, όπως οι ξαφνικές αιχμές τάσης, που προκαλούνται από έναν ελαττωματικό ή κακοσχεδιασμένο οδηγό διοδικού laser (συχνά κατά τη διάρκεια της μεταστροφής της συσκευής από τη θέση on στη θέση off), ή από την λειτουργία σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, η οποία μπορεί να προκληθεί από πολύ μεγάλο ρεύμα οδήγησης ή από την ανεπάρκεια ψύξης. Η υδρόψυξη συνήθως είναι αρκετά αποδοτική, αλλά η αποτελεσματικότητά της μπορεί έντονα να διαφοροποιηθεί με τη διάβρωση, η οποία μπορεί να εμφανιστεί όταν για παράδειγμα δεν ανταποκρίνονται οι προδιαγραφές για τη χημική υπόσταση του νερού ψύξης (συγκεκριμένα, το περιεχόμενό του σε ιόντα). Ωστόσο, πολύ ισχυρή ψύξη μπορεί να προκαλέσει προβλήματα μέσω της συμπύκνωσης, όπου είναι πιθανή η εμφάνιση υγρασίας. Προφανώς, λοιπόν, ολόκληρο το σύστημα διοδικού laser πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα, προκειμένου να εκμεταλλευθεί η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των ράβδων.

## Εύρος ζώνης εκπομπής

Το εύρος ζώνης εκπομπής μίας διοδικής ράβδου, ανέρχεται σε αρκετά nm τα οποία μπορούν να είναι περισσότερο από επιθυμητό για την άντληση ενός laser στερεάς κατάστασης. Επιπροσθέτως, υπάρχει μία ανοχή αρκετών nm για το κεντρικό μήκος κύματος. Ένα μειωμένο εύρος ζώνης ανοχής και εκπομπής μήκους κύματος, μπορεί να επιτευχθεί με οπτική ανατροφοδότηση. Το εύρος ζώνης και το συγκεκριμένο κεντρικό μήκος κύματος μπορούν επίσης να είναι σημαντικά, για το φασματικό συνδυασμό ακτινών.

## Εφαρμογές των διοδικών ράβδων

Οι διοδικές ράβδοι υψηλής ισχύος χρησιμοποιούνται για παράδειγμα στην επεξεργασία υλικού (π.χ. συγκόλληση και ορισμένες επεξεργασίες επιφάνειας), σε ιατρικές εφαρμογές (π.χ. φωτοδυναμική θεραπεία, αφαίρεση τατουάζ, χειρουργείο με laser), ή για laser άντλησης στερεάς κατάστασης μεγάλης ισχύος “συμπαγείς” lasers ή lasers ίνας. Οι διοδικές ράβδοι επίσης, αναπτύσσονται περαιτέρω για στρατιωτική χρήση ως όπλα lasers, πεδίων μαχών.

Για μεγάλη ισχύ (κατά προσέγγιση πάνω από 100 W), μία εφαρμογή αποτελούν οι διοδικές στοιβάδες, οι οποίες είναι ουσιαστικά διαφορετικές διοδικές ράβδοι, συσσωρευμένες στην κάθετη κατεύθυνση.<sup>80</sup>

### • DPSS laser

Τα περισσότερα διοδικά lasers άντλησης, είναι lasers στερεάς κατάστασης<sup>1</sup>. Αυτά είναι είτε “συμπαγή” laser, που χρησιμοποιούν κάποιο είδος κρυστάλλου laser (κρύσταλλο νεοδυμίου προσμιγνυόμενο με YAG), είτε “συμπαγές” κομμάτι του γυαλιού, για παράδειγμα, ένα ρουμπίνι, είτε lasers ινών (αν και ο όρος DPSSL είναι λιγότερο κοινός για τα lasers ινών). Και οι δύο κατηγορίες αναπτύσσουν μια περιοχή της ισχύος εξόδου από μερικά mW σε πολλαπλάσια kW (υψηλής ισχύος lasers).

Λιγότερο κοινά είναι τα lasers ημιαγωγών οπτικής άντλησης (ιδιαίτερα τα VECSELS), ενώ υπάρχουν και μερικοί σχετικά εντυπωσιακοί τύποι διοδικών lasers άντλησης αερίου, π.χ. αλκαλικά lasers ατμού.

---

<sup>1</sup> Έχουν σαν ενεργό υλικό μονωτικά υλικά στα οποία έχουν εμφυτευθεί ιόντα άλλων στοιχείων και η αναστροφή πληθυσμών γίνεται κυρίως με οπτική άντληση.

## Τύποι διοδικών lasers για τη διοδική άντληση.

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι διοδικών lasers που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άντληση διόδου:

- Τα lasers χαμηλής ισχύος (μέχρι 200 mW κατά προσέγγιση) μπορούν ν' αντληθούν με διοδικά lasers εκπομπής ακμής. Αυτά, παρουσιάζουν μια διάθλαση περιορισμένης ποιότητας δέσμης και το καθιστούν αρκετά εύκολο να επιτύχουν το ίδιο πράγμα για τα lasers στερεάς κατάστασης.
- Τα διοδικά lasers ευρείας περιοχής, τυπικά παράγουν αρκετά Watts και είναι κατάλληλα για άντληση lasers στερεάς κατάστασης με ισχύ εξόδου μέχρι μερικών Watts. Η ποιότητα της δέσμης τους είναι αρκετά ασύμμετρη, αλλά συνήθως παρ' όλα αυτά επαρκής για την επίτευξη περιορισμένης διάθλασης εξόδου laser, χωρίς τη χρησιμοποίηση πολύπλοκων οπτικών.
- Διοδικές ράβδοι υψηλής ισχύος εκπέμπουν δεκάδες Watts (ή ακόμα > 100 W), επιτρέποντας μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, συγκεκριμένα όταν συνδυάζονται αρκετές ράβδοι. Η ποιότητα δέσμης τους, είναι έντονα ασύμμετρη και αρκετά φτωχή, έτσι ώστε η φωτεινότητά τους (πυκνότητα ροής ακτινοβολίας) είναι χαμηλότερη απ' αυτή των διόδων χαμηλότερης ισχύος. Οι διάφοροι τύποι διαμορφωτών δέσμης, χρησιμοποιούνται συχνά για να συμμετρικοποιήσουν την ποιότητα δέσμης. Αυτό, το καθιστά ευκολότερο, είτε για ν' αντληθεί ένα "συμπαγές" laser, είτε για να συνδεθεί το φως με ίνα.
- Για μεγαλύτερη ισχύ, συχνά χρησιμοποιούνται διοδικές στοιβάδες. Αυτές ωστόσο, έχουν χειρότερη ποιότητα δέσμης και χαμηλότερη φωτεινότητα., αλλά μπορούν να παρέχουν πολλαπλάσια των kilowatts.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι δίοδοι άντλησης χρησιμοποιούνται συνεχώς. Αυτό ισχύει για όλα τα συνεχόμενου μήκους (απλής ακτινοβολία) και lasers εγκλειδωσης ρυθμών και επίσης σε πολλά lasers μεταγωγής-Q.

Ανάλογα με το τύπο διοδικού laser, χρησιμοποιούνται διαφορετικά είδη παλμικών οπτικών. Είναι επίσης πιθανό να χρησιμοποιηθούν διοδικά lasers συνδεδεμένα με ίνα που κάνει εφικτό το διαχωρισμό της πραγματικής κεφαλής του laser, από άλλο "πακέτο" περιέχοντας τις διόδους άντλησης, έτσι ώστε η κεφαλή του laser να μπορεί να γίνει πολύ συμπαγής.

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΟΔΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των διόδων άντλησης είναι:

- Ένας υψηλός βαθμός απόδοσης μετατροπής της ηλεκτρικής σε οπτική ισχύ της πηγής άντλησης (τάξης του 50 %) οδηγεί σε υψηλό βαθμό απόδοσης ισχύος του laser. Κατά συνέπεια, απαιτούνται μικρές προμήθειες ισχύος, ενώ η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και οι απαιτήσεις ψύξης μειώνονται δραστικά, συγκρίνοντας με αντίστοιχες των lasers άντλησης με λαμπτήρα<sup>2</sup>.
- Το περιορισμένο οπτικό εύρος ζώνης των διοδικών lasers, καθιστά πιθανή την άμεση άντληση συγκεκριμένων μεταπτώσεων των ενεργών ιόντων των lasers, χωρίς την απώλεια ισχύος στις άλλες ζώνες φάσματος. Κατά συνέπεια, συνεισφέρει επίσης σ' έναν υψηλότερο βαθμό απόδοσης.
- Αν και η ποιότητα της δέσμης των διοδικών lasers υψηλής ισχύος δεν είναι τέλεια, επιτρέπεται η λειτουργία τους έτσι ώστε να δημιουργούν καλή ποιότητα δέσμης και με μεγάλο βαθμό απόδοσης. Στη περιοχή των lasers πλάκας λεπτού πάχους επιτρέπεται η άντληση σε αντίθεση με την επιφανειακή άντληση που επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.
- Διοδικά lasers άντλησης χαμηλής ισχύος μπορούν να αντληθούν με διοδικά lasers περιορισμένης διάθλασης. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή laser χαμηλής ισχύος με λογικό βαθμό απόδοσης ισχύος.
- Η διάρκεια ζωής των διοδικών lasers είναι μεγάλη συγκρινόμενη μ' αυτή των λαμπτήρων εκκένωσης. Τυπικά είναι πολλές χιλιάδες ώρες και συχνά πάνω από 10.000 ώρες. Ωστόσο, διαφορετικοί παράγοντες μπορούν να οδηγήσουν σε δραστική μείωση της διάρκειας ζωής. Επίσης, η αντικατάσταση διοδικών lasers κοστίζει περισσότερο απ' αυτή των λαμπτήρων εκκένωσης.
- Η πυκνότητα της πηγής άντλησης, η ισχύς τροφοδοσίας και η διάταξη ψύξης, καθιστά το σύστημα του laser μικρότερο και πιο εύχρηστο.
- Η χαμηλή ένταση θορύβου των διοδικών lasers, οδηγεί σε χαμηλό θόρυβο των αντλημένων διοδικών lasers.

---

<sup>2</sup> Lasers που αντλούνται με τους λαμπτήρες λάμψης ή τους λαμπτήρες τόξων, ή σε σπάνιες περιπτώσεις με τους λαμπτήρες αλογόνου βολφραμίου.

## Επιτεύγματα

Οι πρόοδοι των διόδων άντλησης έχουν οδηγήσει σε καταπληκτικά επιτεύγματα.

Μερικά παραδείγματα είναι:

- Υπάρχουν μικροσκοπικά lasers στερεάς κατάστασης με άριστη επάρκεια ποιότητα δέσμης, καθαρότητα φάσματος, και σταθερότητα. Μερικά από αυτά, μπορούν να τροφοδοτηθούν ακόμα και με μπαταρίες.
- Τα διοδικά lasers άντλησης στερεάς κατάστασης μπορούν να αποδώσουν ισχύ εξόδου μερικών KW, με σχετικά καλής ποιότητας δέσμη. Αυτό εφαρμόζεται συγκεκριμένα στα lasers λεπτών δίσκων, αλλά επίσης και σε lasers ίνας υψηλής ισχύος και σε ενισχυτές.
- Επίσης, είναι απαραίτητη η διοδική άντληση για μεγάλης ποικιλίας mode-locked (εγκλειδωσης ρυθμών) lasers καθώς παράγεται ισχύς π.χ. μέση ισχύς εξόδου άνω των 80 W, για παλμούς κάτω των picoseconds .

## Περιορισμοί

Στην αρχή των διόδων άντλησης, οι επιτεύξιμες ισχείς εξόδου ήταν πολύ περιορισμένες και μικρότερες από αυτές των lasers με λαμπτήρων άντλησης. Στο μεταξύ όμως διοδικές ράβδοι και διοδικές στοιβάδες υψηλής ισχύος έχουν γίνει πολύ ισχυρές, και οι υψηλότερες ισχείς εξόδου επιτυγχάνονται πλέον με τις διόδους άντλησης.

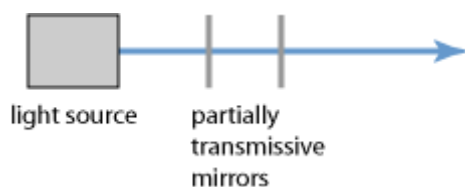
Το κυριότερο μειονέκτημα των διόδων άντλησης, συγκρινόμενες με τους λαμπτήρες άντλησης, είναι το σημαντικά υψηλότερο κόστος ανά Watt αντλούμενης ισχύος. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ακόμα λαμπτήρας άντλησης σε περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλές συχνότητες. Για παράδειγμα, lasers Nd:YAG μεταγωγής-Q με λαμπτήρα άντλησης χρησιμοποιούνται αρκετά ακόμα για επισήμανση με laser και δεν προβλέπεται να αντικατασταθούν σύντομα από τα διοδικά lasers άντλησης.

Τα διοδικά lasers είναι ηλεκτρικά λιγότερο αξιόπιστα από τους λαμπτήρες εκκένωσης. Μπορούν να καταστραφούν γρήγορα από υπερβολικά ρεύματα οδήγησης ή από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις. Σε συνδυασμό με τα κατάλληλα σχεδιασμένα ηλεκτρονικά, αποφεύγονται τέτοιες περιπτώσεις.<sup>80</sup>

- **Fabry-Perot laser diode**

Ένα διοδικό laser Fabry-Perot, είναι ένας ταλαντωτής στον οποίο δύο κάτοπτρα χωρίζονται από ένα μέσο ενίσχυσης με αναστρεφόμενο πληθυσμό, δημιουργώντας μια κοιλότητα Fabry-Perot. Τα τυποποιημένα διοδικά laser, είναι τα Fabry-Perot lasers. Τα διοδικά lasers Fabry-Perot, είναι ο συνηθέστερος τύπος διοδικών lasers. Τα laser αυτά είναι τα οικονομικότερα, αλλά επίσης είναι και πιο αργά και πιο θορυβώδη από τα DFB.

Ένα συμβολόμετρο Fabry-Perot<sup>3</sup> είναι ένας γραμμικός ενισχυτής (ή κοιλότητα) που αποτελείται από δύο κάτοπτρα υψηλής ανάκλασης (100% το ένα και >95% το άλλο) με κάποια μικρή διαπερατότητα και χρησιμοποιούνται συχνά ως φασματόμετρο υψηλής ευκρίνειας. Αυτό αξιοποιεί το γεγονός ότι η μετάδοση μέσω ενός τέτοιου αντηχείου εμφανίζει αντηχήσεις (**Εικ. 3.8**).



**Εικ.3.8: Συμβολόμετρο Fabry-Perot.**

Ένα συμβολόμετρο Fabry-Perot αποτελείται εξ ορισμού από δύο επίπεδα κάτοπτρα αλλά ο όρος πολύ συχνά χρησιμοποιείται για τ' αντηχεία με κυρτά κάτοπτρα. Από θεωρητικής άποψης, τα επίπεδα οπτικά αντηχεία είναι ειδικού τύπου μιας και επεκτείνονται μέχρι τις επιφάνειες των κατόπτρων, ενώ υφίστανται απώλειες διάθλασης. Ωστόσο, τα συμβολόμετρα Fabry-Perot χρησιμοποιούνται συνήθως με δέσμες εισόδου με πολύ μικρότερη διάμετρο, που στη πραγματικότητα δεν ταιριάζουν με τους τρόπους των αντηχείων. Για μικρά διαστήματα μεταξύ κατόπτρων, όπου η διάθλαση μέσα σε ολοκληρωμένο πέρασμα είναι μάλλον αδύναμη, η απόκλιση αυτή δεν είναι πολύ σημαντική.

Οι συχνότητες αντήχησης συχνά μπορούν να συντονιστούν με την αλλαγή του μήκους κοιλότητας (απόσταση κατόπτρων) μ' έναν πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή. Όταν η τάση που εφαρμόζεται στον πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή, μεταβάλλεται περιοδικά, π.χ. με μία τριγωνική χρονική μορφή και η μεταφερόμενη ισχύς έναντι του χρόνου παρακολουθείται από έναν φωτοανιχνευτή και έναν παλμογράφο, τα

<sup>3</sup> Στην πραγματικότητα το συμβολόμετρο Fabry-Perot, ονομάζεται επίσης οπτικός ενισχυτής ή οπτικό αντηχείο Fabry-Perot ή Fabry-Perot κοιλότητα.

τελευταία μπορούν να επιδείξουν το οπτικό φάσμα του προσπίπτοντος φωτός υπό την προϋπόθεση ότι το πλάτος φάσματος είναι μικρότερο από την ελεύθερη φασματική περιοχή.<sup>80</sup>

- **Fiber coupled laser**

Σε πολλές περιπτώσεις, είναι κατάλληλο να συνδεθεί η έξοδος ενός διοδικού laser σε μια οπτική ίνα, προκειμένου να παραδοθεί το φως στο σημείο όπου απαιτείται. Η προσέγγιση αυτή, έχει αρκετά πλεονεκτήματα:

1. Το φως που βγαίνει από την ίνα, έχει μια κυκλική και ομαλή (ομογενοποιημένη) κάθετη ένταση και μια συμμετρική ποιότητα δεσμών, η οποία είναι σε πολλές περιπτώσεις αρκετά κατάλληλη. Για παράδειγμα, απαιτούνται λιγότερο πολύπλοκα οπτικά για την παραγωγή ενός κυκλικού “σημείου” άντλησης για ένα laser στερεάς κατάστασης άντλησης άκρης (διαμήκης άντληση).
2. Είναι δυνατό να αφαιρεθούν τα διοδικά lasers μαζί με τις ρυθμίσεις ψύξης τους, αφήνοντας περισσότερο χώρο.
3. Τα ελαττωματικά διοδικά lasers που είναι συνδεδεμένα με ίνα, μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν χωρίς αλλαγή της ευθυγράμμισης της συσκευής όπου το φως χρησιμοποιείται.



**Εικ.3.9: Διοδικών lasers συζευγμένα με ίνα.**

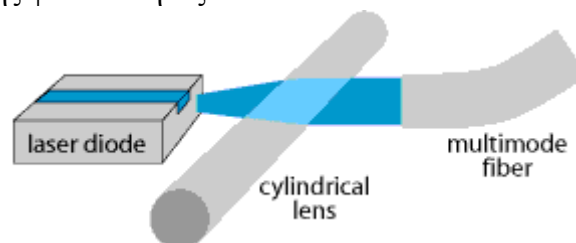
### Είδη συζευγμένων διοδικών lasers με ίνα.

Πολλά διοδικά lasers πωλούνται για το λόγο αυτό σε μορφή συζευγμένης ίνας, με τη σύζευξη ίνας να δημιουργείται μέσα στη συσκευασία laser. Οι χρησιμοποιημένες ίνες και οι τεχνικές διαφέρουν για διαφορετικά διοδικά lasers.

Η απλούστερη περίπτωση είναι ενός VCSEL (laser κοιλότητας με κάθετη επιφανειακή εκπομπή), το οποίο εκπέμπει δέσμη υψηλής ποιότητας, μέτρια απόκλιση δέσμης, καθόλου αστιγματισμό (ατελής εστίαση) και ένα έντονα κυκλικό περίγραμμα. Ένας απλός σφαιρικός φακός είναι ικανοποιητικός για την απεικόνιση του εκπεμπόμενου “σημείου” στο πυρήνα μίας μονοτροπικής ίνας. Η αποδοτικότητα της σύζευξης μπορεί να είναι της τάξης του 70 – 80%. Είναι επίσης δυνατό να συνδεθεί άμεσα (σύζευξη “butt”) η ίνα με την επιφάνεια εκπομπής του VCSEL.

Τα μικρά διοδικά lasers επιφανειακής εκπομπής επιτρέπουν ικανή σύζευξη με μονοτροπική ίνα. Ωστόσο, η αποδοτικότητα σύνδεσης μπορεί να υποβιβαστεί σημαντικά από την ελλειπτικότητα της δέσμης, εάν χρησιμοποιείται ένας απλός σφαιρικός φακός. Επίσης, η απόκλιση δέσμης είναι σχετικά υψηλή, απαιτώντας ένα φακό με αρκετά μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα. Ένα άλλο πρόβλημα, είναι ο αστιγματισμός της εξόδου της διόδου, ιδιαίτερα για τις διόδους με καθοδήγηση κέρδους. Αυτό μπορεί ν’ αντισταθμιστεί μ’ έναν πρόσθετο ασθενή κυλινδρικό φακό. Με ισχύ εξόδου μέχρι μερικών εκατοντάδων milliwatts διοδικά lasers οδήγησης κέρδους συνδεδεμένα με ίνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν π.χ. για ενισχυτές ίνας άντλησης, προσμιγνυόμενοι με έρβιο.

Διοδικά lasers ευρείας περιοχής είναι πολυτροπικά ως προς το χώρο στην οριζόντια διεύθυνση του εκπομπού. Εάν η κυκλική δέσμη σχηματίζεται με κυλινδρικό φακό (Εικ.3.10) και έπειτα προωθείται σε μία πολυτροπική ίνα, θα χαθεί σημαντικό τμήμα της φωτεινότητάς του.



Εικ.3.10: Διοδικό laser ευρείας περιοχής συνδεδεμένο με ίνα.

Μία βελτιωμένη τεχνική για τα lasers ευρείας περιοχής, είναι βασισμένη στην αναδιαμόρφωση της δέσμης για να γίνει συμμετρική η ποιότητα δέσμης (και όχι μόνο



η ακτίνα δέσμης) πριν την προώθηση. Αυτό μπορεί να γίνει με διαμορφωτή δέσμης δύο κατόπτρων ή με μερικά μικρό-οπτικά στοιχεία.

Στις διοδικές ράβδους το πρόβλημα της ασύμμετρης ποιότητας δέσμης είναι εντονότερο. Οι έξοδοι των μεμονωμένων εκπομπών μπορούν να συνδεθούν σε ξεχωριστές ίνες μίας δεσμίδας ινών. Εναλλακτικά, κάποιο είδος διαμορφωτή δέσμης για την συμμετρική διαμόρφωση της ποιότητας δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί πριν προωθηθεί σε μία μόνο πολυτροπική ίνα.

Για διοδικές στοιβάδες, χρησιμοποιούνται ίνες με πυρήνα μεγαλύτερης διαμέτρου.

### **Μειονεκτήματα της σύνδεσης με ίνα**

Μερικά πιθανά μειονεκτήματα των διοδικών lasers που συνδέονται με ίνες, έναντι των lasers εκπομπής ελεύθερου χώρου, είναι:

- Μεγαλύτερο κόστος
- Μείωση της ισχύος εξόδου, ανάλογη με την τεχνική σύνδεσης ίνας και το είδος της ίνας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να μην έχει σημασία, αλλά σε άλλες περιπτώσεις εμφανίζει σημαντικές αλλαγές π.χ. για τη σχεδίαση ενός “συμπαγές” διοδικού laser άντλησης ή ενός laser ίνας υψηλής ισχύος.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις (ιδιαίτερα με τις πολυτροπικές ίνες) η ίνα δεν βοηθά στην διατήρηση πόλωσης. Η έξοδος της ίνας πολώνεται μερικώς και η κατάσταση πόλωσης μεταβάλλεται όταν μεταφέρεται η ίνα ή όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία της. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ουσιαστικά, προβλήματα σταθερότητας των lasers στερεάς κατάστασης όταν η αντλία απορρόφησης εξαρτάται από τη πόλωση (όπως π.χ. στα Nd:YVO<sub>4</sub>).

