



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

LASER ΣΤΗΝ ΟΠΤΙΚΗ & ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑ

ΠΑΠΑΛΑΤΟΥ ΕΛΕΝΗ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΟΛΥΖΟΣ

ΑΙΓΙΟ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία με θέμα τα lasers και την εφαρμογή τους στην οπτομετρία και την οφθαλμολογία γενικότερα αποτελεί το θέμα της πτυχιακής εργασίας που με απασχόλησε στο τελευταίο εξάμηνο σπουδών στο τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας του ΤΕΙ Πατρών που λειτουργεί στο Αίγιο από το 2007.

Τα lasers και η εφαρμογές τους στην επιστήμη της όρασης αποτελούν ένα συγκερασμό ιατρικής και φυσικής με εντυπωσιακά όπως προέκυψαν από την έρευνα μου αποτελέσματα. Τα laser στην οφθαλμολογία είναι η αιχμή της επιστήμης για την αντιμετώπιση μιας πληθώρας διαθλαστικών και οφθαλμικών παθήσεων και η τεχνολογία τους διαρκώς εξελίσσεται.

Η παρούσα εργασία πέραν της γνώσης και της εμπειρίας που μου προσέφερε λειτούργησε σαν εφαλτήριο για την συνέχιση των σπουδών μου με σωστές βάσεις σε μεταπτυχιακό επίπεδο. Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτον απ' όλους τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Πολύζο που μου ανέθεσε αυτό το θέμα και τον κ. Γεώργιο Λαγουμιντζή επίσης καθηγητή του τμήματος για την υποστήριξη και τη βοήθεια στην επιλογή θέματος.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και όλους τους φίλους και φίλες που με στήριξαν σε αυτή μου την προσπάθεια.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους σας,

Ελένη Παπαδάτου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία των lasers έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα στις τελευταίες δεκαετίες και τα επιτεύγματα της εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς συμπεριλαμβανομένου του τομέα της ιατρικής και πιο συγκεκριμένα, όπως εξετάζει η παρούσα εργασία, στον τομέα της οπτομετρίας και της οφθαλμολογίας. Το laser είναι πλέον ένα ισχυρό εργαλείο στη φαρέτρα του σύγχρονου οφθαλμοχειρουργού δίνοντας λύσεις σε διαθλαστικά και οφθαλμολογικά προβλήματα με αποτελέσματα τα οποία υπερτερούν συντριπτικά έναντι των συμβατικών μεθόδων.

Μυωπία, υπερμετροπία, αστιγματισμός αλλά ακόμα και η πρεσβυωπία αντιμετωπίζονται σήμερα επιτυχώς με επεμβάσεις laser χαρίζοντας στους ασθενείς ευκρινή όραση, απαλλάσσοντας τους από τη χρήση γυαλιών και φακών επαφής. Επί της ουσίας το laser «σμιλεύει» τον κερατοειδή, το κύριο διαθλαστικό μέσο του οφθαλμού αποκαθιστώντας έτσι τη διοπτρική του ισχύ. Εκτός από τη διαθλαστική χειρουργική, το laser βρίσκει ευρεία εφαρμογή και στην αντιμετώπιση διαφόρων παθολογικών καταστάσεων του οφθαλμού όπως ο καταρράκτης, το γλαύκωμα, οι αμφιβληστροειδοπάθειες κ.α.

Η παρούσα εργασία είναι χωρισμένη σε δύο μέρη: ένα «φυσικό» κομμάτι στο οποίο αναλύονται με ποιοτικό τρόπο το τι είναι laser, οι ιδιότητες της ακτινοβολίας laser, τα συστήματα laser και οι μέθοδοι παραγωγής παλμών laser και, ένα «ιατρικό» κομμάτι όπου παρουσιάζεται η διαθλαστική χειρουργική μέσα από τις τεχνικές της (LASIK, PRK κ.α.) αλλά και εφαρμογές των laser στον υπόλοιπο οφθαλμό, π.χ. στον οφθαλμικό βυθό (φωτοπηξία) ή στο γλαύκωμα (τραμπουλεκτομή). Τέλος, το τελευταίο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στα κύρια παλμικά lasers που χρησιμοποιούνται σήμερα στην οφθαλμολογία (excimer laser, femtosecond laser).

ABSTRACT

The technology of lasers has developed a lot in the last decades and its achievements are applied on many areas including medicine and more specifically the area this project investigates, optometry and ophthalmology. Lasers nowadays are a powerful tool in the modern ophthalmic surgeon's "arsenal", solving several refractive and ophthalmological problems with results that greatly surpass other conventional methods.

Myopia, hyperopia, astigmatism and even farsightedness can be successfully treated nowadays with laser surgeries, granting clear vision to patients, thus relieving them from the need to wear glasses and contact lenses. In short, lasers “sculpt” the retina, the main refraction centre of the eye, thus restoring the binocular power of the eye. Apart from refractive surgeries, lasers are also widely used to treat several pathological states of the eye, like cataract, glaucoma, retinopathy etc.

This project is divided in two parts: the “natural” part where we investigate in a qualitative way what a laser is, the characteristics of its radiation, the laser systems and the methods of laser pulse production, and the “medical” part where we are presented with the refractive operation through its techniques (LASIK, PRK etc.) as well