### **Ποιότητα δέσμης στην έξοδο της ίνας.**

Η ποιότητα δέσμης της εξόδου της ίνας, δεν διευκρινίζεται συχνά απ’ τον κατασκευαστή. Σε πολλές περιπτώσεις μόνο η διάμετρος του πυρήνα της ίνας και το αριθμητικό άνοιγμα είναι γνωστά και υποτίθεται μία πολυτροπική ίνα βηματικού κέρδους. Δεν υπάρχει κάποιος τύπος για τον υπολογισμό της ακριβούς ποιότητας της ακτίνας στην περίπτωση αυτή, επειδή εξαρτάται από τη κατανομή της οπτικής ισχύς στους τρόπους της ίνας και η κατανομή αυτή εξαρτάται από τις συνθήκες προώθησης. Ωστόσο, ο συντελεστής της ποιότητας δέσμης  $M^2$ , μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση υποθέτοντας ότι η ισχύς κατανέμεται καλά πάνω

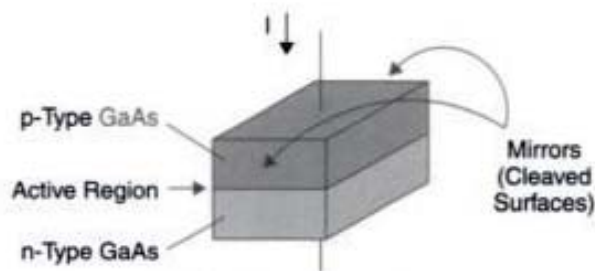
στους τρόπους έτσι ώστε το αριθμητικό διάφραγμα να αντιπροσωπεύει μία λογική εκτίμηση για την πραγματική απόκλιση δέσμης. Αυτό, οδηγεί στον τύπο:

$$M^2 \approx \frac{\pi a}{\lambda} NA$$

όπου  $a$  είναι η ακτίνα του πυρήνα της ίνας.<sup>80</sup>

- **Διοδικά laser ομοεπαφής (homojunction)**

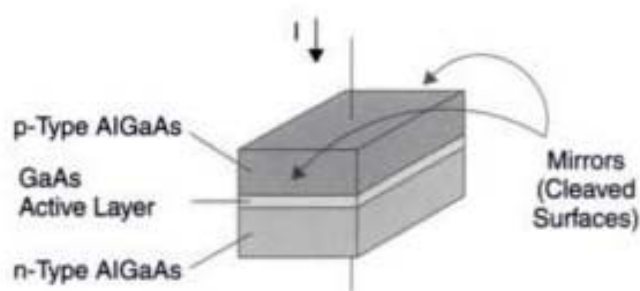
Η απλούστερη (και παλαιότερη) δομή ενός διοδικού laser, είναι το διοδικό laser ομοεπαφής, το οποίο χρησιμοποιεί μία απλή επαφή. Παράγεται από μία απλή επαφή μεταξύ δύο άμεσων υλικών με ενεργειακό χάσμα, ενός p-τύπου και ενός n-τύπου, το οποίο καλείται ομοεπαφή, δεδομένου ότι και τα δύο υλικά είναι ίδιου τύπου. Το φως εκπέμπεται από τις επανασυνδέσεις ζευγών ηλεκτρονίων-οπών, στη λεπτή ενεργό περιοχή που διαμορφώνεται από τη σύνδεση των δύο υλικών (περιοχή εξάντλησης). Συνήθως, χρησιμοποιείται το αρσενίδιο γαλλίου (GaAs) και σε κάθε μέρος της συσκευής προσμιγνύεται ελαφρώς διαφορετικά: ένα μέρος με ένα δότη ηλεκτρονίων και ένα μέρος με έναν αποδέκτη ηλεκτρονίων. Οι καθρέφτες για την κοιλότητα του laser κατασκευάζονται με σκοπό να διασπάσουν κάθετα τον άξονα του laser. Βελτίωση της απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή ενός ενιαίου διηλεκτρικού καθρέφτη, που αποτελείται από εναλλασσόμενα παχιά στρώματα ενός τετάρτου-μήκος κύματος από υλικά με χαμηλό και υψηλό δείκτη διάθλασης. Οι βελτιωμένοι καθρέφτες χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα διοδικά lasers. Ένα διάγραμμα μιας απλής δομής ομοεπαφής, παρουσιάζεται στην **Εικ.3.11**. Τα lasers ομοεπαφής χαρακτηρίζονται από τα μεγάλα ρεύματα κατώτατων ορίων με μια χαρακτηριστική συσκευή που απαιτεί δεκάδες Amperes για να λειτουργήσει. Τέτοια ρεύματα απαγορεύουν τη συνεχή λειτουργία στη θερμοκρασία δωματίου. Κατά συνέπεια συσκευές ομοεπαφής με συνεχή λειτουργία, απαιτούν κρυογόνο ψύξη, καθιστώντας τις μη πρακτικές για πολλές εφαρμογές.<sup>IV</sup>



**Εικ.3.11: Δομή laser ομοεπαφής.**

- **Διοδικά laser ετεροεπαφής (heterojunction)**

Οι βελτιώσεις στη δομή του laser μπορούν να γίνουν με τον περιορισμό της ακτίνας εσωτερικής κοιλότητας σε μια διηλεκτρική δομή κυματοδηγού που διαμορφώνεται από το ίδιο το υλικό ημιαγωγού. Μια τέτοια δομή απαιτεί δύο διεπαφές διαφορετικών δείκτων διάθλασης, μια στην κορυφή και μια κάτω από την ενεργό περιοχή, διαμορφώνοντας έτσι δύο επαφές σε ένα διοδικό laser ετεροδομής, ή σε μια διπλή ετεροδομή, δεδομένου ότι υπάρχουν δύο περιορισμένες διεπαφές. Για να επιτευχθούν διαφορετικοί δείκτες διάθλασης, απαιτούνται δύο διαφορετικά υλικά. Το GaAs χρησιμοποιείται γενικά ως το υλικό υψηλότερου δείκτη και το αργίλιο-γάλλιο-αρσενίδιο (AlGaAs) ως το υλικό χαμηλότερου δείκτη. Όπως απεικονίζεται στην **Εικ.3.12**, το AlGaAs προσμειγνύεται για να διαμορφώσει τα υλικά τύπου-p και τύπου-n που έχουν ουσιαστικά τους ίδιους δείκτες διάθλασης, δεδομένου ότι η συγκέντρωση υλικού πρόσμιξης είναι μικρή. Μεταξύ των στρωμάτων αυτών των υλικών, το GaAs συμπίεζεται ως υλικό ενεργούς-περιοχής από το οποίο εκπέμπεται το φως του laser. Οι διαφορές μεταξύ των δεικτών της διάθλασης που εμφανίζεται σε κάθε διασύνδεση, διαμορφώνουν έναν ανακλαστήρα που περιορίζει το φως μέσα στο GaAs στρώμα, το οποίο βελτιώνει δραστικά την αποδοτικότητα, και σημαντικότερα, μειώνει το ρεύμα κατωφλίου, για τη συσκευή με την αύξηση του κέρδους. Η ενεργός περιοχή (GaAs) χαρακτηριστικά, είναι μόνο 0.1 μm στο πάχος.



**Εικ.3.12: Δομή laser ετεροεπαφής.**

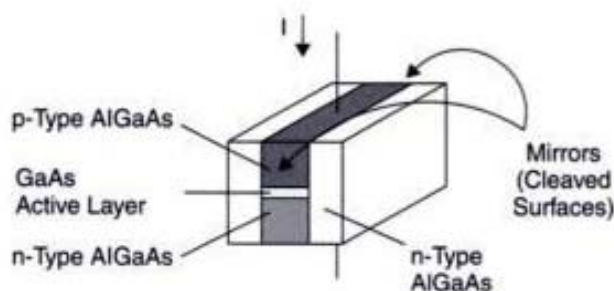
Συνήθως, μια λωρίδα επαφής χρησιμοποιείται πάνω από τη δομή του laser για να επιτύχει την ηλεκτρική σύνδεση των συσκευών. Αυτό περιορίζει περαιτέρω την ενεργό περιοχή στο GaAs laser, δεδομένου ότι το ρεύμα δεν εξαπλώνεται στην κορυφαία περιοχή της επιφάνειας, ολόκληρης της δομής. Σ' ένα πραγματικό διοδικό laser αυτού του τύπου, απαιτούνται γενικά περισσότερα από τρία στρώματα, και ένα στρώμα που χρησιμεύει ως μια ηλεκτρική διασύνδεση, μεταξύ των επαφών μετάλλων

και συνήθως χρησιμοποιείται στρώμα AlGaAs. Τα διοδικά lasers διπλής-ετεροεπαφής, λειτουργούν συνήθως στις θερμοκρασίες δωματίου με χαμηλά ρεύματα κατωφλίου, στη περιοχή δεκάδων milliampers. Ένα διαθέσιμο στο εμπόριο διοδικό laser αυτού του τύπου παρουσιάζεται στην **Εικ.3.13** στο οποίο η ίδια η δίοδος είναι το μικρό κρύσταλλο που τοποθετείται επάνω σε ένα έδρανο του υλικού που χρησιμεύει ως ένας απαγωγός θερμότητας. Πίσω από τον κρύσταλλο του laser, βρίσκεται μία φωτοδίοδος που χρησιμεύει για να παρέχει στο κύκλωμα οδήγησης ανάδραση για το πραγματικό επίπεδο εκπομπής φωτός από το laser, επιτρέποντας στο κύκλωμα, την σταθεροποίηση της οπτικής ισχύς εξόδου του laser.



**Εικ.3.13: Τοπικό διοδικό laser.**

Η ρύθμιση διπλής-ετεροδομής περιορίζει το φως εσωτερικής κοιλότητας μόνο σε μια κατεύθυνση (κορυφή και κατώτατο σημείο) του GaAs στρώματος, αλλά μια περαιτέρω βελτίωση στην απόδοση μπορεί να γίνει με την κατασκευή της συσκευής έτσι ώστε μια διηλεκτρική διεπαφή περιορισμού υπάρχει και στις τέσσερις πλευρές της ενεργού περιοχής σε ένα “σκεπασμένο” laser ετεροδομής που απεικονίζεται στην **Εικ.3.14**. Σε μια τέτοια ρύθμιση ολόκληρος ο σωρός των τριών στρωμάτων ενός χαρακτηριστικού laser ετεροεπαφής (AlGaAs τύπου- p, ενεργός περιοχή GaAs, και AlGaAs τύπου -n) περιορίζεται σε κάθε πλευρά από ένα στρώμα AlGaAs τύπου -n. Η διεπαφή μεταξύ του GaAs υλικού στην ενεργό περιοχή, και του υλικού με χαμηλό-δείκτη διάθλασης στις πλευρές του ενεργού στρώματος, χρησιμεύουν να περιορίσουν περαιτέρω το φως στην κοιλότητα του laser. Τέτοια lasers, ονομάζονται συχνά lasers κυματοδήγησης με δείκτη διάθλασης, δεδομένου ότι το φως μέσα στην κοιλότητα κυματοδηγείται κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν μιας οπτικής ίνας με δείκτη ταξινόμησης.<sup>IV</sup>



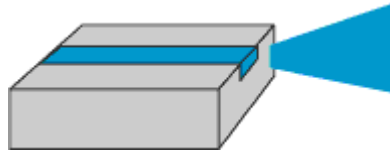
Εικ.3.14: Δομή “σκεπασμένου” laser ετεροεπαφής.

- **Single emitter laser diode**

Τα διοδικά lasers μονού εκπομπού<sup>4</sup>, είναι διοδικά lasers εκπομπής άκρης, όπου η περιοχή εκπομπής στην μπροστινή όψη έχει τη μορφή ευρείας λωρίδας (Εικ.3.15) με διαστάσεις π.χ. 1 μm \* 100 μm . Εξαιτίας της ασυμμετρίας του εκπομπού, οι ιδιότητες της δέσμης, είναι αρκετά διαφορετικές για τις δύο κατευθύνσεις:

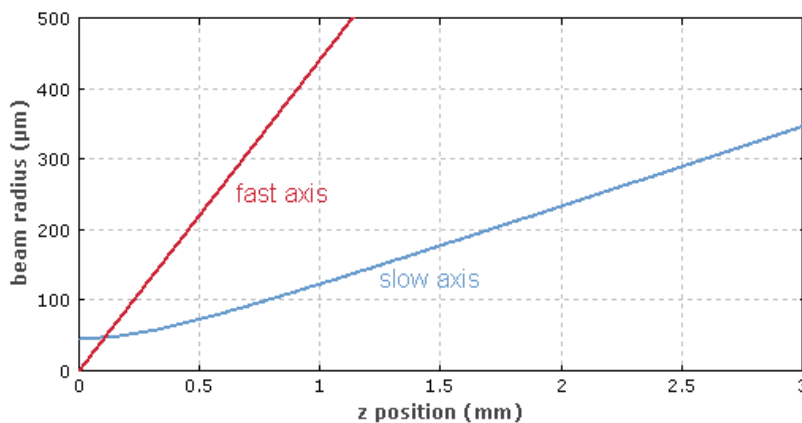
- Στην κάθετη κατεύθυνση το ύψος (π.χ. 1 μm) είναι αρκετά μικρό για να λάβει τη μονοτροπική καθοδήγηση και έτσι δημιουργείται ουσιαστικά μια ποιότητα ακτίνας περιορισμένης διάθλασης με συντελεστή  $M^2$ , ελαφρώς επάνω από 1. Λόγω του μικρού μεγέθους του διαφράγματος η απόκλιση ακτίνας σε αυτήν την κατεύθυνση είναι σχετικά υψηλή, με απόκλιση δέσμης μισής γωνίας, των π.χ. 370 mrad που αντιστοιχεί σε μια γωνιακή σειρά FWHM 25°.
- Στην οριζόντια κατεύθυνση το εύρος ζώνης μπορεί να είναι π.χ. 50 μm, 100 μm, 200 μm, ή ακόμα μεγαλύτερο, έτσι ώστε το φως να κατανέμεται σε πολλούς τρόπους στην κατεύθυνση αυτή. Κατά συνέπεια, η απόκλιση ακτίνας είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό τι για μια περιορισμένης διάθλασης ακτίνα με το αυτό το μέγεθος, αν και είναι σημαντικά μικρότερη απ' ό τι για τη κάθετη κατεύθυνση. Η ποιότητα ακτίνας από την άποψη της δυνατότητας εστίασης, μειώνεται. Ο συντελεστής  $M^2$  μπορεί π.χ. να είναι της τάξης των 20 για μία ζώνη των 100 μm Επιπλέον, το περίγραμμα ακτίνας μπορεί να είναι πολλαπλών “κορυφών” στην οριζόντια κατεύθυνση, και η μορφή του σχεδίου έντασης μπορεί να εξαρτηθεί από το ρεύμα έγχυσης.

<sup>4</sup> Αποκαλούνται επίσης διοδικά lasers ευρείας περιοχής, ευρέου φάσματος ή ευρέου εκπομπού διοδικά lasers, και διοδικά lasers υψηλής φωτεινότητας.



**Εικ.3.15: Διοδικό laser ευρείας περιοχής.**

Όσο ευρύτερη είναι η ζώνη, τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς, αλλά τόσο χειρότερη είναι η ποιότητα της ακτίνας στην οριζόντια κατεύθυνση. Η τεχνολογική τάση είναι να ληφθούν υψηλότερες ισχείς. Κάτι τέτοιο περιορίζεται από την υψηλή οπτική ένταση στην μπροστινή ανακλαστική έδρα (που μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφική αποτυχία) και ενδεχομένως από τα θερμικά ζητήματα. Η επιτρεπόμενη ένταση για μια μακροχρόνια διάρκεια ζωής συσκευών είναι της τάξης των  $10 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ , που σημαίνει ότι μια συσκευή με ένα άνοιγμα εκπομπής  $1 \mu\text{m} * 100 \mu\text{m}$  περιορίζεται κατά προσέγγιση στο  $1 \text{ W}$ . Ειδικές τεχνικές παθητικού σχήματος, επιτρέπουν τις κάπως υψηλότερες τιμές.



**Εικ.3.16: Εξέλιξη της ακτίνας δέσμης εξόδου ενός διοδικού laser ευρείας περιοχής στο “slow axis” και “fast axis” κατεύθυνση. Η ακτίνα δέσμης, αρχίζει από μια πολύ μικρότερη τιμή στη κατεύθυνση “fast axis”, αλλά αυξάνεται γρήγορα.**

Μια κοινή μέθοδος ευθυγράμμισης αποτελεί η χρήση ενός φακού “κυλινδρικής ευθυγράμμισης” κάθετης κατεύθυνσης με υψηλό αριθμητικό άνοιγμα με κοντινή πρόσβαση στο πρόσωπο της διόδου. Ένας τέτοιος φακός ευθυγραμμίζει τη δέσμη στην κάθετη κατεύθυνση προτού η ακτίνα δέσμης γίνει πάρα πολύ μεγάλη. Ένας δεύτερος κυλινδρικός φακός σε μια μεγαλύτερη απόσταση μπορεί έπειτα να

χρησιμοποιηθεί για την ευθυγράμμιση στην οριζόντια κατεύθυνση. Με την επιλογή των φακών με τα κατάλληλα εστιακά μήκη, μια κυκλική δέσμη μπορεί να ληφθεί, η οποία εντούτοις θα έχει αρκετά διαφορετικές γωνίες απόκλισης και στις δύο κατευθύνσεις, λόγω των διαφορετικών τιμών ποιότητας ακτίνας.

Ο οπτικός συντονιστής (ή αντηχείο) του laser είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μονολιθικός (μονοκόμματος), με τις αντανάκλασεις από τα διηλεκτρικά επιστρώματα στις πίσω πλευρές του τσιπ ημιαγωγού. Σε λιγότερο κοινές περιπτώσεις, ένα τσιπ κέρδους μονής επίστρωσης αντανάκλασης σε μια πλευρά, χρησιμοποιείται σε ένα εξωτερικό αντηχείο του laser ( $\rightarrow$  διοδικά lasers εξωτερικών κοιλοτήτων).

Τα διοδικά lasers ευρείας περιοχής συχνά χρησιμοποιούνται για την άντληση των lasers στερεάς κατάστασης. Μια συσκευή με έναν ευρύ εκπομπό 200  $\mu\text{m}$  μπορεί π.χ. να εκπέμψει 2-4 W, έτσι ώστε το αντλημένο laser μπορεί να εκπέμψει μέχρι  $\approx 2$  W. Το διοδικό laser τοποθετείται συχνά σε ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο ψύξης (peltier) το οποίο το καθιστά πιθανό να συντονίσει το μήκος κύματος εκπομπής μέσα σε μερικά νανόμετρα, έτσι ώστε το μέγιστο εκπομπής μπορεί να αντιστοιχηθεί με το μέγιστο απορρόφησης του κρυστάλλου laser.

### **Ειδικά χαρακτηριστικά.**

Μερικές διοδικές ράβδοι, προσφέρονται με ειδικά χαρακτηριστικά:

- Ένας φακός ευθυγράμμισης κάθετης κατεύθυνσης μπορεί να ενσωματωθεί στη συσκευασία laser. Αυτό είναι χρήσιμο, δεδομένου ότι η ανοχή ευθυγράμμισης για το εξωτερικό μοντάρισμα θα ήταν μάλλον περιορισμένη. Υπάρχουν επίσης ολοκληρωμένα διοδικά lasers με την ενσωματωμένη ευθυγράμμιση δέσμης και στις δύο κατευθύνσεις.
- Ένα ενσωματωμένο διάφραγμα Bragg, μπορεί να σταθεροποιήσει το μήκος κύματος εκπομπής και να καταστήσει το φάσμα εκπομπής σημαντικά περιορισμένου εύρους.
- Υπάρχουν εκλεπτυσμένα διοδικά lasers, που έχουν μια περιοχή όπου το πλάτος και έτσι η περιοχή της ενεργού περιοχής αυξάνεται σημαντικά κατά μήκος της κατεύθυνσης διάδοσης. Λόγω μιας ευθύγραμμης περιοχής με το μικρότερο πλάτος, η επιτεύξιμη ποιότητα δέσμης και η φωτεινότητα είναι καλύτερες απ' ό,τι σ' ένα διοδικό laser με το μέγιστο πλάτος κατά μήκος ολόκληρης της ενεργού περιοχής. Εντούτοις, η έξοδος, εκθέτει τον ισχυρό αστιγματισμό, ο οποίος μπορεί να εξαρτηθεί από την ισχύ λειτουργίας

## **Σύγκριση με τις διοδικές ράβδους.**

Ο συνδυασμός διάφορων εκπομπών ευρείας περιοχής σε μια ενιαία διάταξη οδηγεί σε μία διοδική ράβδο, η οποία μπορεί να εκπέμπει δεκάδες W ή ακόμα και περισσότερο από 100 W της οπτικής ισχύος. Εντούτοις, μία διοδική ράβδος, έχει χαμηλότερη φωτεινότητα από ένα laser ενιαίας εκπομπής, παρά την υψηλότερη ισχύ εξόδου, επειδή η ποιότητα δέσμης είναι πολύ χαμηλότερη. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός ενός διοδικού laser άντλησης είναι απλούστερος. Ένα απ' τα πλεονεκτήματα των διοδικών laser ευρείας εκπομπής είναι η δυνατότητα συνεχούς ενεργοποίησης και απενεργοποίησής τους χωρίς περιορισμό της διάρκειας ζωής.<sup>80</sup>

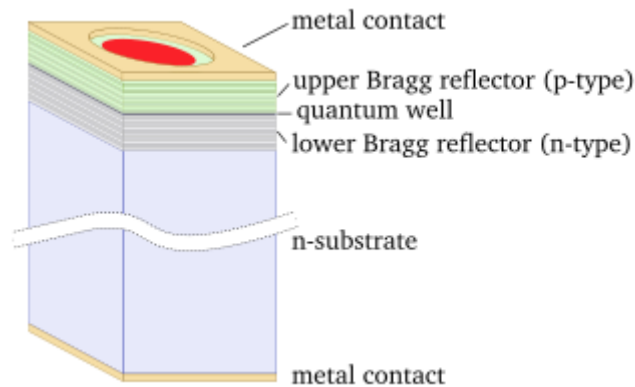
- **Διοδικά lasers VCSEL**

Τα lasers κοιλότητας με κάθετη επιφανειακή εκπομπή (VCSEL) είναι ένας είδος ημιαγωγίου διοδικού laser με κάθετη εκπομπή δέσμης από την πάνω επιφάνεια, αντίθετα με τα τυπικά ημιαγωγία laser επιφανειακής εκπομπής.

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα παραγωγής VCSELs, συγκρίνοντας τη διαδικασία παραγωγής ενός laser επιφανειακής εκπομπής.

Οι επιφανειακοί εκπομποί δεν μπορούν να δοκιμαστούν μέχρι το τέλος της διαδικασίας παραγωγής. Εάν ο επιφανειακός εκπομπός δεν δουλεύει είτε λόγω των κακών επαφών, είτε λόγω του φτωχού ποιοτικά όγκου υλικό, ο χρόνος παραγωγής και τα υλικά επεξεργασίας έχουν χαραμισθεί. Ωστόσο, τα VCSELs, μπορούν να δοκιμαστούν σε αρκετά στάδια καθ' όλη τη διάρκεια της επεξεργασίας για να ελεγχθεί η ποιότητα των υλικών και η έκβαση της επεξεργασίας. Επιπροσθέτως, επειδή τα VCSELs εκπέμπουν τη δέσμη κάθετα στην ενεργό περιοχή του laser σε αντίθεση με' έναν επιφανειακό εκπομπό, δεκάδες χιλιάδες VCSELs μπορούν να επεξεργαστούν ταυτόχρονα πάνω σ' ένα τριών ιντσών πλακίδιο Γαλλίου-Αρσενίου.





Εικ.3.17: Διάγραμμα απλής δομής ενός VCSEL.

### Δομή VCSEL Laser

Ο οπτικός συντονιστής του laser αποτελείται από δύο κάτοπτρα κατανομημένου ανακλαστήρα Bragg (DBR) τοποθετημένα παράλληλα, με μια ενεργό περιοχή αποτελούμενη από ένα ή περισσότερα κβαντικά φρεάτια για την παραγωγή ενδιάμεσου φωτός laser. Τα επίπεδα DBR κάτοπτρα αποτελούνται από στρώματα με εναλλασσόμενους υψηλούς και χαμηλούς δείκτες διάθλασης. Κάθε στρώμα έχει πάχος του ενός τετάρτου του μήκους κύματος του laser στο υλικό αποδίδοντας ένταση ανακλάσεων πάνω από 99%. Στα VCSELs, απαιτούνται κάτοπτρα υψηλής ανάκλασης, για να ισορροπήσει το κοντό αξονικό μήκος της περιοχής κέρδους.

Στα κοινά VCSELs, τα ανώτερα και κατώτερα κάτοπτρα, προσμιγνύονται ως τύπου  $-p$  και τύπου  $-n$  υλικά, διαμορφώνοντας μια δίοδο ένωσης. Σε πιο πολύπλοκες δομές, οι περιοχές τύπου  $-p$  και τύπου  $-n$  μπορούν να σκεπαστούν ανάμεσα σε δύο κάτοπτρα, απαιτώντας μια πιο περίπλοκη διαδικασία ημιαγωγού για να πραγματοποιήσει ηλεκτρική επαφή με την ενεργό περιοχή, εξαλείφοντας έτσι την απώλεια ηλεκτρικής ισχύς στη δομή του DBR.

Στην εργαστηριακή έρευνα για τα VCSELs, χρησιμοποιώντας νέα υλικά συστήματα, η ενεργός περιοχή μπορεί να δεχθεί παλμούς από εξωτερική πηγή φωτός με μικρότερο μήκος κύματος, συνήθως άλλο laser. Αυτό επιτρέπει σε ένα VCSEL να εκδηλωθεί χωρίς το πρόσθετο πρόβλημα της επίτευξης καλής ηλεκτρικής απόδοσης. Ωστόσο, τέτοιες συσκευές δεν είναι πρακτικές για τις περισσότερες εφαρμογές.

VCSELs με μήκος κύματος από 650nm μέχρι 1300nm βασίζονται τυπικά σε δισκία Γαλλίου-Αρσενίου (GaAs) με DBRs διαμορφωμένα από GaAs και Άργιλος-

Γάλλιο-Αρσενικό ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ ). Το σύστημα GaAs/AlGaAs προτιμάται για την κατασκευή VCSELs επειδή η συνεχής κρυσταλλική δομή του υλικού δεν διαφέρει δραστικά καθώς μεταβάλλεται η σύνθεση, επιτρέποντας πολλαπλά κρυσταλλικά επίπεδα να δημιουργηθούν σ' ένα υπόστρωμα GaAs. Όμως, ο δείκτης διάθλασης του AlGaAs διαφέρει καθώς η περιοχή Al αυξάνεται, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των στρωμάτων που απαιτούνται για να σχηματισθεί ένα αποδοτικό κάτοπτρο Bragg συγκρινόμενο με άλλα υποψήφια υλικά συστήματα. Επιπλέον, σε υψηλές συγκεντρώσεις αργιλίου, ένα οξείδιο μπορεί να σχηματισθεί από AlGaAs, και το οξείδιο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει τη ροή ρεύματος σ' ένα VCSEL, ενεργοποιώντας πολύ μικρά ρεύματα κατωφλίου.

Πρόσφατα οι δύο κυριότερες μέθοδοι περιορισμού ροής ρεύματος σ' ένα VCSEL αποδόθηκαν με δύο είδη VCSELs:

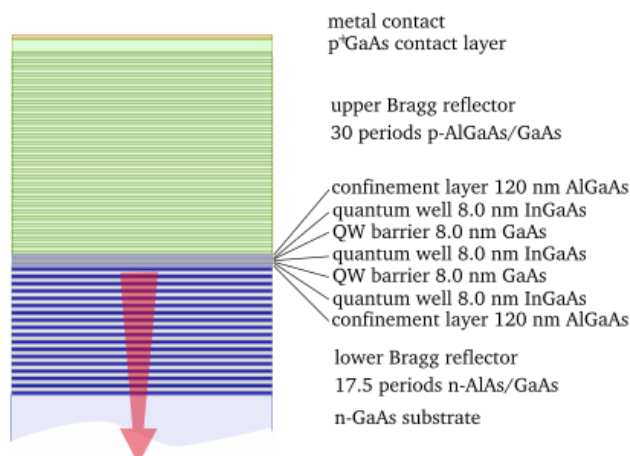
- τα VCSELs εμφυτευμένων ιόντων και
- τα οξειδωμένα VCSELs

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι τηλεπικοινωνιακές επιχειρήσεις έτειναν να ευνοήσουν τα VCSELs εμφυτευμένων ιόντων, που εμφυτεύθηκαν παντού στη δομή του VCSEL, εκτός από το άνοιγμα του VCSEL, καταστρέφοντας την κρυσταλλική δομή γύρω από το άνοιγμα, εμποδίζοντας κατά συνέπεια τη ροή του ρεύματος. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, οι επιχειρήσεις κινήθηκαν προς την τεχνολογία των οξειδωμένων VCSELs. Η ροή ρεύματος περιορίζεται σ' ένα οξειδωμένο VCSEL, οξειδώνοντας το υλικό γύρω από το άνοιγμα του VCSEL. Ένα υψηλής περιεκτικότητας σε αργίλιο στρώμα, που αυξάνεται μέσα στη δομή του VCSEL είναι το στρώμα που οξειδώνεται. Τα οξειδωμένα VCSELs συχνά επίσης χρησιμοποιούν το στάδιο παραγωγής εμφυτευμένων ιόντων. Ως αποτέλεσμα, στο οξειδωμένο VCSEL, η πορεία του ρεύματος περιορίζεται από το εμφύτευμα του και το οξειδωμένο άνοιγμα.

Η αποδοχή των οξειδωμένων VCSELs καθυστέρησε από την ανησυχία για τις φθορές λόγω καταπόνησης και τις ατέλειες του στρώματος οξείδωσης. Εντούτοις, μετά από πολλές δοκιμές η αξιοπιστία της δομής απέδειξε ότι είναι δυνατή. Καθώς διατυπώνεται σε μια μελέτη της Hewlet Packard για τα οξειδωμένα VCSELs, “Τα αποτελέσματα καταπόνησης δείχνουν ότι η ενέργεια ενεργοποίησης και η εξάντληση του χρόνου ζωής του οξειδωμένου VCSEL είναι παρόμοιες μ' αυτές του εμφυτευμένου VCSEL εκπέμποντας την ίδια ποσότητα ισχύος εξόδου”.

Δύσκολη ήταν και η μετάβαση του οξειδωμένου VCSEL από την έρευνα, στην παραγωγή. Ο ρυθμός οξείδωσης του στρώματος οξείδωσης εξαρτήθηκε ιδιαίτερα από την περιεκτικότητα σε αργίλιο. Η παραμικρή απόκλιση σε αργίλιο θ' άλλαζε τον ρυθμό οξείδωσης του στρώματος οξείδωσης στα ανοίγματα, με αποτέλεσμα μερικές φορές ήταν είτε πολύ μεγάλα, είτε πολύ μικρά για να ανταποκριθούν στα πρόθυρα προδιαγραφών.

Συσκευές με μεγαλύτερα μήκη κύματος από 1300 nm μέχρι 2000nm έχουν καταδειχθεί με την ενεργό περιοχή τουλάχιστον να είναι φτιαγμένη από φωσφορίδιο ινδίου. VCSELs με ακόμα μεγαλύτερα μήκη κύματος πειραματίζονται και συνήθως παλμικά VCSELs στα 1310 nm είναι επιθυμητά καθώς η διασπορά της οπτικής ίνας που βασίζεται στο πυρίτιο, έχει το ελάχιστο μήκος κύματος σ' αυτή την περιοχή.



**Εικ.3.18: Ρεαλιστική δομή μίας VCSEL συσκευής. Είναι ένα bottom-emitting multiple-quantum-well laser VCSEL.**

## Χαρακτηριστικά

Επειδή τα VCSELs εκπέμπουν από το επιφανειακό επίστρωμα του τσιπ, μπορούν να ελεγχθούν πριν διαχωριστούν. Αυτό, μειώνει το κόστος κατασκευής των συσκευών. Επίσης, επιτρέπει στα VCSELs να κατασκευαστούν όχι μόνο σε μόνοδιάστατες, αλλά και σε δισδιάστατες διατάξεις.

Το μεγαλύτερο εξωτερικό άνοιγμα των VCSELs συγκρινόμενο με τα περισσότερα lasers επιφανειακής εκπομπής, παράγει χαμηλότερη γωνία απόκλισης από τη δέσμη εξόδου και κάνει πιθανή την ικανότητα υψηλής σύνδεσης με οπτικές ίνες.

Τα κάτοπτρα υψηλής ανάκλασης, συγκρινόμενα με τα περισσότερα lasers εκπομπής ακμής, μειώνοντας το ρεύμα κατωφλίου, επιφέρουν χαμηλή ισχύ κατανάλωσης. Ωστόσο μέχρις στιγμής, τα VCSELs έχουν χαμηλότερη ισχύ εκπομπής συγκρινόμενα με τα lasers εκπομπής ακμής. Το μικρό ρεύμα κατωφλίου επιτρέπει επίσης μεγάλη εσωτερική διαμόρφωση εύρων ζωνών στα VCSELs.

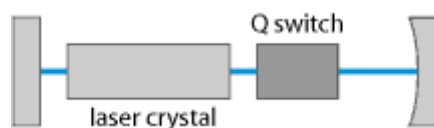
Το μήκος κύματος των VCSELs μπορεί να συντονιστεί, μέσα στη ζώνη κέρδους της ενεργούς περιοχής, προσαρμόζοντας το πάχος των στρωμάτων ανάκλασης.

Ενώ τα αρχικά VCSELs εξέπεμπαν σε πολλαπλές διαμήκεις καταστάσεις λειτουργίας ή σε καταστάσεις λειτουργίας αλληλουχίας, τα μονοτροπικά VCSELs είναι τώρα επικρατέστερα.<sup>80</sup>

### 3.3 Χαρακτηριστικά ακτινοβολίας

- **Q – switched laser**

Τα lasers μεταγωγής-Q μπορούν να αντλήσουν είτε συνεχώς, είτε με παλμούς π.χ. στους λαμπτήρες εκκένωσης με ιδιαίτερα για τα χαμηλά ποσοστά επανάληψης παλμού. Για τη συνεχή άντληση, το μέσο κέρδος πρέπει να έχει μια μακροχρόνια διάρκεια ζωής περιοχής, για να φθάσει σε μια αρκετά υψηλή αποθηκευμένη ενέργεια παρά την απώλεια της ενέργειας ως φθορισμό (είδος φωτοβολίας, που προσμιγνύεται από την ακτινοβολία μιας ουσίας με το φως). Η ενέργεια κορεσμού δεν πρέπει να είναι πολύ χαμηλή, επειδή αυτό μπορεί να οδηγήσει στο υπερβολικό κέρδος, έτσι ώστε η πρόωρη εκκίνησή του είναι δυσκολότερο να σταματήσει. Το τελευταίο πρόβλημα μπορεί να εμφανιστεί ιδιαίτερα για τα lasers ίνας.



Εικ.3.19: Σχηματική δομή ενός laser μεταγωγής-Q.

#### Είδη Q-switched lasers.

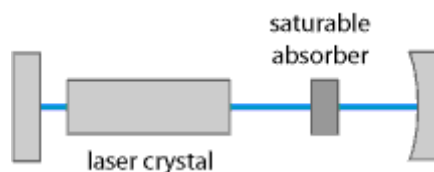
Το πιο κοινό είδος είναι το “συμπαγές” στερεάς κατάστασης laser ενεργής μεταγωγής-Q. Τα μέσα στερεάς κατάστασης κέρδους έχουν καλή ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης.

Για μήκη κύματος στη φασματική περιοχή του 1 μm τα πιο κοινά παλμικά lasers είναι βασισμένα σε ένα κρύσταλλο laser νεοδυμίου όπως Nd:YAG, Nd:YVO4 ή Nd:YLF. Ένα μικρό laser στερεάς κατάστασης ενεργής μεταγωγής-Q μπορεί να

εκπέμπει 100 mW μέσης ισχύος σε παλμούς 10-ns με ρυθμό επανάληψης 1-kHz και ενέργεια παλμού 100  $\mu$ J. Οι μεγαλύτερες ενέργειες παλμού και οι πιο σύντομοι σε διάρκεια παλμοί, επιτυγχάνονται με μικρούς ρυθμούς επανάληψης, εις βάρος της κάπως μειωμένης μέσης ισχύος εξόδου. Ένα κάπως μεγαλύτερο laser Nd:YAG με ισχύ άντλησης 10 W (π.χ. διοδική ράβδος) μπορεί να επιτύχει ενέργειες παλμού αρκετών millijoules. Το Nd:YVO<sub>4</sub> είναι ιδιαίτερα δελεαστικό για σύντομους σε διάρκεια παλμούς και υψηλούς ρυθμούς επανάληψης παλμού, ή για λειτουργία με χαμηλή σχετικά ισχύ άντλησης.

Τα lasers μεταγωγής-Q με μεγαλύτερα μήκη εκπομπής συχνά βασίζονται στα προσμιγνυομένου ερβίου μέσα κέρδους, όπως το Er:YAG για 1,65  $\mu$ m ή 2,94  $\mu$ m.

Σημαντικά μεγαλύτερες ενέργειες παλμού μπορούν να ληφθούν από τα συστήματα ενισχυτών (MOPAs).



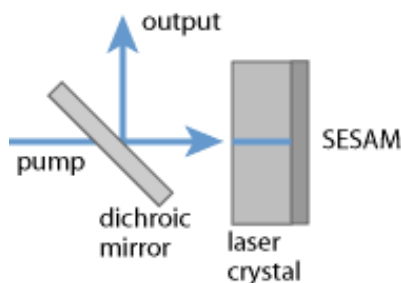
Εικ.3.20: Δομή παθητικού laser μεταγωγής-Q

Ιδιαίτερα, για τους σχετικά χαμηλών ρυθμών επανάληψης παλμούς, η άντληση λαμπτήρων μπορεί να είναι μια οικονομικά ευνοϊκή επιλογή, δεδομένου ότι οι λαμπτήρες εκκένωσης είναι πολύ φτηνότεροι από τα διοδικά lasers για δεδομένη μέγιστη ισχύς. Ωστόσο, για μεγαλύτερη ισχύ, η άντληση διόδων γίνεται ελκυστικότερη, επειδή οι θερμικές επιδράσεις στο κρύσταλλο του laser, μειώνονται έντονα.

Ένα παθητικό laser μεταγωγής-Q περιέχει έναν απορροφητή κορεσμού (παθητική μεταγωγή-Q) αντί του διαμορφωτή. Για συνεχή άντληση, μια κανονική αλληλουχία παλμών λαμβάνεται και ο συγχρονισμός των παλμών δεν μπορεί συνήθως να ελεγχθεί με εξωτερικά μέσα. Οι ρυθμοί επανάληψης των παλμών αυξάνονται, με την αύξηση της ισχύος άντλησης.

Τα μικροσίπ lasers παθητικής μεταγωγής-Q εκπέμπουν παλμούς με ενέργειες μεταξύ των nanojoules και μερικών microjoules, με μέση ισχύ εξόδου μερικών δεκάδων milliwatts, και ρυθμούς επανάληψης μεταξύ μερικών KHz και μερικών MHz.

Μερικά από τα μικροσίπ lasers μεταγωγής-Q λειτουργούν σαν ένα ενιαίο αντηχείο. Αυτό, οδηγεί σ' ένα καθαρά χρονικό σχήμα και σε ένα μάλλον μικρό οπτικό εύρος ζώνης, που περιορίζεται συχνά από τη διάρκεια παλμού.



**Εικ.3.21: Μικροσίπ laser παθητικής μεταγωγής-Q μ' ένα SESAM.**

Τα lasers ίνας, μπορούν επίσης να είναι ενεργούς ή παθητικής μεταγωγής-Q. Εντούτοις, οι συσκευές που είναι ολόκληρες από ίνα, είναι αρκετά περιορισμένες από ως προς την απόδοσή τους, ενώ τα οπτικά στοιχεία που περιλαμβάνουν τα Q-switched lasers ίνας (π.χ. **Εικ.3.22**) είναι λιγότερο σταθερά.



**Εικ.3.22: Δομή ενεργού laser ίνας μεταγωγής-Q.**

Οι υψηλής ισχύος ενισχυτές ίνας είναι κατάλληλοι για την ενίσχυση των αλληλουχιών παλμών με υψηλή μέση ισχύ, αλλά μέτριας ενέργειας παλμού. Κάποιος βαθμός μη γραμμικής παραμόρφωσης παλμού σε έναν τέτοιο ενισχυτή, είναι συχνά αποδεκτός για τις εφαρμογές .

### Σχεδιαστικά θέματα

Παρακάτω, αναφέρονται τρόποι αντιμετώπισης σχεδιαστικών προβλημάτων laser μεταγωγής-Q:

- Για σύντομους παλμούς, απαιτούνται ένα μικρού μήκους αντηχείο laser και ένα laser υψηλού κέρδους. Οι πιο σύντομοι παλμοί επιτυγχάνονται με τα μικροσίπ lasers, επειδή αυτά μπορούν να έχουν εξαιρετικά μικρού μήκους αντηχεία, με μέτρια ενέργεια παλμού. Η επίτευξη σύντομων παλμών (μερικά nanoseconds) που συνδυάζονται με τις ενέργειες παλμού millijoules, είναι δυνατή με τα συμπαγή lasers στερεάς κατάστασης.

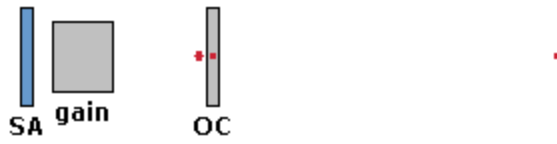
- Η επίτευξη υψηλής ενέργειας παλμού απαιτεί καλή ενεργειακή αποθήκευση. Για συνεχή άντληση, αυτό σημαίνει ότι μια μακροχρόνια διάρκεια ζωής είναι επιθυμητή.
- Ένα πάρα πολύ υψηλό κέρδος πρέπει πραγματικά να αποφευχθεί, δεδομένου ότι φέρνει τον κίνδυνο απώλειας ενέργειας, μέσω ASE<sup>5</sup> ή παρασιτικού lasing.
- Ο ρυθμός επανάληψης παλμού μπορεί συχνά να ποικίλει σε μία μεγάλη περιοχή αλλά αυτό επηρεάζει όχι μόνο την επιτεύξιμη ενέργεια παλμού, αλλά και τη διάρκεια παλμού. Μια ιδιαίτερα πρόκληση μπορεί να προκύψει από την ανάγκη να διατηρηθούν οι σταθερές παράμετροι παλμού ακόμη και για τους μεταβλητούς ρυθμούς επανάληψης.
- Στις υψηλές οπτικές εντάσεις, η ζημιά των τμημάτων της εσωτερικής κοιλότητας, όπως είναι τα κάτοπτρα των lasers μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα. Έτσι, αυτό απαιτεί σχέδια αντηχείων. Η βελτιστοποίηση των αντηχείων μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει στις σημαντικά βελτιωμένες τιμές απόδοσης, μαζί με τη βελτιωμένη σταθερότητα, εύκολη ευθυγράμμιση και μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Μείωση του εύρους ζώνης της εκπομπής, μπορεί να επιτευχθεί με σποραδικές εγχύσεις.<sup>80</sup>

- **Mode locking**

Η εγκλειδωση ρυθμών (mode-locking) είναι μια μέθοδος (ή ένα σύνολο μεθόδων) για να παραχθούν υπερβραχίοι παλμοί από τα lasers, τα οποία έπειτα ονομάζονται, lasers εγκλειδωμένων ρυθμών. Ο οπτικός συντονιστής περιλαμβάνει είτε ένα ενεργό στοιχείο (οπτικός διαμορφωτής) είτε ένα μη γραμμικό παθητικό στοιχείο που οδηγεί στον σχηματισμό ενός υπερβραχίου παλμού. Σε σταθερή κατάσταση, οι παράμετροι παλμού παραμένουν αμετάβλητες. Κάθε φορά που ο παλμός προσκρούει το εξωτερικό κάτοπτρο, εκπέμπεται ένας παλμός, δημιουργώντας μια αρμονική αλληλουχία παλμών (**Εικ.3.23**). Η περιοδική επανάληψη παλμού αντιστοιχεί σε αρκετά nanoseconds, ενώ η διάρκεια του παλμού είναι πολύ μικρότερη (μεταξύ 30 fs και 50 ps, σε ακραίες περιπτώσεις κάτω από  $\approx 5$  fs). Για το λόγο αυτό, η μέγιστη ισχύς ενός laser εγκλειδωμένων ρυθμών, μπορεί να είναι μεγαλύτερης τάξης από τη μέση ισχύ.

---

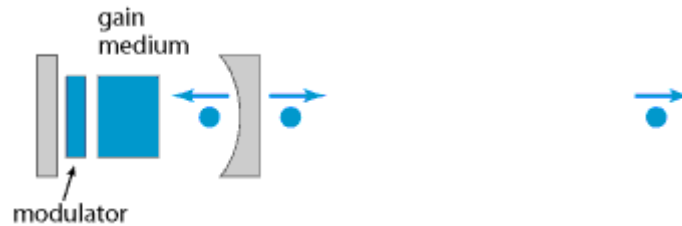
<sup>5</sup> Διαδικασία όπου η αυθόρμητα εκπεμπόμενη ακτινοβολία (φωτοβολία) ενισχύεται.



Εικ.3.23: Παραγωγή αλληλουχίας παλμών σ' ένα laser εγκλειδωσης ρυθμού.

### Ενεργή και παθητική εγκλειδωση ρυθμού.

Η ενεργή εγκλειδωση ρυθμών περιλαμβάνει την περιοδική διαμόρφωση των απωλειών του οπτικού αντηχείου που επιτυγχάνεται π.χ. με ένα ακουστικό-οπτικό ή ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή, ένα ολοκληρωμένο οπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder, ή έναν ημιαγώγιο ηλεκτρο-απορροφητικό διαμορφωτή. Εάν η διαμόρφωση είναι συγχρονισμένη με τις παλμοσειρές του οπτικού αντηχείου, τότε παράγονται υπερβραχίοι παλμοί, με διάρκεια παλμού συνήθως picoseconds. Στις περισσότερες περιπτώσεις η πραγματοποιημένη διάρκεια παλμού ελέγχεται από την ισορροπία του περιορισμένου παλμού διαμέσου του διαμορφωτή και του διευρυμένου παλμού.



Εικ.3.24: Σχηματική δομή laser ενεργούς εγκλειδωσης ρυθμών .

Η παθητική εγκλειδωση ρυθμού (μ' έναν κορεσμένο διαμορφωτή) επιτρέπει τη παραγωγή πολύ συντομότερων παλμών (femtosecond), επειδή ένας κορεσμένος διαμορφωτής που οδηγείται από τους ήδη σύντομους παλμούς, μπορεί να διαμορφώσει τις απώλειες του αντηχείου πολύ πιο γρήγορα από ένα ηλεκτρικό διαμορφωτή. Όσο πιο σύντομος γίνεται ο παλμός, τόσο πιο γρήγορα χάνεται η αποκτούμενη διαμόρφωση, εφ' όσον ο απορροφητής έχει έναν αρκετά μικρό χρόνο αποκατάστασης. Σε μερικές περιπτώσεις, δεν μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστη εκκίνηση αυτό-εγκλειδωσης ρυθμών (self mode-locking).





**Εικ.3.25: Σχηματική δομή laser παθητικής εγκλειδωσης ρυθμών.**

Σε ορισμένα lasers (ειδικά στα διοδικά lasers εγκλειδωμένων ρυθμών), η ενεργός και παθητική εγκλειδωση ρυθμών εφαρμόζονται ταυτόχρονα. Τέτοια υβριδικά lasers εγκλειδωμένων ρυθμών συνδυάζουν μερικά βασικά πλεονεκτήματα, όπως έναν εξωτερικά ελεγχόμενο ρυθμό επανάληψης παλμού και αρκετά σύντομους παλμούς.

### **Συνεχής εναντίον συγχρονισμένης άντλησης.**

Η μεγάλη πλειοψηφία των lasers εγκλειδωσης ρυθμών είναι συνεχούς άντλησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το κενό του παλμού είναι πολύ σύντομο συγκρινόμενο με την διάρκεια ζωής ανώτατης κατάστασης, έτσι ώστε να αποθηκεύεται ευκολότερα η ενέργεια. Ο κορεσμός κέρδους είναι ο ίδιος για το laser συνεχούς εκπομπής με την ίδια μέση ισχύ.

### **Υψηλός και χαμηλός ρυθμός επανάληψης παλμού.**

Αλληλουχίες παλμού υψηλού ρυθμού επανάληψης μερικές φορές επιτυγχάνονται με αρμονική εγκλειδωση ρυθμών, όπου πολλοί παλμοί κυκλοφορούν στο αντηχείο του laser με σταθερό χρονικό διάστημα. Αυτό επιτρέπει την παραγωγή παλμικών αλληλουχιών πολλών GHz ακόμα και με lasers ίνας, τα οποία τυπικά έχουν βασικές συχνότητες παλμοσειράς μερικών μόνο δεκάδων MHz.

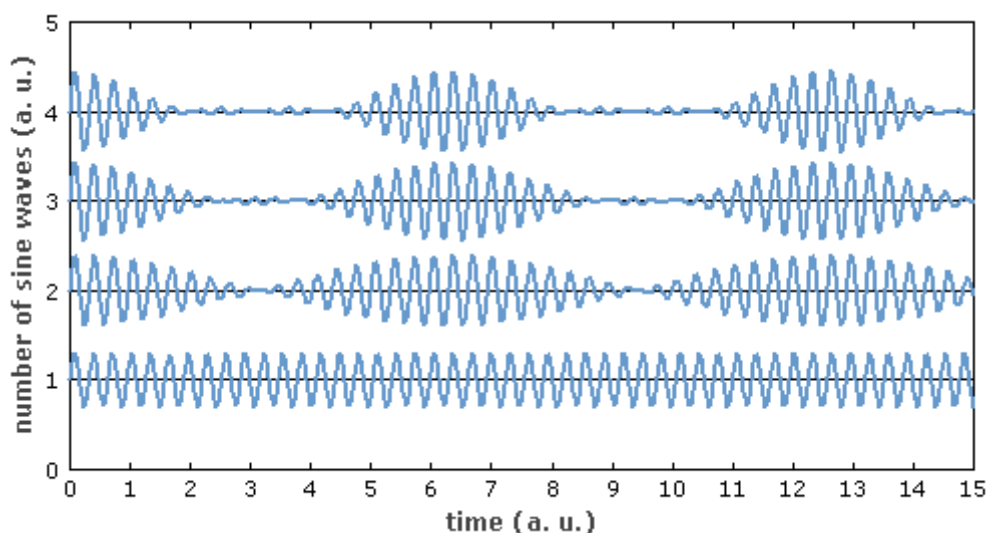
Για υψηλούς ρυθμούς επανάληψης παλμού αρμονικής εγκλειδωσης ρυθμών, απαιτούνται κοντά αντηχεία. Εάν μπορούν ν' αποφευχθούν οι αστάθειες μεταγωγής Q με το κατάλληλο σχεδιασμό, τέτοια lasers μπορούν να είναι πολύ απλά, σταθερά και συμπαγή.

Λόγω του υψηλού ρυθμού επανάληψης, οι παλμικές ενέργειες που λαμβάνονται από τα lasers εγκλειδωμένων ρυθμών, είναι αρκετά περιορισμένες (το πολύ μερικά microjoules, αλλά συνήθως nanojoules ή ακόμα picojoules). Οι υψηλότερες παλμικές ενέργειες συνδυασμένες με χαμηλότερους ρυθμούς επανάληψης μπορούν να επιτευχθούν με τα lasers προσμίξιμης κοιλότητας εγκλειδωμένων ρυθμών, και με τους ενισχυτές αναπαραγωγής.

### “Εγκλείδωση ρυθμών”

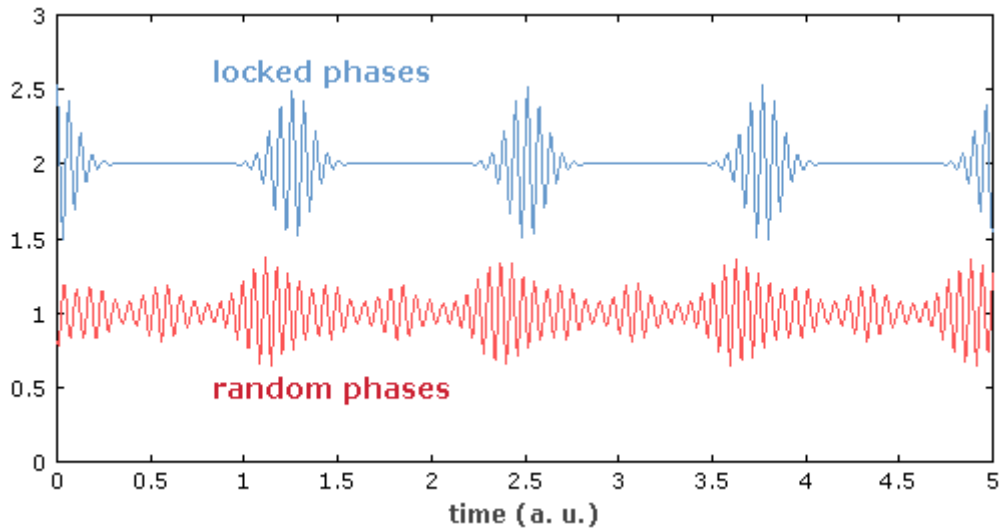
Ο όρος “εγκλείδωση ρυθμών”, προέρχεται από την περιγραφή στο πεδίο της συχνότητας όπου ένας σύντομος παλμός δημιουργείται στο αντηχείο του laser όταν επιτυγχάνεται μια σταθερή σχέση φάσης μεταξύ των διαμηκών των τρόπων, ή ακριβέστερα, μεταξύ των γραμμών στο φάσμα, στην έξοδο του laser. Εντούτοις, οι βασικοί μηχανισμοί που οδηγούν στην εγκλείδωση ρυθμών, μπορούν συνήθως να είναι πολύ πιο κατανοητοί στο πεδίο του χρόνου.

Είναι χρήσιμο να μελετηθεί η σύνθεση μίας περιοδικής αλληλουχίας παλμών από τον συνδυασμό ημιτονοειδών ταλαντώσεων (Εικ.3.26). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εμπλεκόμενων συνιστωσών συχνότητας, τόσο μικρότερη μπορεί να είναι η διάρκεια των παραγόμενων παλμών.



Εικ.3.26: Σύνθεση μίας περιοδικής αλληλουχίας παλμών. Οι υψηλότερες καμπύλες, αντιστοιχούν σε έναν αυξανόμενο αριθμό συνιστωσών συχνότητας.

Μια σημαντική πτυχή είναι ότι πρέπει να υπάρξει μια σταθερή σχέση φάσης μεταξύ αυτών των τρόπων. Αυτό, διευκρινίζεται στην Εικ.3.27, όπου η μπλε καμπύλη παρουσιάζει μία αλληλουχία παλμού με σταθερή σχέση φάσης, έτσι ώστε στις κανονικές χρονικές θέσεις (π.χ. για  $t=0$ ) όπου τα ηλεκτρικά πεδία όλων των συνιστωσών συχνότητας προστίθενται πάνω σε ένα μέγιστο της συνολικής δύναμης πεδίου. Η κόκκινη καμπύλη παρακάτω, παρουσιάζει το ηλεκτρικό πεδίο για την ίδια δύναμη όλων των συνιστωσών συχνότητας, αλλά με τυχαίες σχετικές φάσεις.<sup>80</sup>

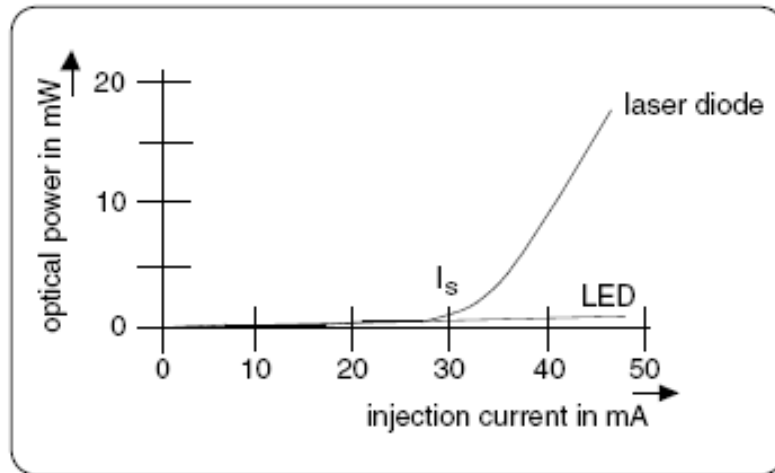


**Εικ.3.27.:** Χρονική εξέλιξη του πεδίου ενδιάμεσης κοιλότητας σ' ένα laser μία φορά με σταθερή σχέση φάσης μεταξύ των τρόπων (κατάσταση εγκλειδωσής ρυθμών), και μία φορά με τυχαίες φάσεις.

### 3.4 Λειτουργικά χαρακτηριστικά διοδικών lasers

#### 3.4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες

Πάνω από το χαρακτηριστικό ρεύμα κατωφλίου  $I_s$  στ' οποίο το διοδικό laser ξεκινά να λειτουργεί, το ιδανικό διοδικό laser δείχνει μια γραμμική εξάρτηση ανάμεσα στην οπτική ισχύ εξόδου και στο ρεύμα του laser. Κάτω από την περιοχή κατωφλίου, η οπτική ενίσχυση δεν είναι επαρκής. Το φως εκπέμπεται αβίαστα όπως σ' ένα LED. Η **Εικ.3.28** δείχνει πως η χαρακτηριστική καμπύλη ενός διοδικού laser δεν διαφέρει από αυτή ενός LED στα ρεύματα λειτουργίας κάτω από την περιοχή κατωφλίου.



Εικ.3.28 : Χαρακτηριστικές καμπύλες ενός LED και ενός διοδικού laser.

Σημαντικές παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι η κλίση, το ρεύμα κατωφλίου, η καμπυλότητα κατωφλίου και η γραμμική λειτουργία του laser. Η γραμμικότητα χαρακτηρίζεται από μια αναλογία των αρμονικών. Υψηλές απαιτήσεις έχουν τοποθετηθεί για τη γραμμικότητα της διαμόρφωσης.

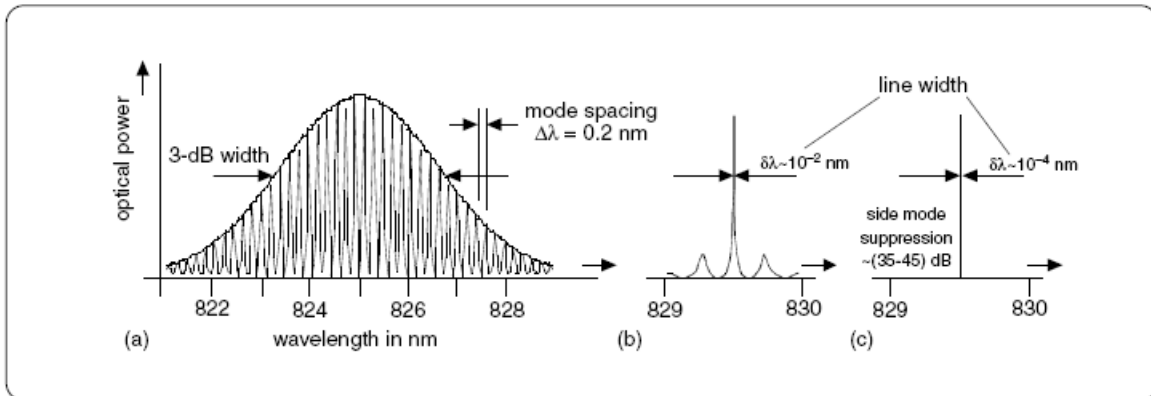
Εάν η οπτική ισχύς εξόδου είναι πολύ υψηλή, τα κάτοπτρα των lasers θα καταστραφούν. Επομένως, είναι απαραίτητο να περιοριστεί η μέγιστη ισχύς εξόδου. Με διοδικά laser ανοικτής δέσμης, η ισχύς εξόδου μπορεί να φτάσει μέχρι αρκετά KW.

Η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης με βαθμονόμηση mW/mA, είναι άμεσα καθορισμένη από την αποδοτικότητα της λειτουργίας της συσκευής. Η κλίση ενός διοδικού laser με προσαρμοσμένη ίνα, μειώνεται από ένα συντελεστή που εξαρτάται από την τυπική σύνδεση της ισχύς του laser στην ίνα.

### 3.4.2 Οπτικό φάσμα

Το οπτικό φάσμα ενός laser με συντονιστή Fabry-Perot, έχει ήδη αναφερθεί. Αποτελείται από ενιαίες φασματικές γραμμές. Το φασματικό πλάτος κάθε φασματικής γραμμής επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και κυρίως από την ισχύ του laser.

Η Εικ.3.29 δείχνει τα φάσματα των lasers κυματοδότησης με απολαβή και των lasers κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης. Με τα lasers κυματοδότησης με απολαβή, μπορεί ν' αναγνωριστεί μια πολυτροπική δομή. Αυτό οφείλεται στην αβίαστη εκπομπή.



**Εικόνα 3.29: Φάσματα διοδικών laser: (a) Laser κυματοδότησης με απολαβή (b) Fabry-Perot laser κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης (c) DFB laser.**

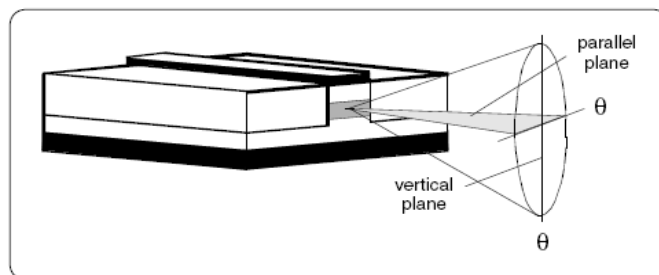
Με τα Fabry-Perot lasers κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης, μια φασματική γραμμή υπερισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις. Με το DFB laser, το πλάτος των συνιστωσών είναι αρκετά μικρότερο απ' ό τι στο Fabry-Perot laser.

Τυπικά πολυτροπικά lasers με πλάτος 3db από 2 μέχρι 3 nm, αντιστοιχούν σ' ένα φάσμα συχνότητας περίπου 1000 GHz. Το φάσμα συχνότητας ενός Fabry-Perot laser κυματοδότησης δείκτη διάθλασης είναι στην περιοχή των GHz.

### 3.4.3 Χαρακτηριστικά δέσμης

Η δέσμη ενός διοδικού laser, παρεκκλίνει με μια αρκετά μεγάλη γωνία ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται σε φωτεινές και σκοτεινές ζώνες διάθλασης των κυμάτων φωτός, όταν σμίγουν έξω από το διοδικό laser. Μέσα στο laser, τα κύματα φωτός είναι περιορισμένα στην ενεργό περιοχή.

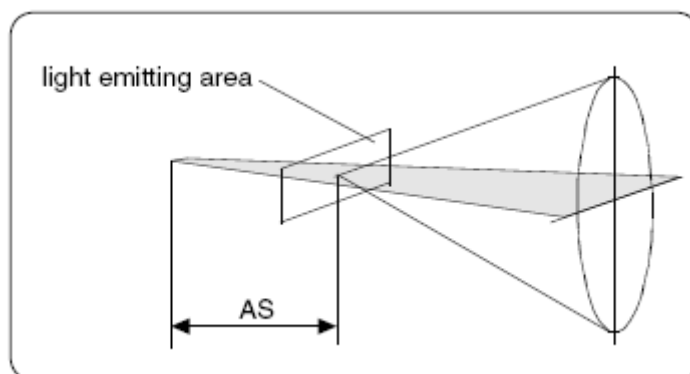
Από τη στιγμή, που η ενεργός περιοχή εκπεμπόμενου φωτός πάρει ορθογώνιο σχήμα με έντονα μήκη επιφάνειας, η παράλληλη και η κάθετη απόκλιση είναι διαφορετικές. Επομένως, σε κάποια απόσταση από την περιοχή εκπομπής, η δέσμη θα εμφανισθεί ως σημείο έλλειψης, έτσι ώστε η σύνδεση στην ίνα με μικρής διαμέτρου κέντρο, γίνεται δύσκολα. **(Εικ.3.30).**



**Εικ.3.30: Τυπική χαρακτηριστική δέσμη ενός διοδικού laser.**

Τα διοδικά lasers κυματοδότησης απολαβής και τα διοδικά lasers κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης, έχουν διαφορετική κατανομή έντασης στο κέντρο τους.

Το κέντρο της κάθετης και το κέντρο της παράλληλης απόκλισης δεν συγκλίνουν, αλλά είναι μετατοπισμένα, το ένα απέναντι στο άλλο (**Εικ.3.31**). Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται αστιγματισμός. Η τυπική τιμή του αστιγματισμού για lasers κυματοδότησης με απολαβή είναι 30  $\mu\text{m}$  και τυπική τιμή για lasers κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης είναι 10  $\mu\text{m}$ .



**Εικ.3.31: Αστιγματισμός διοδικού laser.**

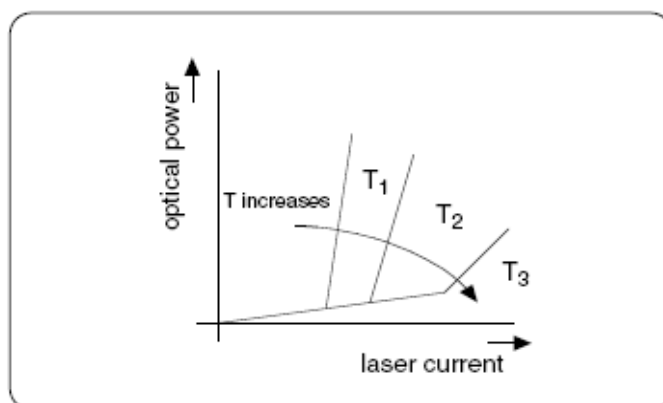
Τα lasers κοιλότητας με κάθετη επιφανειακή εκπομπή (VCSELs) έχουν τετράγωνη ή στρογγυλή περιοχή εκπομπής, επιτυγχάνοντας μια σχετικά συμμετρική δέσμη. Η περιοχή εκπομπής είναι μεγαλύτερη από αυτή των κοινών lasers και έτσι, έχει μικρότερη απόκλιση (7 με 10 μοίρες). Τα διοδικά lasers εκπέμπουν ένα σχεδόν γραμμικά πολωμένο φως. Η αιτία γι' αυτό, είναι η εξάρτηση πόλωσης από τον παράγοντα ανάκλασης  $R$  της περιοχής εκπομπής του κρυστάλλου. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται μόνο σε ορθογώνιες περιοχές εκπομπής.

Η αναλογία μεταξύ των παράλληλων και κάθετων διανυσμάτων πόλωσης της δέσμης ονομάζεται, αναλογία πόλωσης. Σε χαμηλότερο ρεύμα λειτουργίας, η

συμμετοχή του μη πολωμένου φωτός είναι μεγαλύτερη λόγω της αβίαστης εκπομπής. Αυξάνοντας την ισχύ εξόδου, η αναλογία πόλωσης αυξάνεται. Τα διοδικά lasers που οδηγούνται κοντά στην μέγιστη ισχύ, παρουσιάζουν αναλογίες πόλωσης πάνω από 100:1.

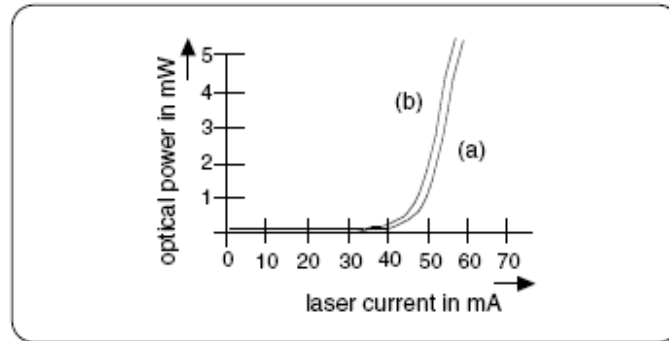
### 3.4.4 Συμπεριφορά θερμοκρασίας

Τα χαρακτηριστικά ενός διοδικού laser εξαρτώνται πολύ από τη θερμοκρασία. Η **Εικ.3.32** δείχνει τη χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία, το ρεύμα κατωφλίου αυξάνεται και η κλίση της καμπύλης μειώνεται. Η μετατόπιση του ρεύματος κατωφλίου, οφείλεται στην εξάρτηση της θερμοκρασίας από τη συγκέντρωση φορέων στο ενεργό στρώμα καθώς και στην αύξηση θερμοκρασιών κατά τη διαδικασία επανασύνδεσης χωρίς εκπομπή.



**Εικ.3.32:** Συσχέτιση θερμοκρασίας & χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας.

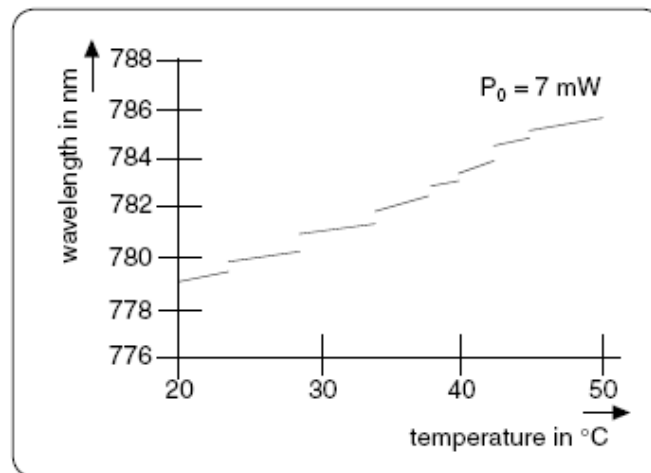
Στη παλμική λειτουργία, η θερμοκρασία του τσιπ ενός διοδικού laser εξαρτάται λιγότερο από το ρυθμό επανάληψης. Συνεπώς, η χαρακτηριστική καμπύλη μετατοπίζεται σε μικρότερα ρεύματα (**Εικ.3.33**). Υπάρχουν κι άλλες παράμετροι των διοδικών lasers απ' τις οποίες εξαρτάται η θερμοκρασία. Μια από αυτές είναι η διάρκεια ζωής των διοδικών lasers. Όταν η θερμοκρασία του τσιπ μειωθεί γύρω στους 10 βαθμούς, η διάρκεια ζωής του, διπλασιάζεται. Γι' αυτό, πρέπει να τοποθετηθεί σ' έναν απαγωγό θερμότητας, για ν' αποφευχθεί η υπερθέρμανση λόγω του διασκορπισμού της ισχύος.



**Εικ.3.33:** Χαρακτηριστική καμπύλη ενός διοδικού laser σε (a) συνεχή λειτουργία (CW) ή (b) παλμική λειτουργία.

Είναι σημαντικό ν' αντιληφθούμε την πιθανή επίδραση της θερμοκρασίας στην κατανομή του φάσματος. Αυξάνοντας τη θερμοκρασία, ο κρύσταλλος θα επεκταθεί και έτσι το μήκος του συντονιστή θα μεγαλώσει. Ταυτόχρονα, ο δείκτης διάθλασης αυξάνεται. Μ' αυτό τον τρόπο, οι ενιαίες φασματικές γραμμές μετατοπίζονται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το ενισχυμένο περίγραμμα (το περίβλημα του φάσματος) μετατοπίζεται και αυτό σε μεγαλύτερα μήκη κύματος καθώς το ενεργειακό χάσμα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Το φαινόμενο αυτό, φαίνεται καθαρά με τα Fabry-Perot lasers κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης, όπου σε συγκριμένες θερμοκρασίες το εκπεμπόμενο μήκος κύματος μεταπηδά από τη μια φασματική γραμμή στην επόμενη (**Εικ.3.34**).



**Εικ.3.34:** Fabry-Perot laser με δείκτη καθοδήγησης.

Με τα DFB lasers, η μετατόπιση της περιβάλλουσας καμπύλης μπορεί να παραβλεφθεί αφού η περιβάλλουσα καμπύλη είναι πολύ μεγάλη. Η θερμοκρασιακή εξάρτηση του φάσματος του D.F.B. laser, καθορίζεται από τη μετατόπιση της ενιαίας φασματικής γραμμής. Ο αντίστοιχος θερμοκρασιακός συντελεστής ενός DFB laser



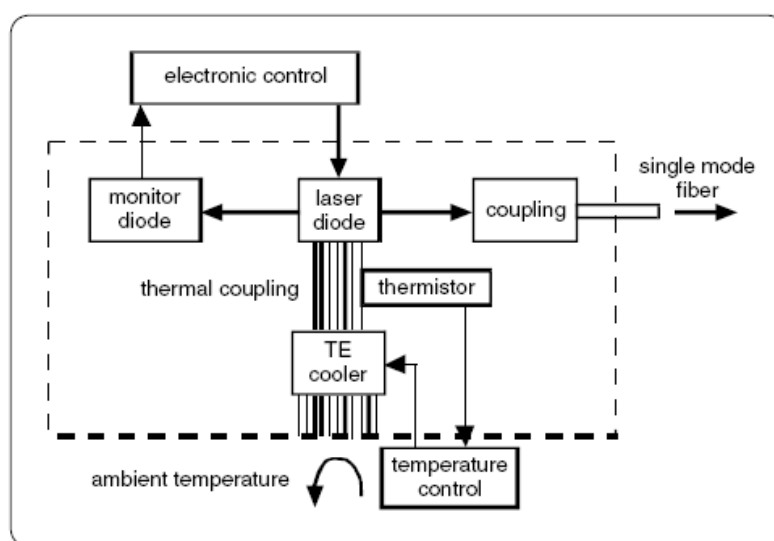
είναι περίπου από 0,02 nm/K μέχρι 0,1 nm/K, πολύ χαμηλότερος απ' τον αντίστοιχο ενός Fabry-Perot laser.

Στις μονοτροπικές ίνες, η μετατόπιση θερμοκρασίας σ' ένα μήκος κύματος, προκαλεί μετατόπιση του μήκους κύματος απ' το zero crossing. Αυτό, οδηγεί σε μεγαλύτερη διασπορά και σε μείωση του εύρους ζώνης. Έτσι, είναι απαραίτητη η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του laser. Η θερμοκρασία ελέγχεται θερμοηλεκτρικά μέσω ενός θερμίστορ και ενός ψύκτη που επιτρέπει τη θέρμανση ή τη ψύξη ενός διοδικού laser. Η χρήση του ψύκτη είναι δαπανηρή και καθιστά τα διοδικά lasers ακριβή. Η ανάπτυξη laser με μικρότερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία αποτελεί πρόκληση, ειδικότερα σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές όπου απαιτείται θερμοκρασία λειτουργίας από τους  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  μέχρι τους  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Μια σημαντική εξέλιξη στην μείωση της εξάρτησης από τη θερμοκρασία, επετεύχθει με τη χρησιμοποίηση των στρωμάτων διαστρέβλωσης κβαντικών φρεατίων (Q.W.). Με την χρήση αυτών των δομών δεν χρειάζεται ψύξη μέχρι τους  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Εκτός του ελέγχου θερμοκρασίας, είναι πιθανός και ο έλεγχος της οπτικής ισχύος της εξόδου. Για το σκοπό αυτό, έχει τοποθετηθεί μια φωτοδίοδος (δίοδος επιτήρησης) στην πίσω όψη του laser.

Το διοδικό laser, η δίοδος επιτήρησης, το θερμίστορ και ο ψύκτης, έχουν τοποθετηθεί σε μια ερμητικά σφραγισμένη συσκευασία. Η ολοκληρωμένη συσκευή ονομάζεται module laser (**Εικ.3.35**).



**Εικ.3.35: Δομή ενός laser module.**

### 3.4.5 Συμπεριφορά διαμόρφωσης

Τα διοδικά lasers μπορούν να οδηγηθούν αδιαμόρφωτα (CW) ή διαμορφωμένα. Για αναλογική μετάδοση, η διαμόρφωση γίνεται στην γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης.

Στις χαμηλότερες συχνότητες, η ψηφιακή διαμόρφωση παράγεται από ένα Transistor-Transistor Logic (TTL) σήμα, τ' οποίο προστίθεται σ' ένα ρεύμα πόλωσης κάτω απ' το όριο του laser. Για διαμόρφωση συχνοτήτων στην περιοχή των GHz, η ψηφιακή διαμόρφωση γίνεται από ένα σήμα λογικού συζευγμένου εκπομπού (ECL) τ' οποίο προστίθεται σ' ένα ρεύμα πόλωσης, πάνω απ' τ' όριο του laser.

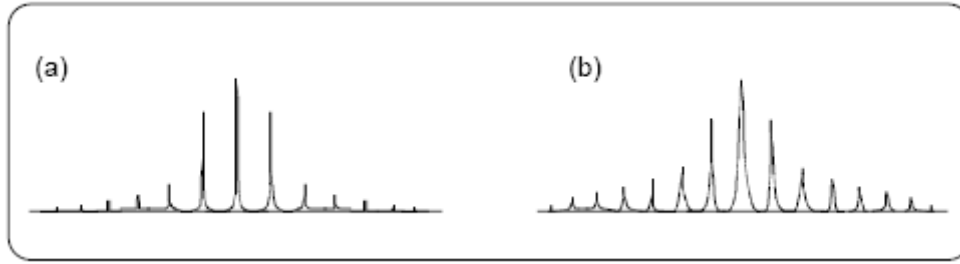
Τα αποκαλούμενα παλμικά διοδικά lasers οδηγούνται σε ημι-συνεχόμενο κύμα (QCW). Μεταξύ των μονών παλμών εμφανίζονται μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι κυκλικές λειτουργίες, είναι μικρότερες των 1:100.

Η παλμική ισχύς που μπορεί να επιτευχθεί με τα QCW διοδικά lasers είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ότι με τα διαμορφωμένα ή μη-διαμορφωμένα CW διοδικά lasers. Οδηγώντας ένα QCW διοδικό laser με CW, μπορεί αναπόφευκτα να καταστραφεί το laser, λόγω της υπερθέρμανσης καθώς το QCW laser, παρέχει κακή θερμική επαφή στον απαγωγό θερμότητας.

Όταν διαμορφώνεται το διοδικό laser (διαμόρφωση έντασης), το μήκος κύματος του laser αλλάζει λόγω της σύζευξης του πλάτους και της φάσης. Αυτή η διαμόρφωση συχνότητας, μπορεί να διευρύνει το φάσμα εντυπωσιακά και μπορεί να καταλήξει σε παραμόρφωση σημάτων.

Τα DFB lasers παραμένουν μονοτροπικά στην διαμόρφωση και παρουσιάζουν, ειδικά στις υψηλές διαμορφωμένες συχνότητες, λιγότερη διεύρυνση του φάσματος από τα Fabry-Perot lasers.

Σε υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων, οι παραμορφώσεις σημάτων μπορούν να είναι εξαιρετικά ενοχλητικές. Στη περίπτωση αυτή, το laser οδηγείται σε κατάσταση CW και διαμορφώνεται επιφανειακά μ' έναν ηλεκτρικά οπτικό διαμορφωτή. Η υπόλοιπη διεύρυνση του πλάτους γραμμής είναι ανάλογη μόνο με τη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων.



Εικ.3.36: Φάσμα ενός Fabry-Perot laser σε (a) CW (b) modulated.

### 3.4.6 Θόρυβος και ανάδρομες ανακλάσεις

Τα διοδικά lasers είναι ευαίσθητα στις συνέπειες του θορύβου από διάφορες προελεύσεις. Οι περισσότερες απ' αυτές τις πηγές θορύβου, μπορούν να ελεγχθούν και έτσι, ο συνολικός θόρυβος στο σύστημα laser μπορεί να περιοριστεί. Οι τέσσερις κύριες πηγές θορύβου είναι τα mode hoppings, η ένταση θορύβου, η οπτική ανάδραση και speckle noise.

Τα **Mode hoppings**, προκύπτουν από τις θερμοκρασιακές αλλαγές στην ενεργό περιοχή. Η μετατόπιση του μήκους κύματος εξόδου συνοδεύεται από μια μικρή χρονική περίοδο θορύβου. Το φαινόμενο αυτό, εμφανίζεται μόνο με τα Fabry-Perot lasers και όχι με τα DFB lasers.

Η **ενίσχυση έντασης θορύβου** είναι συνάρτηση του ρεύματος λειτουργίας. Είναι το αποτέλεσμα της μη ομαλής μεταβολής ηλεκτρονίων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των φωτονίων και των αγωγών φορτίων στην ενεργό περιοχή, δημιουργεί ένα θόρυβο εσωτερικού πλάτους. Αυτό μειώνεται έντονα πάνω από τ' όριο κατωφλίου.

Η **οπτική ανάδραση** προέρχεται από ανάδρομη ανάκλαση του φωτός του laser, με τα οπτικά εξαρτήματα, όπως είναι για παράδειγμα οι συζευκτές. Ένας εξωτερικός συντονιστής ενισχύεται συγκριτικά με τον εσωτερικό συντονιστή. Ο εξωτερικός συντονιστής είναι ασταθής και εξαιτίας της οπτικής ανάδρασης, οδηγεί σε θόρυβο. Τα lasers με δείκτη καθοδήγησης με μικρό φάσμα, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην οπτική ανάδραση.

Στα συστήματα μετάδοσης όπου χρησιμοποιούνται τα lasers κυματοδότησης με δείκτη διάθλασης, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι οπτικές ανακλάσεις. Αυτό είναι πιθανό να επιτευχθεί με τη χρήση ειδικών συζευκτών (συζεύκτες υψηλής επιστροφής απώλειας) για την πρόκληση πολύ χαμηλής ανάκλασης. Εάν οι ανακλάσεις δεν μπορούν ν' αποφευχθούν, ένας οπτικός απομονωτής πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς

πίσω από το τσιπ του laser. Ο απομονωτής αυτός παρέχει χαμηλές απώλειες εισαγωγής από το laser στην οπτική ίνα και υψηλές απώλειες στην ανάδρομη κατεύθυνση.

**Speckle noise**, εμφανίζεται ισχυρότερος σε laser με μεγάλο μήκος συνοχής.

Ο Πίνακας 3.1 δείχνει τις σημαντικότερες ιδιότητες των LEDs και των διοδικών lasers.

LED	ΔΙΟΔΙΚΟ LASER
Πλατιά δέσμη, ασύμφωνο φως	Στενή δέσμη, συνεχές φως
Εύκολο στο χειρισμό	Απαιτείται έλεγχος τάσης και ρεύματος
Διαμόρφωση συχνότητας μέχρι αρκετών 100 Mhz	Διαμόρφωση συχνότητας μέχρι αρκετών 10 GHZ
Εύρος φάσματος από 30 nm μέχρι 100 nm	Εύρος φάσματος < 5 nm
Οπτική ισχύς μέχρι 1 mW	Οπτική ισχύς μέχρι μερικών 100 mW
Φθινό	Ακριβό
Κακή γραμμικότητα	Καλή γραμμικότητα

Πίνακας 3.1: Σύγκριση των διοδικών lasers με διόδους φωτοβολίας (LED)

Ο Πίνακας 3.2 συγκρίνει κάποιες ιδιότητες των Fabry-Perot lasers με τις αντίστοιχες των DFB lasers.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	FABRY- PEROT LASER	DFB LASER
Συμπεριφορά εκπομπής	Αντιδρά ευαίσθητα σε μεταβολές της θερμοκρασίας με “αναπήδηση” ρυθμών	Παραμένει σταθερή στο μήκος κύματος, πάντα μονοτροπική, μπορεί να συντονιστεί ηλεκτρονικά
Εύρος φάσματος	Πλατύ $\geq$ μεγαλύτερη χρωματική διασπορά	Στενό $\geq$ μικρότερη χρωματική διασπορά
Φάσμα	Επέμπει πολυτροπικά (RF MODULATED)	Εκπέμπει μονοτροπικά (RF MODULATED)
Εξάρτηση θερμοκρασίας	Μεγάλη	Μικρή

Πίνακας 3.2: Σύγκριση των Fabry-Perot lasers με τα DFB lasers.

### 3.4.7 Προφυλάξεις κατά τον χειρισμό των διοδικών lasers

Παρέχοντας ιδανικές συνθήκες, τα διοδικά lasers δείχνουν μεγάλη αξιοπιστία και επιτυγχάνουν διάρκεια ζωής από 100,000 ώρες και πάνω. Ωστόσο, είναι πολύ ευαίσθητα σε ηλεκτροστατική εκκένωση και σε υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος laser ανάστροφης τάσης διακοπής.

Μείωση της ισχύς εξόδου, μεταπήδηση του κατωφλίου του laser ή μεταβολή της απόκλισης δέσμης, συνεπάγεται βλάβη του διοδικού laser. Εάν η δέσμη δεν μπορεί άλλο να εστιαστεί πλήρως ή αν το laser εκπέμπει όπως ένα LED, είναι επίσης δείγματα καταστροφής του laser.

Μ' ένα τυπικό laser των 5 mW, η ένταση του φωτός στην εκπεμπόμενη περιοχή ( $2 \mu\text{m} * 4 \mu\text{m}$ ) είναι  $625 \text{ W/ mm}^2$  ή περισσότερο. Οι απαιτούμενες προστασίες είναι σημαντικές και πρέπει να τηρούνται σύμφωνα με τις οδηγίες που παρέχει ο κατασκευαστής. Η ηλεκτροστατική εκκένωση που προκαλείται από την ανθρώπινη επαφή είναι η πιο συνηθισμένη περίπτωση για πρόωρη βλάβη ενός διοδικού laser.

Οι μη εμφανίσιμες βλάβες που δεν μπορούν να γίνουν άμεσα αντιληπτές, θα οδηγήσουν σε μια γρήγορη μεταβολή του διοδικού laser. Αυτό είναι πολύ επικίνδυνο για τις εφαρμογές στις οποίες απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής.

### **3.4.8 Ελεγκτές διοδικών lasers**

Για να οδηγηθεί ένα διοδικό laser ασφαλές και σταθερά, απαιτείται μια σταθερή πηγή ρεύματος. Αυτή η πηγή ρεύματος πρέπει επίσης να παρέχει πολυάριθμες λειτουργίες προστασίας όπως αργή αύξηση του ρεύματος του laser (ομαλή εκκίνηση), προστασίες έναντι μεταβάσεων για να εμποδίσουν οποιουδήποτε είδους γραμμικών διαταραχών και ένα ασφαλές ρυθμιζόμενο όριο για το ρεύμα έγχυσης.

Επιπλέον, η πηγή ρεύματος πρέπει να είναι ειδικά χαμηλού θορύβου και να παρέχει στιγμιαίο ρεύμα και για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας (το ρεύμα έγχυσης διατηρείται σταθερό) και σταθερή ισχύς (η οπτική ισχύς εξόδου διατηρείται σταθερή).<sup>73</sup>

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4.1 Σκοπός

Στη σύγχρονη εποχή, τα ενδοχειρουργικά lasers οφθαλμιατρικής είναι Argon lasers, Yag lasers, Co<sub>2</sub> lasers και διοδικά (diode) lasers με υπεριώδες, μπλε, πράσινο, ερυθρό και υπέρυθρο μήκος κύματος ακτινοβολίας και με ισχύς από 300 mW μέχρι αρκετά Watts. Τα lasers αυτά, ποικίλλουν ως προς τις διαστάσεις και το βάρος τους.

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι η μελέτη των δυνατοτήτων εφαρμογής διοδικών lasers για την ανάπτυξη ενός φορητού ενδοχειρουργικού laser μιας χρήσης, που θα μπορούσε να αποτελέσει εργαλείο μιας χρήσης όπως τα περισσότερα σύγχρονα χειρουργικά εργαλεία.

Στα πλαίσια ανάπτυξης της διάταξης φωτοπηξίας, πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω στάδια εκτέλεσης του έργου:

- i. Επιθυμητά χαρακτηριστικά της διάταξης φωτοπηξίας κατά την οποία θα επιλεγθούν τα χαρακτηριστικά της πηγής laser καθώς και τα χαρακτηριστικά του συστήματος ακτινοβόλησης
- ii. Τεχνολογική τεκμηρίωση της επιλογής της πηγής laser
- iii. Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης για φωτοπηξία
- iv. Πειραματική τεκμηρίωση και βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων
- v. Βελτιστοποίηση της πειραματικής διάταξης

## 4.2 Επιθυμητά χαρακτηριστικά της διάταξης φωτοπηξίας

### 4.2.1 Κριτήρια επιλογής laser

Η επιλογή του κατάλληλου laser έγινε με κριτήρια που βασίζονται στα χαρακτηριστικά του αμφιβληστροειδή καθώς και με οικονομοτεχνικά κριτήρια.

- Μήκος κύματος

Στην ιατρική, ιδιαίτερα σημαντική είναι η χρήση των διοδικών lasers κοντινού υπερύθρου (750 nm - 980 nm). Όσον αφορά τα διοδικά laser που εκπέμπουν στην περιοχή του ορατού, δεν υπάρχουν αναφορές για οποιεσδήποτε σημαντικές κλινικές εφαρμογές τους στην ιατρική.

Αν και η έρευνα αφορούσε μήκη κύματος από 300 έως 1000nm, στην συνέχεια η επιλογή του μήκους κύματος επικεντρώθηκε μεταξύ των 650 και 690 nm, διότι στο συγκεκριμένο φάσμα, είναι δυνατή η χρήση φωτοπηξίας. Παρά το γεγονός ότι το laser Ar έχει αποδειχτεί αποτελεσματικό εργαλείο στην οφθαλμιατρική, το διοδικό laser θεωρείται προτιμότερη λύση, για τη θεραπεία αρκετών παθήσεων. Το διοδικό laser σε σχέση με το laser Ar έχει πολλά πλεονεκτήματα με σημαντικότερο τη μείωση του κόστους θεραπείας των ασθενών. Έτσι, η αναζήτηση έγινε αποκλειστικά για διοδικά lasers.

Μετά από διεξοδική έρευνα αγοράς, τα διοδικά laser με κατάλληλο μήκος κύματος αναφέρονται στον **Πίνακα 4.1**, όπου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μήκος και την ισχύ που διαθέτει κάθε εταιρία.

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΟΠΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ				
		≤ 50 mW	50 – 100 mW	100 – 180 mW	> 180 mW
	< 400nm (VIOLET & ULTRA VIOLET)	1,5,6	1,5, 6,	1,5,6	5,8
	400 – 500 nm (BLUE)	1,6,15,21	1,19	1,19	19
	500 – 600nm (GREEN)	1,6,21	1,6,17,21	1	1,5, 6,8
	600 – 700nm (RED)	1,33,43,44	1,6,15,33,43,44	1,33,44	6,11,14,17,33,43,44,49
> 700 nm (INFRARED)	1,9,33,43	1,6,9,15,9,33,38, 43	1,9,33,38,43, 44	2,3,5,6,9,11,19,21,33, 39,40,43,44,46,49,51,52	

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΟΠΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ				
		≤ 50 mW	50 – 100 mW	100 – 180 mW	> 180 mW
	< 400nm (VIOLET & ULTRA VIOLET)	4,5,6,7,8,9,10,11,12	8,10,11	10,11	5,8,10,11
	400 – 500 nm (BLUE)	4,5,6,7,8,9,10,11, 12,13,14,15,16, 17,18,19,20,21,22	4,5,6,8,10,11,12, 15,16,17,19	5,6,8,10,11,12,15 , 19,23	5,6,8,9,10,14,16, 19,20
	500 – 600nm (GREEN)	4,5,6,7,8,9,10,11,14, 15,17,18,22,24,25,26, 27,28,29,30	4,5,6,7,8,9,10,11, 14,17,22,30	5,6,8,10,11, 17,22,30	5,6,60,12,17,18,30
	600 -700nm (RED)	4,5,6,7,8,9,10,11, 12,13,14,15,17,19, 20,21,24,25,28,29, 31,32,33,34,35,36, 37,38,39,40,41,42, 43,44,45,46,47,48	6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,17,19,21, 24,33,40,43,46	6,9,10,11,12,13,1 4,17,19,26,33,44	6,10,11,12,17,19, 26,33,39,42,43,44, 49,50,51,52
> 700 nm (INFRARED)	4,5,6,7,8,9,10,11,12, 13,14,15,17,19,21,25,2 6,33,34,36,37,38,39,40, 41,42,43,44,46,47,51, 53,54,55,56,57,58,59, 60	6,7,8,9,10,11,12,13, 14,15,16,17,19,21, 24,33,36,38,40,43, 46,60,61,62	5,6,7,8,9,10, 11,12,13,14, 15,16,17,19, 20,21,26,33,40,4 3,46,55,60,61	4,5,6,7,8,9,10,11, 12,13,14,15,17,19, 20,21,23,26,33,34, 36,39,40,42,43,46, 49,50,51,52,55,60, 62,63	

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1: α) Διοδικό laser παλμικής εκπομπής (PULSED),  
β) Διοδικό laser συνεχούς εκπομπής (CW).



- Ισχύς

Στις περισσότερες ιατρικές εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται διοδικά lasers, η ισχύς τους, κυμαίνεται από 100 mW έως 10 W. 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.

Για την παρούσα διάταξη, η απαίτηση ήταν να έχει υψηλή τιμή, ώστε το επιθυμητό αποτέλεσμα να επιτυγχανόταν σε μικρό χρονικό διάστημα. Τα διοδικά laser που προέκυψαν, διαθέτουν μεγάλη ποικιλία τιμών ισχύος, όπως φαίνεται άλλωστε και στον **Πίνακα 4.1**.

- Απόκλιση δέσμης

Με τον όρο απόκλισης εννοούμε το άνοιγμα της δέσμης του laser με την αύξηση της απόστασης. Η απόκλιση πρέπει να είναι μικρή, προκειμένου να αποφεύγεται η εξάπλωση της ακτινοβολίας σε μεγάλο τμήμα του σκληρού. Κάτι τέτοιο θα ήταν ανεπιθύμητο μιας και θα συνεπαγόταν αδυναμία πλήρους χειρισμού απ' την πλευρά του γιατρού, με αποτέλεσμα να καταστρέφει μεγαλύτερο τμήμα του αμφιβληστροειδούς απ' το επιθυμητό. Οι τιμές απόκλισης σε αντιστοιχία με τα μήκη κύματος laser αναφέρονται στον **Πίνακα 4.1**.

- Παλμική / συνεχής ακτινοβολία

Στο συνεχές, κύριο γνώρισμα τη εξόδου του laser, είναι ότι βρίσκεται σε χρονική συμφωνία έτσι, διατηρείται σταθερή η ισχύς εξόδου του laser. Στο παλμικό όμως, η έξοδος του laser, ποικίλλει όσον αφορά το χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις περιοδικές εναλλαγές “on” και “off”. Η ιδιότητα αυτή σε πολλές εφαρμογές, επιδιώκει να εναποθέσει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια σε μια δεδομένη θέση, όσο το δυνατόν πιο σύντομα, με αποτέλεσμα η μέση ισχύ εξόδου του laser, να είναι χαμηλότερη σε σχέση με την ισχύ εξόδου ως συνεχές.

- Κόστος

Στην παρούσα μελέτη, λήφθηκε υπόψη το συνολικό κόστος κατασκευής της διάταξης. Επιλογή των γιατρών αποτελεί η δυνατότητα καταστροφής της διάταξης με το πέρας κάθε επέμβασης. Κάτι τέτοιο, όπως είναι προφανές, μειώνει σε σημαντικό βαθμό το τελικό κόστος κατασκευής, ενώ κατευθύνει τις σχεδιαστικές προδιαγραφές

ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο απλές και οικονομικές. Ενδεικτικά, κάποιες τιμές, αναφέρονται στον **Πίνακα 4.1**.

- Διαστάσεις

Το μέγεθος της διάταξης, αποτέλεσε ένα εκ των σημαντικότερων κριτηρίων, δεδομένου ότι οι γιατροί επιθυμούσαν ένα φορητό, αυτόνομο και εύχρηστο laser.

Στον **Πίνακα 4.2**, εμφανίζεται συνοπτικά η έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε στον **Πίνακα 4.1**, το εύρος της αξίας και η τεχνολογία των υπο επιλογή διοδικών lasers.

<b>ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΙΣΧΥΣ</b>	<b>ΑΞΙΑ</b>	<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ</b>	<b>ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</b>
<b>&lt; 400 nm</b>	3mW-3W	\$93-\$13400	TEM, DIODE ARRAY, FABRY-PEROT, SINGLE EMITTER ,DFB, HOMONJUNCTION,	CW&PULSED
<b>400 – 500 nm</b>	5mW-3W	\$5-\$1500	DPSS,DFB,VCSEL,HETEROJUNCTION,TEM,Q-SWITCHED, SINGLE MODE OPERATION	CW&PULSED
<b>500 – 600 nm</b>	3mW-3W	\$10-\$1462	DPSS, QUANTUM WELL, DBR, MODE-LOCKED, FIBER-COUPLED, SINGLE EMITTER, QUANTUM WELL	CW&PULSED
<b>600 – 700 nm</b>	3mW-2,5W	\$7-1394	DPSS,TEM, DFB, DBR. DIODE ARRAY ,SINGLE-EMITTER, VCSEL, MULTIMODE OPERATION, FABRY-PEROT	CW&PULSED
<b>&gt; 700 nm</b>	1mW-4W	\$5-\$1370	DPSS, VCSEL ,DFB ,DBR, HOMOJUNCTION, TEM, SINGLE-MODE OPERATION	CW&PULSED

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2: Συγκριτικός πίνακας διοδικού laser.**

Τα βασικότερα κριτήρια σύνταξης του **Πίνακα 4.2** ήταν:

Το μήκος κύματος του laser πρέπει να ανήκει στην φασματική περιοχή από πράσινο μέχρι κοντινό υπέρυθρο, με προτίμηση το κόκκινο. Τα lasers κόκκινου μήκους κύματος έχουν μικρότερη σκέδαση σε σύγκριση με άλλες περιοχές του ορατού, ενώ υπερτερούν έναντι του αόρατου υπέρυθρου διότι δεν χρειάζονται την προσθήκη συστημάτων στόχευσης. Επίσης, αν και αναφέρεται ότι τα διοδικά lasers κόκκινου μήκους κύματος προκαλούν πόνο, πρέπει να τονιστεί ότι η υπό ανάπτυξη διάταξη προορίζεται για ενδοχειρουργική χρήση, σε συνθήκες τοπικής ή ολικής αναισθησίας και συνεπώς δεν τίθεται πρόβλημα πόνου .

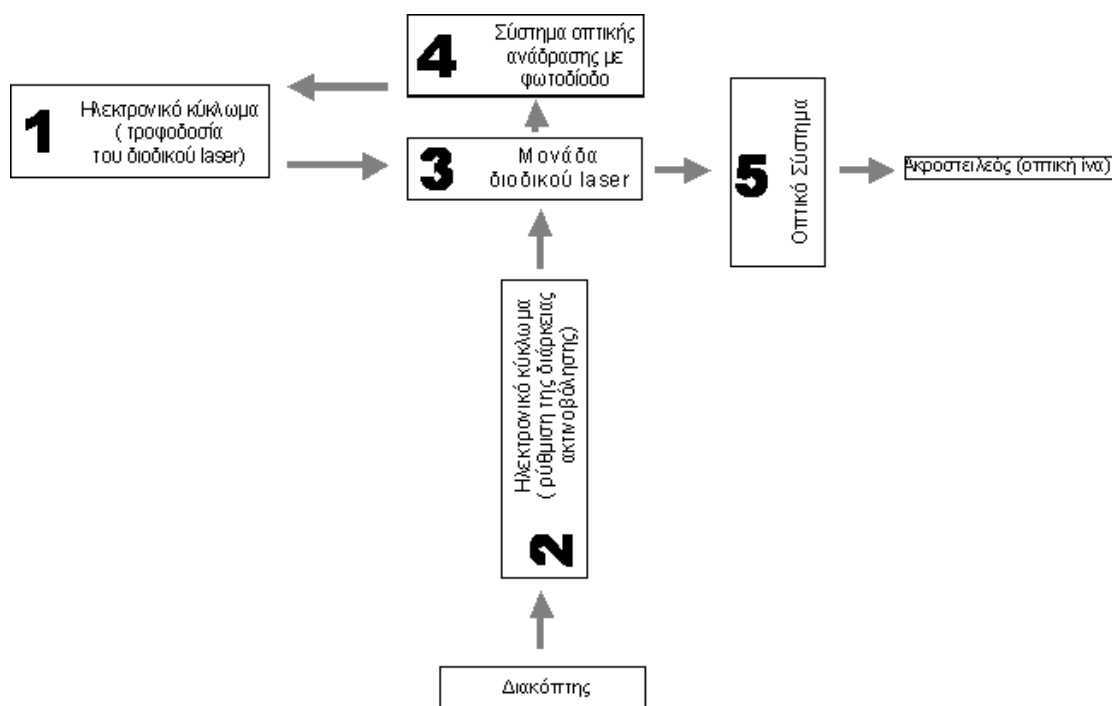
Όσον αφορά το καθεστώς λειτουργίας, στον **Πίνακα 4.2**, περιλαμβάνει δύο διαφορετικούς τύπους laser: συνεχούς δράσης (continuous wave, CW) και παλμικά laser (pulsed). Απ' τους αρχικούς πίνακες, απορρίφθηκαν αρκετά lasers σύνθετης λειτουργίας (τα περισσότερα με μεγάλη συχνότητα επανάληψης παλμών, που χρησιμοποιούνται συνήθως στις τηλεπικοινωνίες), επειδή, σύμφωνα με το σκοπό της μελέτης, η υπό ανάπτυξη συσκευή πρέπει να είναι απλή στη χρήση και να έχει χαμηλό κόστος.

Επίσης, επειδή η συσκευή προορίζεται για ενδοχειρουργική χρήση, μεγάλη σημασία έχουν οι διαστάσεις του laser. Έτσι, η συσκευή με ενσωματωμένο laser πρέπει να έχει αρκετά μικρές διαστάσεις, συγκρίσιμες με τις τυπικές διαστάσεις χειρουργικών εργαλείων.

### 4.3 Τεχνολογική τεκμηρίωση των σχεδιαστικών παραμέτρων της διάταξης

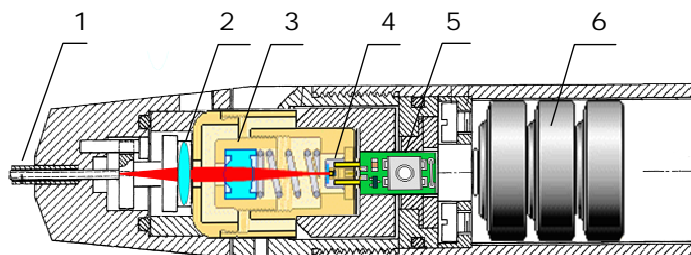
#### 4.3.1 Μπλοκ-διάγραμμα και αρχικός σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής

Στην **Εικ.4.1** παρουσιάζεται η αρχική σχεδίαση της υπό ανάπτυξης διάταξης στην οποία περιγράφονται τα κυριότερα τμήματα της διάταξης.



**Εικ.4.1: Μπλοκ-διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.**

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. Η **Εικ.4.2** παρουσιάζει αποτελέσματα προκαταρκτικού σχεδιασμού του ενδοφθάλμιου στείλεού με διοδικό laser.



**Εικ.4.2:** Σχεδιασμός του ενδοφθάλμιου στείλεού 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

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, επεξεργάστηκαν τρεις σχεδιαστικές προτάσεις των οποίων η διαφοροποίηση εστιάστηκε κυρίως στον έλεγχο της ακτινοβολίας.

### 4.3.2 Σχεδιαστικές προτάσεις

#### 4.3.2.1 Κατασκευή στείλεού μεταβλητής ακτινοβολίας.

Βασικό πλεονέκτημα της κατασκευής αυτής, αποτελούν οι μικρές διαστάσεις. Η διάταξη, μειονεκτεί λόγω αδυναμίας ελέγχου της διάρκειας ακτινοβολίας, η χρήση καλωδίου τροφοδοσίας δυσκολεύει τον χειρισμό της, ενώ εκπέμπει κατά τη διάρκεια λειτουργίας της αναμένεται εμφάνιση υψηλής θερμοκρασίας. Συνεπώς είναι απαραίτητη η τοποθέτηση χρονικού απενεργοποίησης καθώς και ψηκτρών ή θερμοηλεκτρικού στοιχείου (peltier).

Συνοπτικά, λοιπόν ο απαιτούμενος εξοπλισμός θα αποτελείται από:

- Διοδικό laser (510-550, 670, 808 nm),
- Ελεγκτής τάσης εισόδου,
- Κάτοπτρα,
- Στοιχείο ψύξης (Peltier),
- Θερμοκρασιακός ελεγκτής.

Το κόστος της κατασκευής ανάλογα με την επιλογή των εξαρτημάτων, εμφανίζεται στον **Πίνακα 4.3**:

<b>ΕΙΔΟΣ</b>	<b>ΑΞΙΑ</b>
Laser @ 532 nm (Pout>150mw)	585 €
Laser @ 808 nm (Pout=200mw)	680 €
Laser @ 808 nm (Pout=400mw)	715 €
Laser @ 808 nm (Pout=500mw)	395 €
Laser @ 670 nm (Pout=400mw)	228 €
Ελεγκτής τάσης εισόδου	990 €
Κάτοπτρα- φακοί	90 €
Peltier	80 €
Θερμοκρασιακός ελεγκτής	970 €

**Πίνακας 4.3: Επιλογή εξαρτημάτων κατασκευής.**

Το συνολικό κόστος της κατασκευής ανάλογα με το είδος του laser που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

- laser @ 532 nm, Pout>150mw, 2715 € .
- laser @ 808 nm, Pout=200mw, 2810 €.
- laser @ 808 nm, Pout=400mw, 2845 €.
- laser @ 808 nm, Pout=500mw, 2525 €.
- laser @ 670 nm, Pout=400mw, 2358 €.

Να σημειωθεί, ότι για την επιλογή laser με μήκος κύματος τα 808 nm, υπάρχει πρόβλημα οδήγησης της ακτίνας, το οποίο επιλύεται με την τοποθέτηση δευτερεύοντος laser ορατής δέσμης, χαμηλής ισχύος.

Ο **Πίνακας 4.4**, εμφανίζει τα επιλεγμένα laser όπου μπορούν να καλύψουν την ανάγκη ύπαρξης του δευτερεύοντος laser, καθώς και το κόστος του.

<b>LASER</b>	<b>ΑΞΙΑ</b>
532nm,1mw	\$330
532nm,3mw	\$390
635nm,1mw	\$100-295
635nm,3mw	\$110-165
635nm,5-10mw	\$120-200

**Πίνακας 4.4: Επιλογή δευτερέων laser.**

#### 4.4.2.2 Κατασκευή στελλεού σταθεροποιημένης ακτινοβόλησης.

Η σχεδίαση αυτή πλεονεκτεί λόγω μικρών διαστάσεων και ευχρηστίας. Στην περίπτωση αυτή δεν χρησιμοποιείται καλώδιο τροφοδοσίας, αλλά και πάλι εμφανίζεται αδυναμία ελέγχου της διάρκειας ακτινοβόλησης καθώς και ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας. Η επίλυση των προβλημάτων είναι ίδια μ' αυτή της προηγούμενης παραγράφου (παρ. 4.4.1).

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός την σχεδίαση της προτεινόμενης διάταξης, είναι:

- Διοδικό laser (510-550, 670, 808 nm)
- DC Τροφοδοσία
- Κάτοπτρα
- Peltier

Το κόστος της κατασκευής ανάλογα με την επιλογή των εξαρτημάτων, εμφανίζεται στον **Πίνακα 4.5:**

<b>ΕΙΔΟΣ</b>	<b>ΑΞΙΑ</b>
Laser @ 532 nm (Pout>150mw)	585 €
Laser @ 808 nm (Pout=200mw)	680 €
Laser @ 808 nm (Pout=400mw)	715 €
Laser @ 808 nm (Pout=500mw)	395 €
Laser @ 670 nm (Pout=400mw)	228 €
Συνεχής Τροφοδοσία 3 V(2*1.5 AAA)	2 €
Κάτοπτρα- φακοί	90 €
Peltier	5 €

**Πίνακας 4.5: Επιλογή εξαρτημάτων κατασκευής.**

Το συνολικό κόστος της κατασκευής ανάλογα με το είδος του laser που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

- Laser @ 532 nm, Pout>150mw, 682 € .
- Laser @ 808 nm, Pout=200mw, 777 €.
- Laser @ 808 nm, Pout=400mw, 812 €.
- Laser @ 808 nm, Pout=500mw, 492 €.
- Laser @ 670 nm, Pout=400mw, 325 €.

Σε περίπτωση επιλογής laser μήκους κύματος @ 808 nm, υπάρχει πρόβλημα οδήγησης της ακτίνας, το οποίο επιλύεται με την τοποθέτηση δευτερεύοντος laser ορατής δέσμης, χαμηλής ισχύος.

Στον **Πίνακα 4.6**, παρουσιάζονται τα laser, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερεύοντα.

LASER	ΑΞΙΑ
532nm,1mw	\$330
532nm,3mw	\$390
635nm,1mw	\$100-295
635nm,3mw	\$110-165
635nm,5-10mw	\$120-200

**Πίνακας 4.6: Επιλογή δευτερέων laser.**

#### 4.3.2.3 Κατασκευή στείλεου σταθεροποιημένης ακτινοβολήσης βασισμένο σε πρότυπου laser pointer.

Η συγκεκριμένη σχεδίαση πλεονεκτεί λόγω μικρών διαστάσεων και βάρους, καθώς και λόγω ευχρηστίας. Τα μειονεκτήματα που εμφανίζονται και πάλι, είναι η αδυναμία ελέγχου της διάρκειας ακτινοβολήσης καθώς και η εμφάνιση υψηλής θερμοκρασίας. Προφανώς, η προτεινόμενη λύση είναι η ίδια μ' αυτή που προτάθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Για την προτεινόμενη διάταξη θα χρειαστεί:

- Διοδικό laser (510-550, 670, 808 nm),
- DC Τροφοδοσία,
- Κάτοπτρα,
- Peltier

Το κόστος της κατασκευής ανάλογα με την επιλογή των εξαρτημάτων, εμφανίζεται στον **Πίνακα 4.7**:

ΕΙΔΟΣ	ΑΞΙΑ
Laser @ 532 nm (Pout>150mw)	585 €
Laser @ 808 nm (Pout=200mw)	680 €
Laser @ 808 nm (Pout=400mw)	715 €
Laser @ 808 nm (Pout=500mw)	395 €
Laser @ 670 nm (Pout=400mw)	228 €
DC Τροφοδοσία 4.2 V (3* 1,4 EP13E)	2 €
Κάτοπτρα- φακοί	90 €
Peltier	5 €

**Πίνακας 4.7: Επιλογή εξαρτημάτων κατασκευής.**

Το συνολικό κόστος της κατασκευής ανάλογα με το είδος του laser που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

- Laser @ 532 nm, Pout>150mw, 682 € .
- Laser @ 808 nm, Pout=200mw, 777 €.
- Laser @ 808 nm, Pout=400mw, 812 €.
- Laser @ 808 nm, Pout=500mw, 492 €.
- Laser @ 670 nm, Pout=400mw, 325 €.

Σε περίπτωση επιλογής laser μήκους κύματος @ 808 nm, υπάρχει πρόβλημα οδήγησης της ακτίνας, το οποίο επιλύεται με την τοποθέτηση δευτερεύοντος laser ορατής δέσμης, χαμηλής ισχύος.

Στον **Πίνακα 4.8**, παρουσιάζονται τα laser, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερεύοντα.

LASER	ΑΞΙΑ
532nm,1mw	\$330
532nm,3mw	\$390
635nm,1mw	\$100-295
635nm,3mw	\$110-165
635nm,5-10mw	\$120-200

**Πίνακας 4.8: Επιλογή δευτερεύων laser.**

### 4.3.3 Συμπεράσματα του κεφ. 4.3

Όπως αναφέρεται στις προηγούμενες παραγράφους, και έπειτα από ανάλυση και σύγκριση η διαδικασία επιλογής της κατάλληλης διάταξης φωτοπηξίας, κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα έπρεπε να επιλεγεί ένα διοδικό laser χωρίς σύστημα οπτικής ίνας.

Ως τελική επιλογή, επικράτησε η επιλογή κατασκευή στελλειού χωρίς ελεγκτή τάσης από πρότυπο laser pointer. Ο προτεινόμενος τρόπος κατασκευής εμφανίζεται στον **Πίνακα 4.9**:



ΕΙΔΟΣ	ΑΞΙΑ
Στειλεός χωρίς ελεγκτή τάσης με laser diode (670 nm, Pout=400mw)	228 €
DC Τροφοδοσία 3 V (2* 1,5 size C)	2 €
Κάτοπτρα- φακοί	90 €
Peltier	5 €

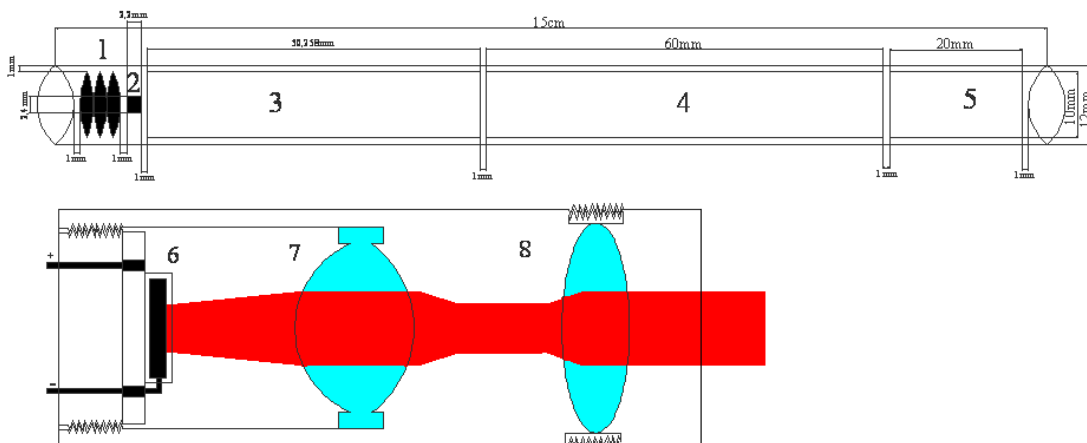
**Πίνακας 4.9: Επιλογή εξαρτημάτων κατασκευής.**

Το συνολικό κόστος της κατασκευής είναι 325 €.

Έπειτα προτιμήθηκε ασύρματος διακόπτης για τον έλεγχο λειτουργίας και τελικά προχωρήσαμε στο σχεδιασμό του τσιπ, με τα κατάλληλα εξαρτήματα.

Έτσι η κατασκευή επιβαρύνθηκε επιπλέον κατά 22,30 € και το συνολικό κόστος έφτασε στα 347,30 €.

Στην **Εικ. 4.3** εμφανίζεται η δομή του στειλεού και η δομή του laser.



**Εικ.4.3: Σχεδιασμός διοδικού laser.**

πάνω εικόνα: δομή στειλεού

1: μπαταρίες

2: διακόπτης

3: κύκλωμα ακτινοβολήσης

4: κύκλωμα τροφοδοσίας

5: τσιπ laser

Κάτω εικόνα: δομή laser

6: διοδικό laser

7: κάτοπτρο σύγκλισης

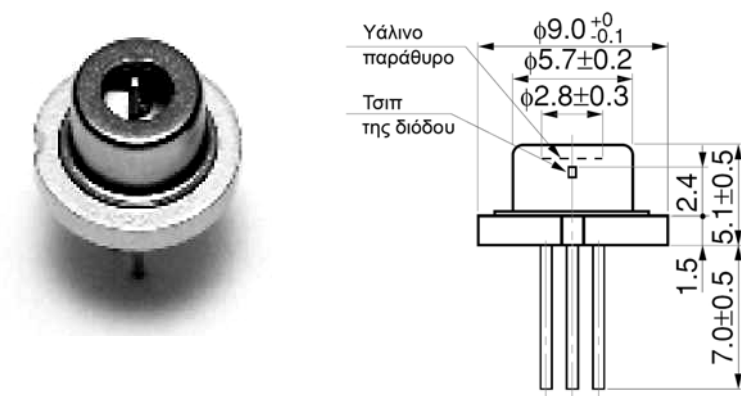
8: φακός εστίασης

#### 4.4 Τεχνολογική τεκμηρίωση της επιλογής της πηγής laser

Απ' τον **Πίνακα 4.2**, παρουσιάζονται στη συνέχεια τα βασικά χαρακτηριστικά των επικρατέστερων επιλογών.

#### 4.4.1 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.



Εικ.4.4: Διαστάσεις διοδικού laser Hamamatsu L8446-04.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της επιλογής του συγκεκριμένου laser για την χρήση του ενδοφθάλμιου σπειρώματος συνοψίζονται παρακάτω:

- **Ισχύς:** Για οφθαλμιατρικές ενδοχειρουργικές εφαρμογές, η ισχύς 1W είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική.
- **Διαστάσεις:** Η μέγιστη εξωτερική διάμετρος (9mm) επιτρέπει την τοποθέτηση του laser σε σπειρώματα επιθυμητών 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 ακτινοβολούμενο αντικείμενο. Χρειάζεται σχεδιασμός συστήματος στόχευσης, η τοποθέτηση του οποίου μέσα στον σπειρώμα αυξάνει σημαντικά τις διαστάσεις του.
- **Τιμή.** Το συγκεκριμένο laser έχει υψηλή τιμή (μεγαλύτερη των €1000) κάνοντας ουσιαστικά απαγορευτική την ανάπτυξη επιθυμητής διάταξης “μιας χρήσης”.

#### 4.4.2 LDX Optronics Model LDX-2615-660

Το συγκεκριμένο laser ακτινοβολεί στη περιοχή των 660 nm με συνεχή ακτινοβολία και ισχύ 600mW – 800mW.



Εικ.4.5: Διοδικό laser LDX Optronics Model LDX-2615-660


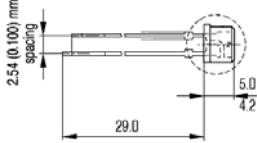

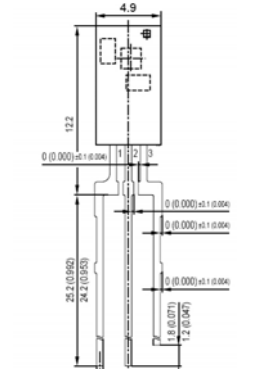
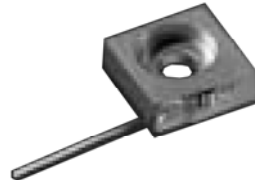
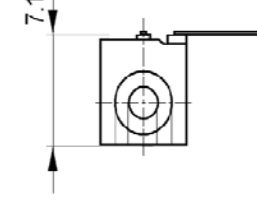
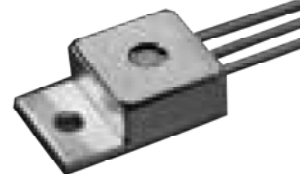
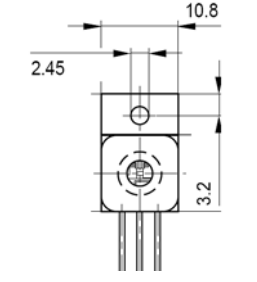
Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου είναι:

- **Ισχύς:** Η ισχύς των 600mW – 800mW καλύπτει τις ανάγκες συγκεκριμένης εφαρμογής.
- **Μήκος κύματος:** Η ακτινοβολία στην περιοχή του ορατού ( $\lambda=660\text{nm}$ ) είναι πιθανότατα η καταλληλότερη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Η σκέδαση της δέσμης από τα οπτικά μέσα του οφθαλμού είναι ελάχιστη, με ελάχιστες απώλειες της ακτινοβολίας. Επίσης, η ακτινοβολία σ' αυτό το μήκος κύματος είναι η καταλληλότερη με προϋπόθεση τη χρήση βοηθητικής δέσμης στόχευσης (pilot beam).
- **Διαστάσεις:** Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου μοντέλου οριακά αποδεκτές.
- **Τιμή.** Η τιμή του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ιδιαίτερα υψηλή (μεγαλύτερη των €1000).

Αν και η χρήση του συγκεκριμένου laser ως χειρουργικό εργαλείο “μιας χρήσης” είναι αντισυμβαλλόμενη, η πειραματική δοκιμή τέτοιου τύπου laser θα είχε ενδιαφέρον ως πιλοτική μελέτη.

#### 4.4.3 OSRAM diode lasers

Τέσσερα διαφορετικά μοντέλα της OSRAM που περιελήφθησαν στην διαδικασία μελέτης για την σχεδίαση της πειραματικής διάταξης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10.

	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	

Πίνακας 4.10: Διοδικά lasers της OSRAM.

Ως προς το κόστος, τα συγκεκριμένα διοδικά lasers της OSRAM, κρίνεται αποδεκτό για τους σκοπούς της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Τα δυο πρώτα μοντέλα του παραπάνω πίνακα αντιπροσωπεύουν τα **παλμικά διοδικά laser**. Η παλμική εκπομπή παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης χρονικών χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας σε μια ευρεία περιοχή. Στη περίπτωση διοδικού laser συνεχούς ακτινοβολήσης, αυτή η ρύθμιση είναι αδύνατη μιας και η μοναδική ρυθμιζόμενη χρονική παράμετρος είναι η διάρκεια της ακτινοβολήσης. Επίσης, στα διοδικά laser συνεχούς ακτινοβολήσης, 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.

Όσον αφορά τα δυο τελευταία μοντέλα, συνεχούς ακτινοβολίας, πρέπει να τονιστεί ότι, παρά την υψηλή ισχύ και τις σχετικά μικρές διαστάσεις, τα βασικά μειονεκτήματά τους, είναι:

- Το **μήκος κύματος** ακτινοβολίας
- Η **σχεδίαση** και των δυο μοντέλων δεν προβλέπει ενσωμάτωση του laser σε ένα κυλινδρικό περίβλημα με τη δέσμη κατευθυνόμενη κατά τον άξονα του κυλίνδρου.

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 προπτυχιακού προγράμματος περιορίζουν τις δυνατότητες ολοκλήρωσης της σύγκρισης των laser συνεχούς δράσης και των παλμικών laser. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται μόνο διοδικά laser συνεχούς δράσης.

#### **4.4.4 Laser Module (Diode Pumped Solid State Frequency Doubled)**

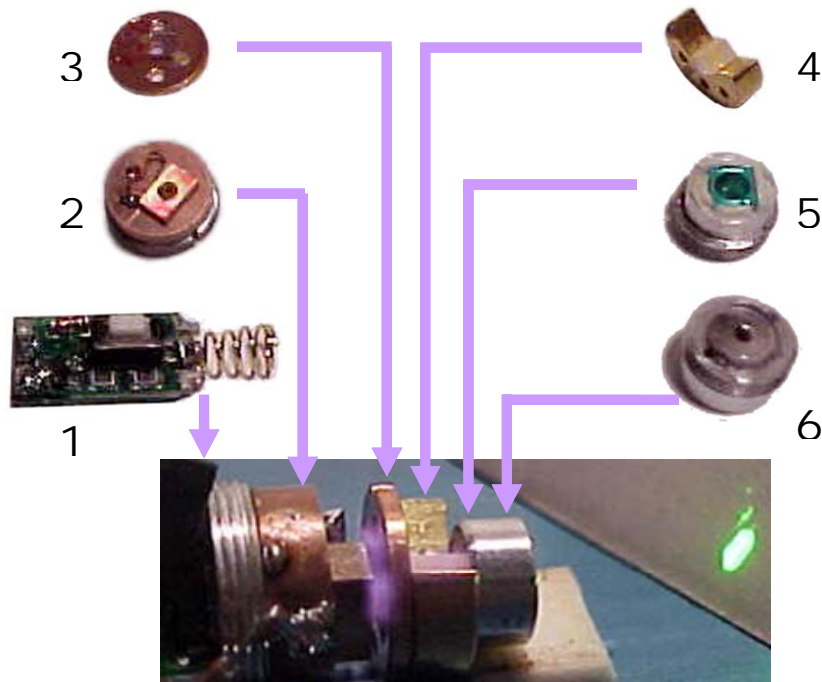
Οι τελευταίες εξελίξεις στον τομέα διοδικών laser έχουν φέρει στην αγορά μεγάλο αριθμό συσκευών με πράσινο μήκος κύματος, οι οποίες συνδυάζουν διοδικό laser με laser Νεοδυμίου, με  $\lambda=532$  nm (**Εικ.4.6**).



**Εικ.4.6: DPSSFD Laser Μοντέλο BGP-0018**

Τα βασικά τμήματα ενός DPSSFD laser (**Εικ. 4.8**), είναι:

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



**Εικ.4.7: Βασικά μέρη της συσκευής Diode Pumped Solid State Frequency Doubled (DPSSFD) Laser, συνδυασμού διοδικού Laser και laser Nd:YVO<sub>4</sub> (Yttrium Vanadate Laser).**

Τα εμπορικά πράσινα laser που είναι διαθέσιμα στην αγορά είναι κυρίως κινέζικης παραγωγής, με την εταιρία Bob Laser Company (Guandzhou, China) να προσφέρει μεγάλη ποικιλία. Ωστόσο, τα μοντέλα πράσινων laser δεν έχουν ουσιαστική διαφορά στα χαρακτηριστικά της παραγόμενης ακτινοβολίας.

Τα μοντέλα πράσινων laser που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης είναι BGP-0014, BGP-0016, BGP-0018 (**Εικ.4.6**), 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.

Σημαντικότερο πλεονέκτημά τους, αποτελεί το μήκος κύματος ( $\lambda=532\text{nm}$ ), το οποίο είναι το πιο συνηθισμένο στην οφθαλμιατρική.

Αντιθέτως, σημαντικά μειονεκτήματά τους αποτελούν η χαμηλή ισχύς ακτινοβολίας και η υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με τα κόκκινα διοδικά laser συνεχούς δράσης (**παρ. 4.4.2**), λόγω του σχετικά περίπλοκου σχεδιασμού τους.

#### 4.4.5 Διοδικά laser module (Elite Optoelectronics)

Τα απλά modules διοδικών laser είναι ευρέως γνωστά, χάρη στην διαδεδομένη χρήση δεικτών laser (laser pointers). Ωστόσο, η εμφάνιση στην αγορά των κόκκινων διοδικών laser με λειτουργικά χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης, καθυστέρησε τουλάχιστον 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 διοδικών laser ικανοποιητικών διαστάσεων ισχύος μέχρι 0,5W (Εικ4.8.1-4.8.3).



Εικ.4.8: (1) EL65C05CP2 (2) EL65D60IG2 (3) Μοντέλο EL65D05IG1

Όπως φαίνεται και στην Εικ.4.8, επειδή στις περισσότερες ενδοχειρουργικές εφαρμογές των οφθαλμιατρικών laser η ισχύς της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας σε λίγες περιπτώσεις, υπερβαίνει τα 300mW, τα διοδικά laser module της εταιρείας Elite ικανοποιούν, οριακά, τις απαιτήσεις της παρούσας μελέτης, τουλάχιστον στην πειραματική φάση της εργασίας. Η τιμή των συγκεκριμένων μοντέλων δεν υπερβαίνει τα 500 €.

#### 4.4.6 Laser Module (Changchun New Industries Optoelectronics)

Το συγκεκριμένο laser module, ακτινοβολεί στη περιοχή των 660 nm με συνεχή ακτινοβολία και ισχύ 100 mW – 300 mW (Εικ.4.9).



**Εικ.4.9: Laser Module Μοντέλο PGL-III-660/100~300 mW.**

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου είναι:

- **Ισχύς:** Η ισχύς των 300mW καλύπτει τις ανάγκες συγκεκριμένης εφαρμογής.
- **Μήκος κύματος:** Η ακτινοβολία στην περιοχή του ορατού ( $\lambda=660\text{nm}$ ) είναι πιθανότατα η καταλληλότερη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.
- **Διαστάσεις:** Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου μοντέλου είναι αρκετά ικανοποιητικές (38 x 231 mm).
- **Τιμή.** Η τιμή του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ιδιαίτερα αποδεκτή (325 €)

Τέλος, αυτό το laser module, είναι το επικρατέστερο για την επιλογή του στη συγκεκριμένη εφαρμογή, μιας και καλύπτει όλες τις απαιτήσεις.

#### **4.4.7 Συμπεράσματα του κεφ. 4.4**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης έρευνας, ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις λειτουργικές παραμέτρους των διοδικών laser, οι καταλληλότερες περιπτώσεις διοδικών laser που ανταποκρίνονται στις αρχικές απαιτήσεις της μελέτης είναι παλμικά διοδικά laser υπερύθρου ( $\lambda\approx 850\text{nm}$ ), πράσινα DPSSFD Laser ( $\lambda\approx 532\text{nm}$ ) και κόκκινα διοδικά laser συνεχούς ακτινοβολίας ( $\lambda\approx 660\text{nm}$ ). Η επιλογή οποιασδήποτε από αυτές τις τρεις κατηγορίας έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συνοπτικά:

A. Τα παλμικά laser κοντινού υπερύθρου απορρίπτονται κυρίως διότι:

- Η επιλογή τους απαιτεί την ανάπτυξη ενός 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 σε αντίστοιχες εφαρμογές. Δηλαδή, χρειάζονται κλινικές μελέτες με σκοπό τον προσδιορισμό των λειτουργικών παραμέτρων αυτών των lasers. Τέτοια μελέτη θα ήταν έγκαιρη μόνο στη περίπτωση τεκμηριωμένης ανάγκης για laser αυτής της κατηγορίας. Στην παρούσα φάση η ανάγκη για οποιαδήποτε χρήση της συγκεκριμένης κατηγορίας laser δεν έχει διευκρινιστεί. Για αυτό το λόγο, η παρούσα μελέτη οδηγείται στη χρήση των διοδικών laser συνεχούς ακτινοβολίας.

B. Στην περίπτωση των πράσινων lasers δεν εμφανίζονται οι παραπάνω περιορισμοί, μιας και η χρήση των lasers αντίστοιχου μήκους κύματος ( $\lambda=532\text{nm}$ ) είναι ευρέως διαδεδομένη 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 απ' τον βυθό του οφθαλμού και
- το σχετικά μεγάλο κόστος της διάταξης, ιδιαίτερα σε σύγκριση με ένα απλό διοδικό laser.

Τα παραπάνω μειονεκτήματα καθιστούν το πράσινο laser δεύτερη επιλογή ως πηγή ακτινοβολίας σε ενδοφθάλμιο στειλεό laser, αναδεικνύοντας τα κόκκινα διοδικά lasers συνεχούς ακτινοβολίας ως την καλύτερη επιλογή. Κάτι τέτοιο 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 μήκος κύματος  $\lambda=660\text{nm}$ , αποτελεί την βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας.

Ειδικότερα επιλέχθηκε το διοδικό laser της εταιρείας Changchun, τύπου PGL-III660

Το συγκεκριμένο laser επιλέχθηκε για τους παρακάτω λόγους :

- 1) Το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει είναι κατάλληλο για την φωτοπηξία.
- 2) Η εκπεμπόμενη ισχύς κρίθηκε αρκετά υψηλή μιας και τα 300mW θεωρήθηκαν αρκετά για την επίτευξη του επιθυμητού σκοπού :

#### Υπολογισμός της απαραίτητης ισχύος του laser

Πιο συγκεκριμένα ο υπολογισμός της επιθυμητής ισχύος έγινε με τα παρακάτω κριτήρια :

- i. Δεν υπάρχει σκέδαση λόγω του τρόπου ακτινοβολήσης (απευθείας ακτινοβολήσης).
  - ii. Η διάρκεια κάθε ακτινοβολήσης ελέγχεται απ' τον γιατρό.
- 3) Το εύρος της γραμμής είναι  $\pm 5\text{nm}$ , κάτι που σημαίνει ότι η εκπεμπόμενη δέσμη μπορεί να έχει μήκος κύματος από 655nm μέχρι 6665nm. Κάτι τέτοιο, βοηθά στην επίτευξη σημαντικών ποσοστών απορρόφησης, που κυμαίνονται από 80 μέχρι 100%.

Τα βασικά συστήματα της διάταξης όπως το ηλεκτρονικό κύκλωμα τροφοδοσίας, το διοδικό laser και το σύστημα οπτικής ανάδρασης με φωτοδίοδο που παρουσιάζονται στο μπλοκ-διάγραμμα της **Εικ.4.1** υπάρχουν στο σύστημα του laser module PGL-3. Αν κριθεί αναγκαίο θα τροποποιηθούν με σκοπό την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της δέσμης. Όσον αφορά το ηλεκτρονικό κύκλωμα ρύθμισης της διάρκειας ακτινοβολήσης και το οπτικό σύστημα με τον ακροστειλεό αυτά αναπτύσσονται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Η πορεία της ανάπτυξης αυτών των συστημάτων αναφέρεται παρακάτω.

## **4.5 Τεχνολογική τεκμηρίωση της επιλογής του διακόπτη τροφοδοσίας**

Ένα βασικό στοιχείο της λειτουργίας του laser, είναι η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση του, δηλαδή το είδος του διακόπτη που θα χρησιμοποιηθεί. Τα περισσότερα ολοκληρωμένα laser (modules) διαθέτουν ενσωματωμένο διακόπτη “on-off”, ενώ μερικά (για απλές χρήσεις) διαθέτουν διακόπτη-μπουτόν. Η χρήση διακόπτη

αυξάνει τις πιθανότητες εσφαλμένης ενεργοποίησης / απενεργοποίησης καθώς και μετατόπιση της δέσμης απ' το αρχικό σημείο ακτινοβολήσης.

Έτσι, αποφασίστηκε, η τοποθέτηση του διακόπτη εκτός διάταξης. Κάτι τέτοιο θα ήταν να δυνατόν να επιτευχθεί με τη χρήση ασύρματου διακόπτη, του οποίου ο δέκτης θα ήταν ενσωματωμένος στην διάταξη.

Οι ασύρματοι διακόπτες εκπέμπουν σε ραδιοφωνική συχνότητα (διακόπτες RF) και συγκεκριμένα σε δύο διαφορετικές περιοχές:

- Χαμηλών συχνοτήτων (300 – 400 MHz) και
- Υψηλών συχνοτήτων (1,8 – 4 GHz, διακόπτες Bluetooth)

Τα μοναδικά κριτήρια επιλογής του διακόπτη είναι οι διαστάσεις και το κόστος του. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ των παρακάτω διακοπτών:

#### **4.5.1 Garrison LK-102R2 Remote Control Switch**

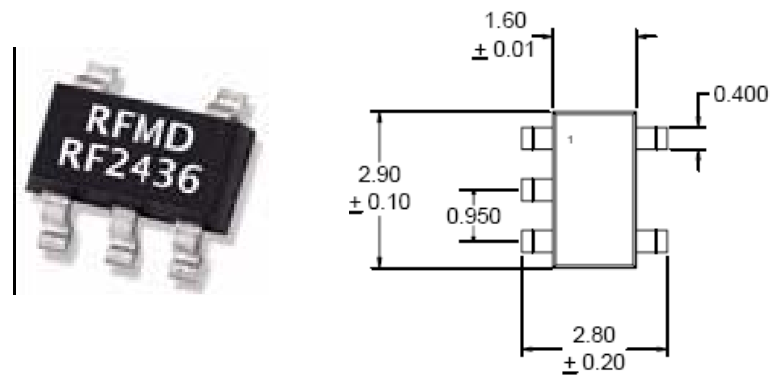
Ο συγκεκριμένος δέκτης χρειάζεται συνεχή τροφοδοσία 11-15 Volts, με ακτίνα εφαρμογής τα 30 μέτρα, συχνότητα λειτουργίας τα 300– 400 MHz και κόστος €45. Μοναδικό του μειονέκτημα, αποτελούν οι διαστάσεις του δέκτη (48W x 87L x 23D mm), που καθιστούν αδύνατη την ενσωμάτωσή του στη διάταξη.



**Εικ.4.10: Ασύρματος διακόπτης με πομπό της Garrison.**

#### **4.5.2 RFMD RF 2436**

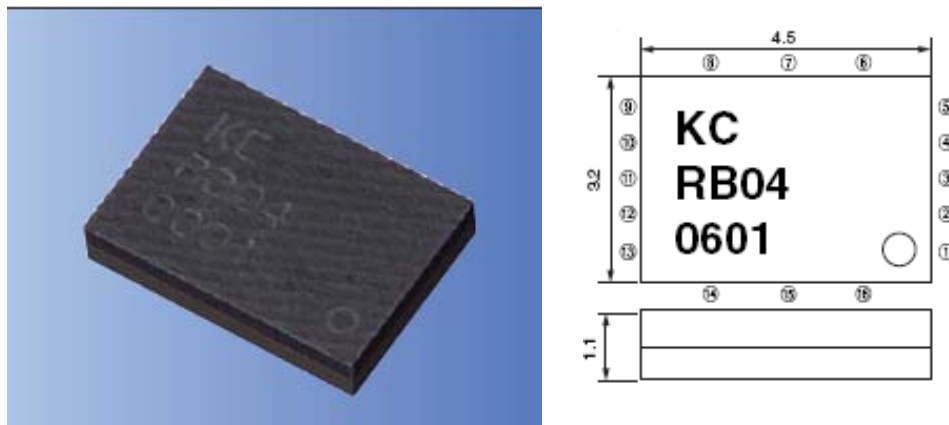
Ο συγκεκριμένος διακόπτης, έχει συχνότητα λειτουργίας 2,5 GHz. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πομπός, αλλά και ως δέκτης. Με συνεχή τάση τροφοδοσίας 0-8 Volts, εξωτερικές διαστάσεις (2,9W x 1,6L x 1,44D mm), αλλά υψηλό κόστος (\$ 40) κρίθηκε απαγορευτική πρόταση για τον χειρισμό της διάταξης.



Εικ.4.11: Διακόπτης Bluetooth (RF 2436)

### 4.5.3 Kyosera Bluetooth™ RF Modules RB04 Series

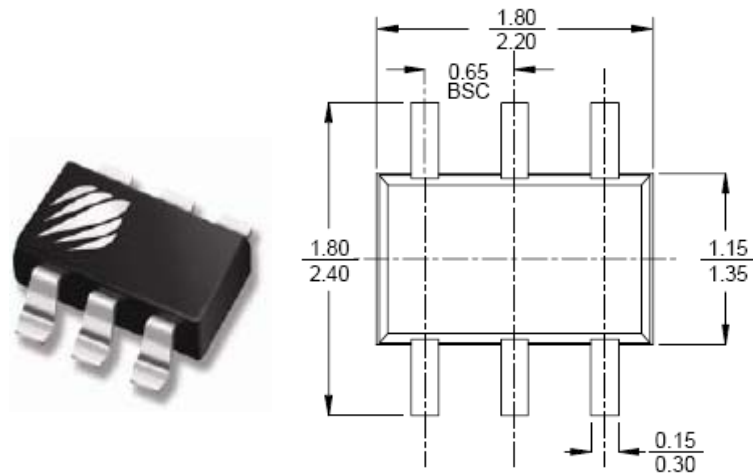
Ο διακόπτης αυτός αν και έχει ικανοποιητικές διαστάσεις (4.5×3.2×1.1mm), με συνεχή τάση τροφοδοσίας 2,2 – 3,3 Volts, εντούτοις το υψηλό κόστος (\$ 45) κρίνεται απαγορευτικό.



Εικ.4.12: Διακόπτης KC RB04

### 4.5.4 Peregrine Semiconductor PE 4259

Ο διακόπτης λειτουργεί με συχνότητα λειτουργίας μέχρι τα 3 GHz, αρκετά ικανοποιητικές διαστάσεις (2.20 × 2.40 × 1.35mm), συνεχή τάση τροφοδοσίας 2,2 – 3,3 Volts, και κόστος \$ 17, θεωρήθηκε ιδανική επιλογή για την διάταξη.



Εικ.4.13: Διακόπτης PE 4259.

Μοναδικό μειονέκτημα των παραπάνω διακοπών, είναι ότι δε συνοδεύονται από πομπό αντίστοιχης συχνότητας. Έτσι, έγινε έρευνα αγοράς και για αντίστοιχο πομπό όπου προτάθηκε η λύση του Motorola MC13146.

#### 4.5.5 Motorola MC13146

Ο συγκεκριμένος πομπός εκπέμπει στην περιοχή των 2 – 2,4 GHz. Η τροφοδοσία που απαιτείται είναι 2,7 – 6,5 Volts, οι διαστάσεις του είναι 4 x 4 mm και η τιμή του είναι \$ 5,3.

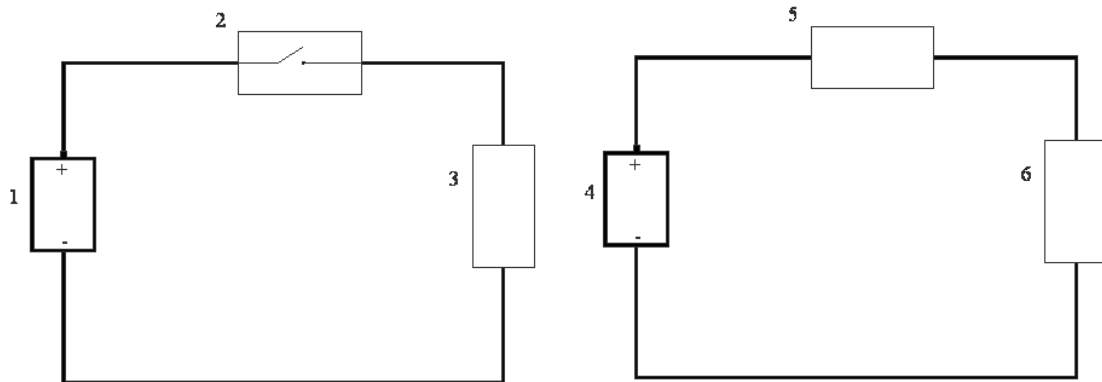


Εικ.4.14: RF πομπός MC13146.

Έχοντας ως βασικό κριτήριο επιλογής το κόστος, επιλέχθηκε ως δέκτης, ο διακόπτης της **Peregrine**. Παρακάτω φαίνεται η συνδεσμολογία του διακόπτη (Εικ.4.14). Να σημειωθεί ότι ο δέκτης, η τροφοδοσία του και το laser είναι ενσωματωμένα στη συσκευή και όπου:

- 1&4. Μπαταρίες
2. Διακόπτης
3. Πομπός

- 5. Δέκτης
- 6. Laser



Εικ.4.15: Συνδεσμολογία ασύρματου διακόπτη χειρισμού του laser.

## 4.6 Λειτουργικά χαρακτηριστικά πηγής laser

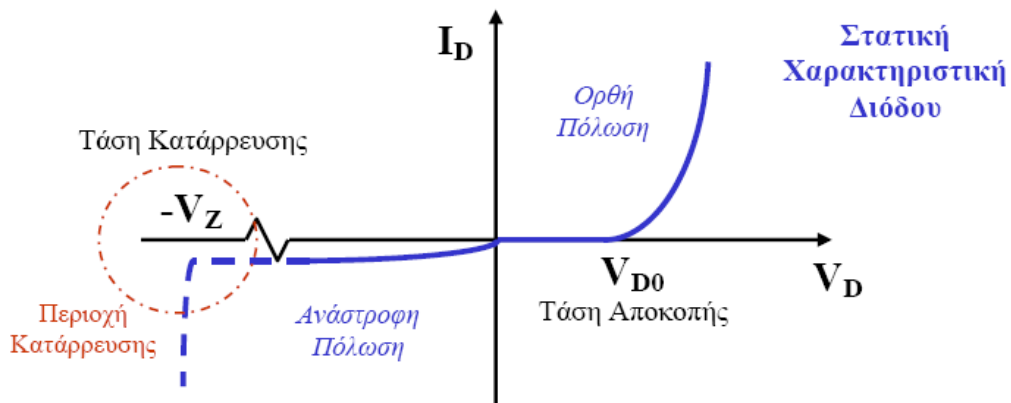
Κατά τον αρχικό σχεδιασμό της διάταξης, πραγματοποιήθηκαν τεχνικές δοκιμές σε κατάλληλο εργαστηριακό χώρο οπτικών μετρήσεων, προκειμένου να ακολουθήσει η κατασκευή του ενδοχειρουργικού laser.

Το laser, τοποθετήθηκε μαζί με τα απαραίτητα εξαρτήματα (πολωτές, μετρητής ισχύος, κλπ.) σε ειδικά στηρίγματα εργαστηριακού τραπεζιού.

Κατά τη διάρκεια των τεχνικών δοκιμών, μετρήθηκε η τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας, η οπτική ισχύς εξόδου του laser καθώς και η απόκλιση δέσμης του.

### 4.6.1 Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας

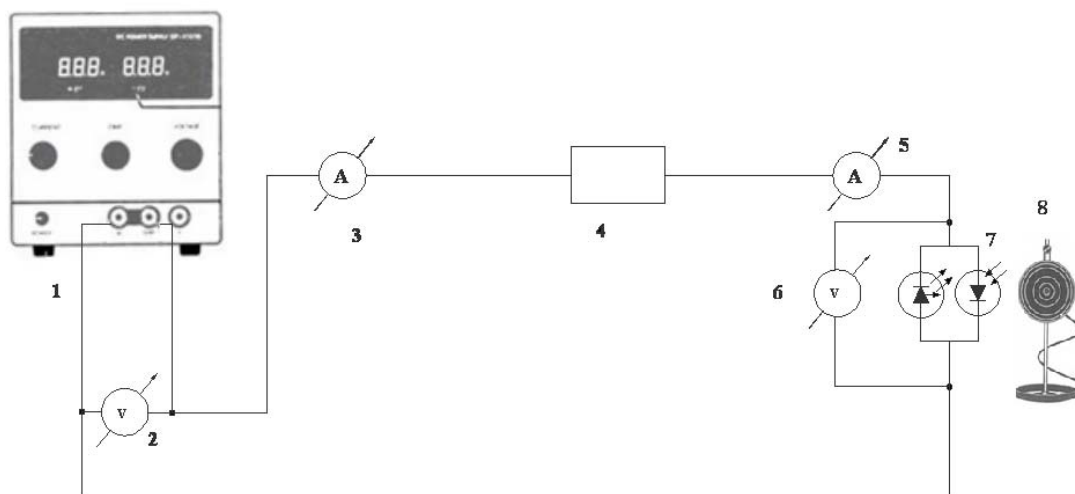
Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός διοδικού laser, είναι όμοια με αυτή μιας επαφής P-N διόδου. Η μόνη διαφορά εμφανίζεται στην τάση αποκοπής ( $V_{D0}$ ).



Εικ.4.16: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός διοδικού laser.

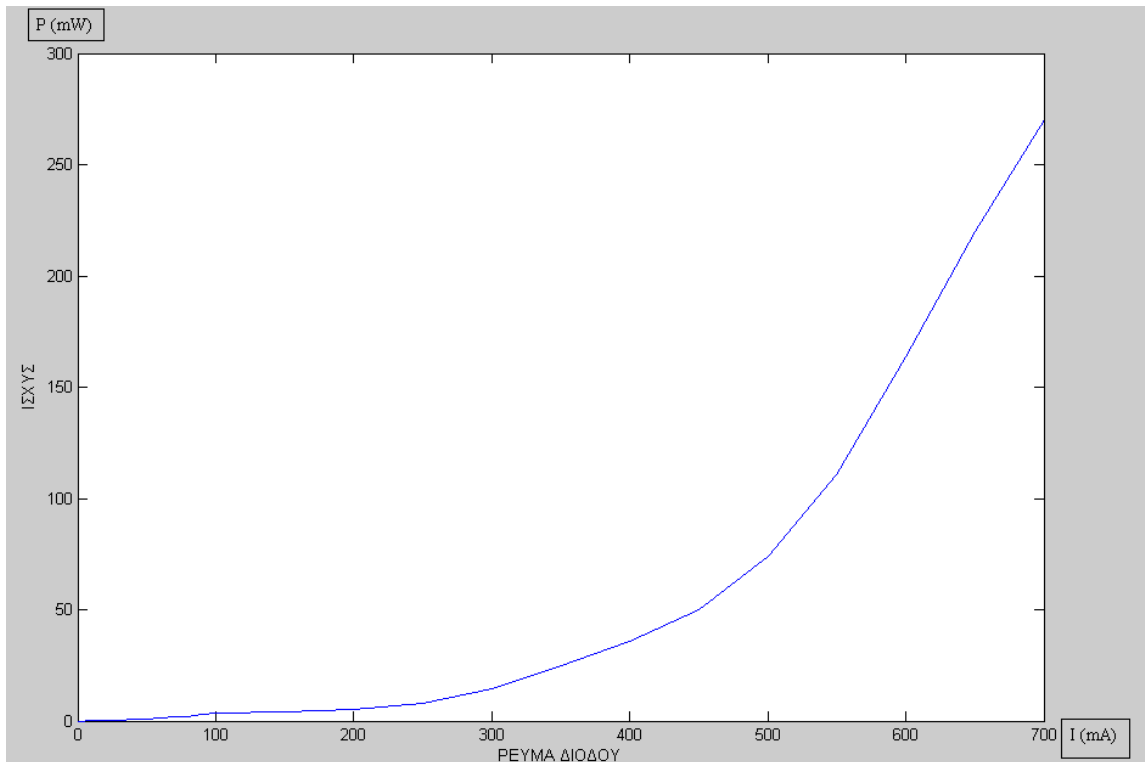
Η μέτρηση του ρεύματος κατωφλίου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του κυκλώματος της Εικ.4.17, όπου:

1. Τροφοδοτικό GP-4303 ( EZ Digital, Κορέα )
- 2&6. Βολτόμετρα
- 3&5. Αμπερόμετρα
4. Αντίσταση 22Ω/16W
7. Διοδικό laser
8. Μετρητής ισχύος LaserMate ( Coherent Inc., ΗΠΑ )



Εικ.4.17: Μέτρηση ηλεκτρικών μεγεθών του διοδικού laser.

Τα αποτελέσματα της μέτρησης απεικονίζονται στο διάγραμμα της Εικ.4.18.



**Εικ4.18: Καμπύλη ισχύος του laser συναρτήσει του ρεύματος της διόδου.**

Συμπερασματικά, 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 της **Εικ.4.18**):  $0,70 \text{ mW/mA}$ .

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  $270 \text{ mW}$ .

Η παράμετρος slope efficiency =  $\Delta P/\Delta I$  χαρακτηρίζει την απόδοση μετατροπής του ηλεκτρικού ρεύματος σε οπτική ισχύ, δηλαδή πόση αύξηση ισχύος  $\Delta P$  προκαλεί η αύξηση του ρεύματος κατά  $\Delta I$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση slope efficiency είναι περίπου  $0,70 \text{ mW/mA}$ . (Η κλίση της καμπύλης της **Εικ.4.18**).

Η τροφοδοσία της διόδου στο πείραμα ήταν  $2,0 \text{ V}$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη δίοδος είναι πολύ ευαίσθητη στη μεταβολή της τάσης: αύξηση της τάσης κατά μερικά δέκατα του  $\text{V}$  προκαλούσε αύξηση της ισχύος κατά σχεδόν  $100 \text{ mW}$ . Παράλληλα παρατηρήθηκε αύξηση του ρεύματος κατωφλίου κατά περίπου  $10$



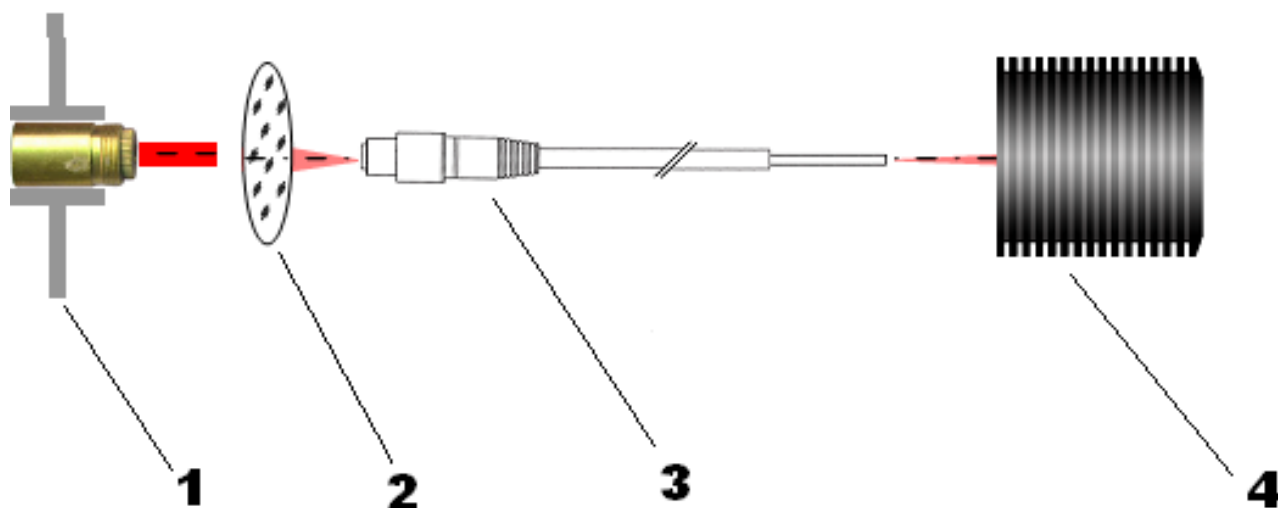
mA. Αυτή η πειραματική παρατήρηση χρησιμοποιήθηκε στην επόμενη φάση για ρύθμιση της ισχύος εξόδου σε συνάρτηση με τη ρύθμιση της τάσης.

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

Στην **Εικ.4.19**, φαίνεται το σχέδιο της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε στις αρχικές πειραματικές δοκιμές.

Όπου,

1. Μονάδα laser τοποθετημένη σε ευθυγραμμισμένο στήριγμα
2. Φακός εστίασης της δέσμης στην είσοδο οπτικής ίνας
3. Οπτική ίνα
4. Κεφαλή του μετρητή ισχύος Coherent Lasermate.



**Εικ. 4.19:** Πειραματική διάταξη.

Πατώντας το διακόπτη, 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

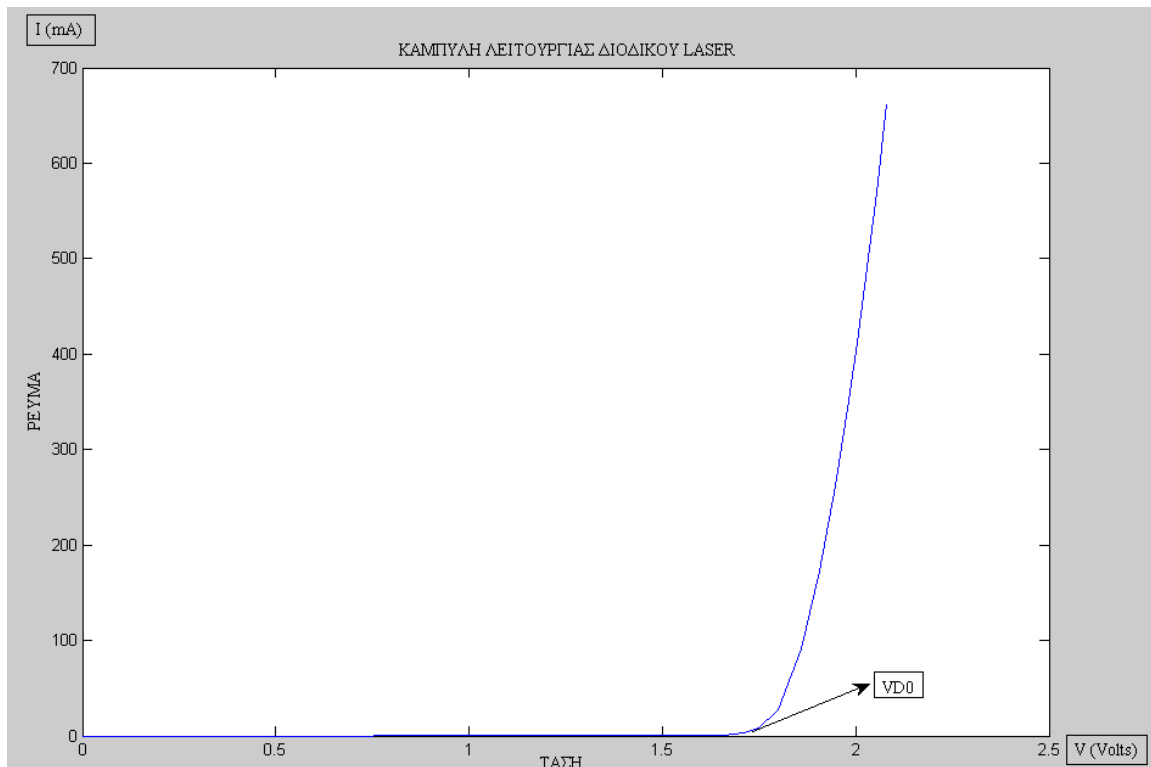
απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα και οι τιμές της έκθεσης καθορίστηκαν στα 0.05 s, 0.1 s, 0.15 s και 0.2 s.

Ο φακός (2) εστιάζει τη δέσμη πάνω στην είσοδο της οπτικής ίνας (3). 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.

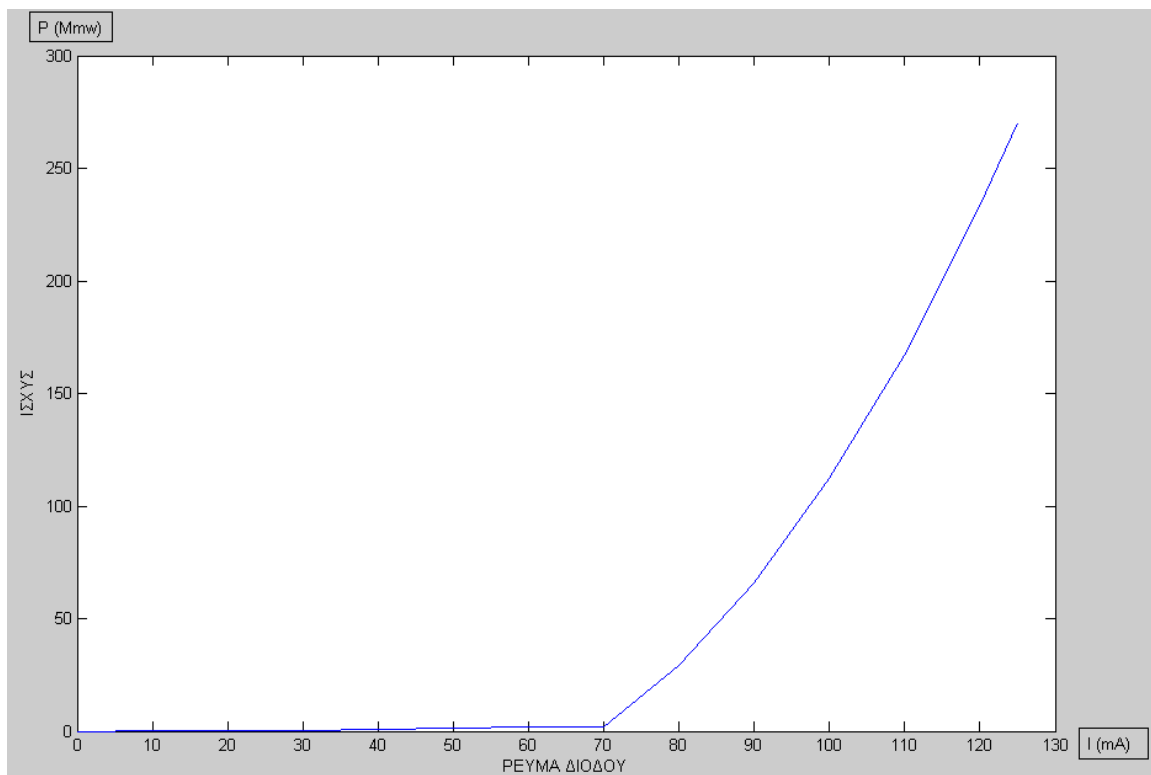
Το γεγονός ότι η οπτική ίνα συμπεριλαμβάνεται στη πειραματική διάταξη οφείλεται στο ότι η συσκευή προορίζεται για ενδοφθάλμια χρήση. Η είσοδος της δέσμης στον οφθαλμό και η μεταφορά της στον ακτινοβολούμενο ιστό πραγματοποιείται από το εμπρός άκρο της συσκευής. Για αυτό το σκοπό στο μπροστινό άκρο του υπό ανάπτυξη σπειρώματος θα τοποθετηθεί ένα μικρό (περίπου 3-4 cm) τμήμα οπτικής ίνας (**Εικ.4.7, Εικ.4.19**).

Ο μετρητής ισχύος (4) (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.

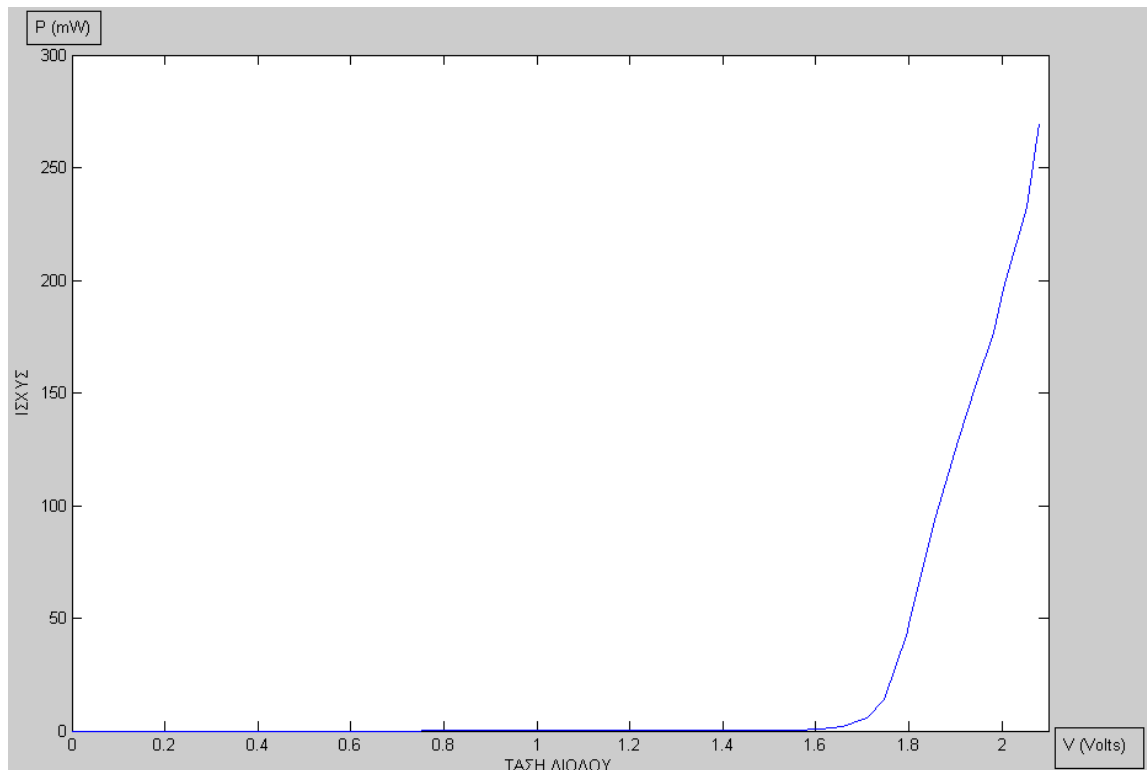
Στη συνέχεια, μετρήθηκε το laser, χωρίς την υποστήριξη του από το κύκλωμα λειτουργίας του και τα οπτικά του εξαρτήματα. Η συμπεριφορά λειτουργίας του εμφανίζεται στις **Εικ.4.20, Εικ.4.21, Εικ.4.22**.



Εικ4.20: Καμπύλη λειτουργίας διοδικού laser.



Εικ4.21: Καμπύλη ισχύος του laser συναρτήσει του ρεύματος της διόδου.



**Εικ.4.22: Καμπύλη ισχύος του laser συναρτήσει της τάσης της διόδου.**

Εδώ, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του laser είναι:

- Ρεύμα κατωφλίου:  $I_{th} \approx 70 \text{ mA}$
- Ρεύμα λειτουργίας:  $I_{op} \approx 125 \text{ mA}$
- Slope efficiency (κλίση της καμπύλης της **Εικ.4.21**):  $0,27 \text{ mW/mA}$

Συμπερασματικά, με την απουσία του κυκλώματος λειτουργίας του, το ρεύμα κατωφλίου μπορεί να επιτευχθεί πιο γρήγορα και έχει μικρότερη τιμή. Τέλος, η συνεχή λειτουργία του laser ελαττώνει απότομα τη διάρκεια ζωής του laser.

#### 4.6.2 Υπολογισμός απόκλισης δέσμης

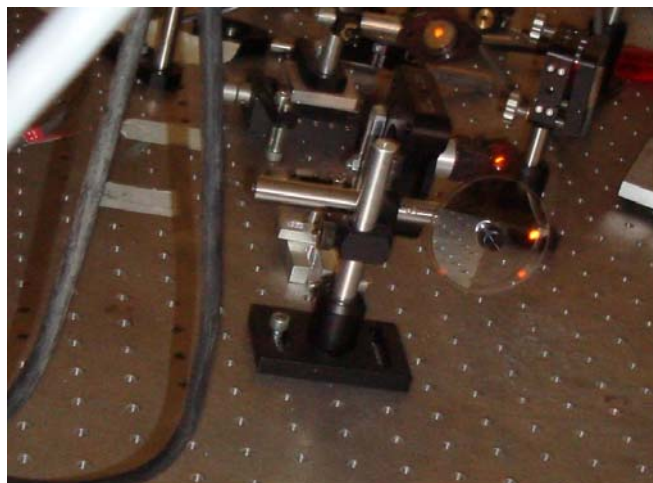
Η απόκλιση δέσμης ενός laser, αποτελεί την μονάδα μέτρησης για το πόσο γρήγορα διευρύνεται η δέσμη θεωρώντας ως βάση της μέτρησης, το μέσο της δέσμης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμη και μικρή απόκλιση δέσμης μπορεί να είναι σημαντική. Οι δέσμες με πολύ μικρή απόκλιση, δηλαδή με σταθερή περίπου ακτίνα δέσμης σε σημαντικές αποστάσεις διάδοσης, καλούνται ευθυγραμμισμένες ακτίνες.

- **Μεθοδολογία μέτρησης της απόκλισης της δέσμης**

Για τη μέτρηση της απόκλισης δέσμης, χρησιμοποιούνται συνήθως φίλτρα ακτινοβολίας με διαφορετική διαπερατότητα. Αρχικά, η δέσμη διαπερνά ένα φίλτρο με διαπερατότητα 50% (Εικ.4.23). Στη συνέχεια, τοποθετούνται κατά μήκος της δέσμης, πρόσθετα φίλτρα με διάφορες διαπερατότητες ή ένα περιστρεφόμενο κυλινδρικό φίλτρο<sup>6</sup> (Εικ.4.24), μέχρι να “σβήσει” η δέσμη. Μόλις “σβήσει” η δέσμη, αφαιρείται το φίλτρο διαπερατότητας 50%, και υπολογίζεται βάσει των υπόλοιπων φίλτρων, η απόκλιση δέσμης.



**Εικ.4.23: Φίλτρο ακτινοβολίας με 50% διαπερατότητα.**



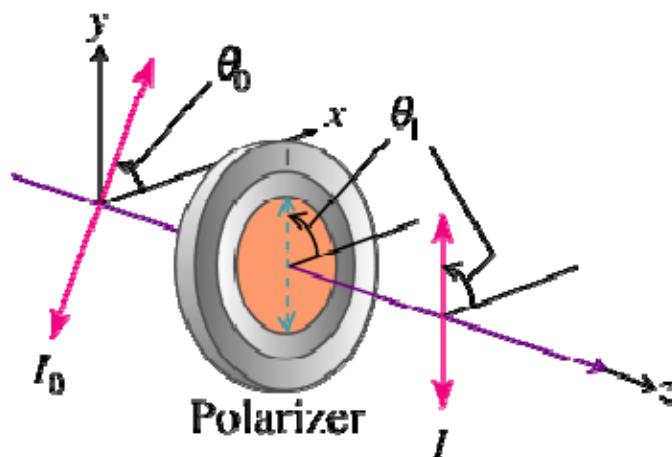
**Εικ.4.24: Κυλινδρικό φίλτρο ακτινοβολίας. Είναι εμφανείς οι διάφορες περιοχές διαπερατότητας.**

Επίσης, η απόκλιση δέσμης μπορεί να υπολογιστεί, χρησιμοποιώντας πολωτή. Ένας πολωτής, είναι μια συσκευή που μετατρέπει μία μη πολωμένη ή ανάμικτη δέσμη πόλωσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (π.χ. φως) σε μία δέσμη ενιαίας κατάστασης (συνήθως μια ενιαία γραμμική πόλωση). Οι πολωτές χρησιμοποιούνται

---

<sup>6</sup> Είναι καταναμημένο σε περιοχές διαφόρων ποσοστών διαπερατότητας (από 100% μέχρι 1%).

σε πολλές οπτικές τεχνικές και όργανα, και τα φίλτρα πόλωσης βρίσκουν τις εφαρμογές στην τεχνολογία φωτογραφίας και υγρής επίδειξης κρυστάλλου. Οι πολωτές μπορούν να διαιρεθούν σε δύο γενικές κατηγορίες: πολωτές απορρόφησης (ή γραμμικοί πολωτές), όπου οι ανεπιθύμητες καταστάσεις πόλωσης απορροφώνται από τη συσκευή, και πολωτές διάσπασης δέσμης, όπου η μη πολωμένη δέσμη, είναι χωρισμένη σε δύο δέσμες, με αντίθετες καταστάσεις πόλωσης.



Εικ.4.25: Γραμμικός Πολωτής.

Στη παρούσα έρευνα, η απόκλιση δέσμης υπολογίστηκε με τη βοήθεια δύο πολωτών απορρόφησης δέσμης (Εικ.4.26).



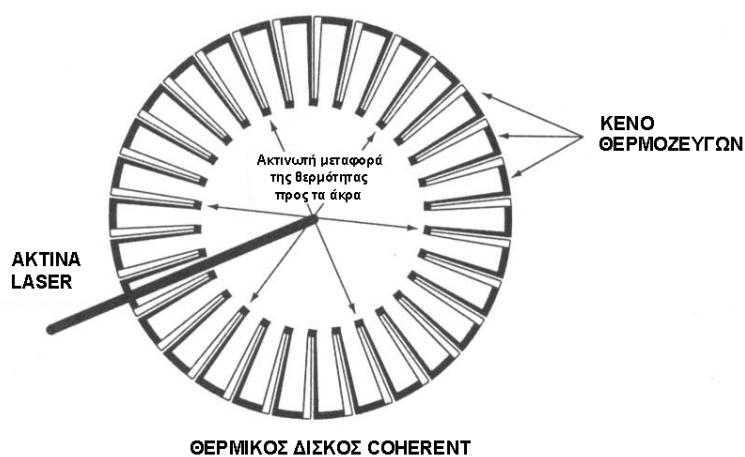
Εικ.4.26: Πολωτής απορρόφησης δέσμης.

Αρχικά, μετρήθηκε η οπτική ισχύ του διοδικού laser που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια, ρυθμίστηκε ο ένας πολωτής, έτσι ώστε να μειωθεί η οπτική ισχύς του laser, κατά 50%. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον μετρητή ισχύος Laser Mate.

- **Μετρητής ισχύος**

Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στη ύπαρξη θερμοζευγών. Κάθε θερμοζεύγος παράγει μια τάση ανάλογη της θερμοκρασιακής του διαφοροποίησης. Όταν τα θερμοζεύγη είναι στην ίδια θερμοκρασία, το άθροισμα των παραγόμενων τάσεων είναι μηδέν. Όταν ο θερμικός δίσκος θερμαίνεται από την ενέργεια του laser, η θερμότητα μεταφέρεται ακτινωτά απ' το κέντρο στο άκρο του δίσκου, δημιουργώντας μια θερμοκρασιακή κλίμακα.

Ο συμμετρικός σχεδιασμός του θερμικού δίσκου αυτόματα κάνει την αναπαράσταση της δέσμης, χωρίς να είναι απαραίτητη η ανάγκη ευθυγράμμισης της ακτίνας (Εικ.4.27 & Εικ.4.28).



Εικ.4.27: Σχηματικό διάγραμμα μετρητή ισχύος.



Εικ.4.28: Σύστημα καταγραφής ισχύος laser

Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετρητή ισχύος φαίνονται παρακάτω:

Μετρούμενο μήκος κύματος:	0.25 – 1.5μm
Κλίμακες μέτρησης:	0.003, 0.01, 0.1, 0.3, 1Watt
Ταχύτητα ανταπόκρισης(ρυθμιζόμενη):	<1sec
Ακρίβεια:	± 5%
Διάμετρος της μετρούμενης δέσμης:	0.97cm
Διάμετρος κεφαλής:	6.99cm
Εμβαδόν επιφάνειας αισθητήρα:	0.64cm <sup>2</sup>
Μέγιστη ισχύς ακτινοβολίας:	1 Watt
Μέγιστη πυκνότητα ισχύς:	200Wcm <sup>2</sup>

Η διαδικασία ρύθμισης του πολωτή, φαίνεται στις **Εικ.4.29** και **Εικ.4.30** :



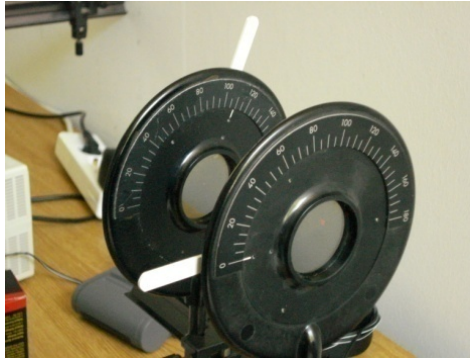
**Εικ.4.29: Μέτρηση οπτικής ισχύος διοδικού laser.**



**Εικ.4.30: Μείωση της οπτικής ισχύς κατά 50%.**

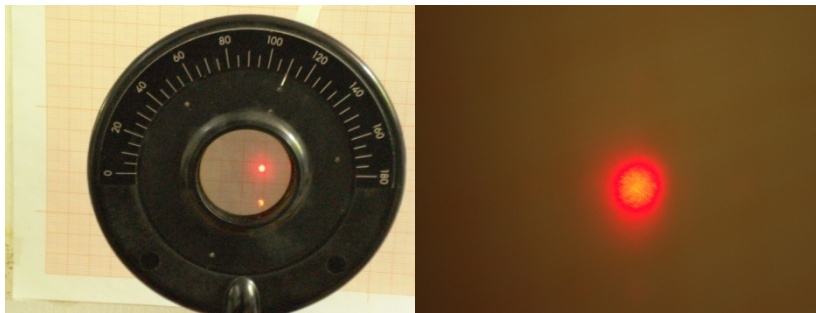
Έπειτα, προστέθηκε ο δεύτερος πολωτής κατά μήκος του πρώτου, και ρυθμίστηκε έτσι ώστε να “σβήσει” η δέσμη του laser που διαπερνάει τους δύο πολωτές.





**Εικ.4.31:Ρύθμιση δεύτερου πολωτή.**

Κατόπιν, αφαιρέθηκε ο πρώτος πολωτής και μετρήθηκε η διάμετρος της δέσμης που διαπερνούσε το δεύτερο πολωτή σε δύο διαφορετικές αποστάσεις από το laser, 3,3 και 4,45 μέτρα, αντίστοιχα.



**Εικ.4.32: Ακτινοβολία στα 3,3 μέτρα.**



**Εικ.4.33: Ακτινοβολία στα 4,45 μέτρα.**

- **Υπολογισμός της γωνίας απόκλισης της δέσμης**

Η γωνία απόκλισης μπορεί να υπολογιστεί από το τύπο:

$$\theta = \frac{d_2 - d_1}{l_2 - l_1}$$

όπου  $l_1, l_2$  είναι οι αποστάσεις ακτινοβολίας και  $d_1, d_2$  οι διάμετροι για τις αντίστοιχες αποστάσεις.

Για  $l_1=3,3$  m προκύπτει  $d_1=5,4$  mm και για  $l_2=4,45$  m προκύπτει  $d_2=7,3$  mm.

Επομένως:

$$\theta = \frac{d_2 - d_1}{l_2 - l_1} = \frac{7,3\text{mm} - 5,4\text{mm}}{4,45\text{m} - 3,3\text{m}} = \frac{1,9\text{mm}}{1,15\text{m}} = 1,652 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \quad \text{ή} \quad 94,66 \cdot 10^{-3} \text{ μοίρες.}$$

- **Αποτελέσματα**

Τα διοδικά lasers έχουν απόκλιση δέσμης 0,8-2,5 mrad. Συγκεκριμένα, τα περισσότερα ενδοχειρουργικά laser έχουν απόκλιση γύρω στα 1,5 mrad. Επομένως, το συγκεκριμένο laser, είναι αρκετά ικανοποιητικό.

#### 4.7 Δοκιμαστικές μετρήσεις και δείγματα ακτινοβόλησης

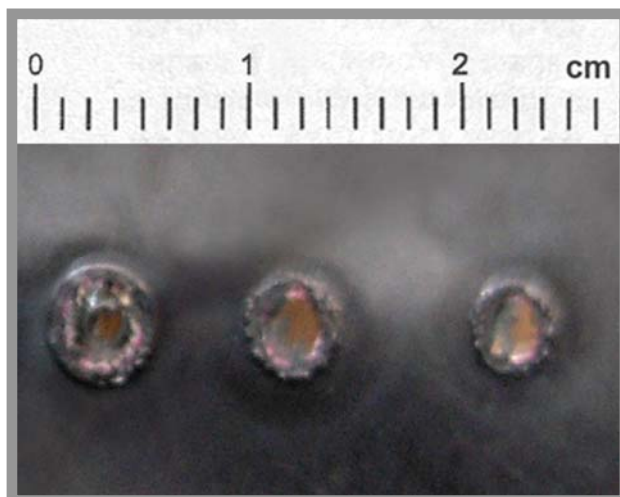
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, η μέγιστη ισχύς της δέσμης laser στην είσοδο της οπτικής ίνας είναι 270 mW. Πρέπει να σημειωθεί ότι η υπέρβαση του ορίου ασφαλείας του ρεύματος λειτουργίας (**Εικ.4.18**) θα μπορούσε να αυξήσει την ισχύ της δέσμης μέχρι 300 mW, αλλά θα είχε ως αποτέλεσμα πρόωρη, 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, θεωρείται 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 δέσμης κ.α. Χαρακτηριστικά δείγματα

ακτινοβόλησης για τρία διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας ισχύος η οποία καθορίστηκε με κατάλληλη ρύθμιση καθώς και τα αποτελέσματα της ακτινοβόλησης για κάθε ρύθμιση, παρουσιάζονται στην **Εικ.4.34**.



**Εικ.4.34:** Δείγματα δοκιμαστικής ακτινοβόλησης αποτυπωτικού χαρτιού (καρμπόν). Η πυκνότητα ισχύος αυξάνεται προς δεξιά.

#### 4.7.1 Συμπεράσματα κεφ. 4.7

- **Επιλογή του συνεχούς ακτινοβόλησης.**

Η συνεχής ακτινοβόληση αποτελεί την συνηθέστερη επιλογή σε περιπτώσεις ακτινοβόλησης των ιστών του βυθού. Ωστόσο, η επιλογή παλμικής λειτουργίας μπορεί να προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα όσον αφορά τον σχεδιασμό της διάταξης και ιδιαίτερα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων της. Η μελέτη των δυνατοτήτων των παλμικών lasers αποτελεί μία από τις επόμενες φάσεις της μελέτης.

- **Επιλογή του συστήματος χειρισμού τροφοδοσίας.**

Ο αρχικός σχεδιασμός του πειραματικού πρωτοτύπου προέβλεπε χρήση ενός ηλεκτρομαγνητικού σωληνοειδούς με κινούμενο φωτοφράκτη για έλεγχο της ακτινοβόλησης. Οι δοκιμές αυτής της λύσης στον οπτικό πάγκο αποκάλυψαν αρκετά προβλήματα όπως η μείωση της ακρίβειας ακτινοβόλησης λόγω δόνησης, έλλειψη

χώρου στο στειλεό για την τοποθέτηση του σωληνοειδούς και κυρίως την ανάγκη σχεδίασης 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. Η χρήση ασύρματου διακόπτη εξασφαλίζει μέγιστη ασφάλεια σε σχέση με έναν ενσωματωμένο διακόπτη στη συσκευή (κίνδυνος αστάθειας χειρισμού) και έναν διακόπτη δαπέδου, χωρίς να αυξάνει σημαντικά το κόστος της διάταξης.

#### **4.8 Συμπεράσματα**

**Σκοπός** της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας πειραματικής διάταξης με διοδικό laser, κατάλληλης για ενδοχειρουργική χρήση σε οφθαλμολογικές επεμβάσεις. Η διάταξη σχεδιάστηκε με δυνατότητα εισαγωγής στο οπίσθιο τμήμα του οφθαλμού για ακτινοβολία του αμφιβληστροειδούς (φωτοπηξία). Υλοποιήθηκε, δηλαδή η φάση της ανάπτυξης και αξιολόγησης του πειραματικού προτύπου της διάταξης.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ανάλυση των απαιτούμενων επιθυμητών λειτουργικών χαρακτηριστικών χειρουργικών συσκευών με διοδικό laser, βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και πηγών διαδικτύου.

Ακολούθησε διεξοδική μελέτη των δυνατοτήτων και λειτουργικών παραμέτρων των υπάρχοντων διοδικών laser και επιλέχθηκε μοντέλο διοδικού laser με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Τα βασικά κριτήρια επιλογής ήταν το μήκος κύματος (660nm), η ισχύς (300mW), το είδος ακτινοβολίας, η απόκλιση της δέσμης ( $< 5$  mrad), οι διαστάσεις και το κόστος. Επιλέχθηκε επίσης και κατάλληλο σύστημα ελέγχου και χειρισμού της διάταξης, ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο εύχρηστη.

Η επιλογή διοδικού laser κόκκινου μήκους κύματος το οποίο διαθέτει ικανοποιητική ισχύς, έχει μικρότερη σκέδαση και δεν χρειάζεται την προσθήκη συστήματος στόχευσης. Η εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη laser συνεχούς ακτινοβολίας. Η πηγή ακτινοβολίας (laser) καθώς και ο ασύρματος διακόπτης

χειρισμού που επιλέχθηκαν, έχουν μικρές διαστάσεις και χαμηλό κόστος, αποφεύγοντας τη χρήση καλωδίων τροφοδοσίας.

Τέλος πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός και οι δοκιμές του πειραματικού προτύπου. Οι πειραματικές δοκιμές της συσκευής πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό χώρο με κατάλληλο εξοπλισμών οπτικών μετρήσεων. Καταγράφηκε η καμπύλη ισχύος της διάταξης, το κατώφλι έντασης και τάσης της διάταξης καθώς και η απόκλιση της δέσμης. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Βιβλία

- I. O. Svelto, Αρχές των lasers, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1984
- II. Α.Α.Σεραφεινίδης, Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1989
- III. Matt Young, Οπτική και Lasers, εκδόσεις Παρατήρητης, Αθήνα 1986
- IV. Mark Csele, Fundamentals of light sources and lasers, 2004
- V. David R. Goff, Οπτικές ίνες-ένας πρακτικός οδηγός, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Αθήνα 1999
- VI. Αλέξανδρος Αλεξανδρή, Οπτικές ίνες, εκδόσεις ΙΩΝ, 2001
- VII. Ι.Κολιόπουλου, Οφθαλμολογία-Στοιχειώδεις γνώσεις, Επιστημονικές εκδόσεις Γρηγ. Κ. Παρισιάνου, Αθήνα 1989
- VIII. Σαχίνη-Καρδάση Άννα, Πάνου Μαρία, Παθολογική και χειρουργική νοσηλευτική, Νοσηλευτικές διαδικασίες, ΒΗΤΑ Ιατρικές εκδόσεις Μονοπρόσωπη ΕΠΕ, Αθήνα 1997

### Διευθύνσεις Internet

- 
- 1 [www.elliotscientific.com](http://www.elliotscientific.com)
  - 2 [www.aculight.com](http://www.aculight.com)
  - 3 [www.alfalight.com](http://www.alfalight.com)
  - 4 [www.bwtek.com](http://www.bwtek.com)
  - 5 [www.coherent.com](http://www.coherent.com)
  - 6 [www.crystalaser.com](http://www.crystalaser.com)
  - 7 [www.kenteklaserstore.com](http://www.kenteklaserstore.com)
  - 8 [www.newport.com](http://www.newport.com)
  - 9 [www.powertechnology.com](http://www.powertechnology.com)
  - 10 [www.sacher-laser.com](http://www.sacher-laser.com)
  - 11 [www.visionlighttech.com](http://www.visionlighttech.com)
  - 12 [www.ealingcatalog.com](http://www.ealingcatalog.com)
  - 13 [www.edmundoptics.com/US](http://www.edmundoptics.com/US)
  - 14 [www.egismos.com](http://www.egismos.com)
  - 15 [www.eoc-inc.com](http://www.eoc-inc.com)
  - 16 [www.furukawaamerica.com](http://www.furukawaamerica.com)
  - 17 [www.lasermate.com](http://www.lasermate.com)
  - 18 [www.mellesgriot.com](http://www.mellesgriot.com)
  - 19 [www.roithner-laser.com](http://www.roithner-laser.com)
  - 20 [www.sharpsma.com](http://www.sharpsma.com)
  - 21 [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com)
  - 22 [www.toweroptical.com](http://www.toweroptical.com)
  - 23 [www.covega.com](http://www.covega.com)
  - 24 [www.awi-industries.com](http://www.awi-industries.com)
  - 25 [www.bea-eo.com](http://www.bea-eo.com)
  - 26 [www.bostonlaserinc.com](http://www.bostonlaserinc.com)

---

27 [www.calpaclasers.com](http://www.calpaclasers.com)  
28 [www.jameco.com](http://www.jameco.com)  
29 [www.quarton.com](http://www.quarton.com)  
30 [www.snakecreeklasers.com](http://www.snakecreeklasers.com)  
31 [www.aocepi.com](http://www.aocepi.com)  
32 [www.appointech.com](http://www.appointech.com)  
33 [www.avaseamerica.com](http://www.avaseamerica.com)  
34 [www.bookham.com](http://www.bookham.com)  
35 [www.cdHITEC.com](http://www.cdHITEC.com)  
36 [www.digykey.com](http://www.digykey.com)  
37 [www.fibercore.com](http://www.fibercore.com)  
38 [www.firstphase.com](http://www.firstphase.com)  
39 [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)  
40 [www.jdeclaser.com](http://www.jdeclaser.com)  
41 [www.nvginc.com](http://www.nvginc.com)  
42 [www.opticalfibersystems.com](http://www.opticalfibersystems.com)  
43 [www.qphotonics.com](http://www.qphotonics.com)  
44 [www.rohmelectronics.com](http://www.rohmelectronics.com)  
45 [www.rolyn.com](http://www.rolyn.com)  
46 [www.rpmclasers.com](http://www.rpmclasers.com)  
47 [www.us-lasers.com](http://www.us-lasers.com)  
48 [www.wholesaleforeveryone.com](http://www.wholesaleforeveryone.com)  
49 [www.applied-optronics.com](http://www.applied-optronics.com)  
50 [www.gsiglasers.com](http://www.gsiglasers.com)  
51 [www.intenseco.com](http://www.intenseco.com)  
52 [www.osram-os.com](http://www.osram-os.com)  
53 [www.adopco.com](http://www.adopco.com)  
54 [www.apogeephotonics.com](http://www.apogeephotonics.com)  
55 [www.archcomtech.com](http://www.archcomtech.com)  
56 [www.avap.ch](http://www.avap.ch)  
57 [www.diodelaserconcepts.com](http://www.diodelaserconcepts.com)  
58 [www.dmgtechusa.com](http://www.dmgtechusa.com)  
59 [www.excelight.com](http://www.excelight.com)  
60 [www.sarnoff.com](http://www.sarnoff.com)  
61 [www.axcelphotonics.com](http://www.axcelphotonics.com)  
62 [www.sony.net](http://www.sony.net)  
63 [www.em4inc.com](http://www.em4inc.com)  
64 [www.coherentic.com](http://www.coherentic.com)  
65 [www.indyretina.com](http://www.indyretina.com)  
66 [www.retinamd.com](http://www.retinamd.com)  
67 [www.visudyne.com](http://www.visudyne.com)  
68 [www.revopth.com](http://www.revopth.com)  
69 [www.findarticles.com](http://www.findarticles.com)  
70 [www.iredex.com](http://www.iredex.com)  
71 [www.medline.gr](http://www.medline.gr)  
72 [www.iatriki.gr](http://www.iatriki.gr)  
73 [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)  
74 [www.intelite.com](http://www.intelite.com)  
75 [www.blueskyresearch.com](http://www.blueskyresearch.com)  
76 [www.laser2000.co.uk](http://www.laser2000.co.uk)  
77 [www.phys.ksu.edu/](http://www.phys.ksu.edu/)  
78 [www.coherent.co.jp/](http://www.coherent.co.jp/)  
79 [www.optima-optics.com](http://www.optima-optics.com)  
80 [www.rp-photonics.com/encyclopedia.html](http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html)  
81 [www.scholar.lib.vt.edu](http://www.scholar.lib.vt.edu)  
82 [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)  
83 [www.laserfocusworld.com](http://www.laserfocusworld.com)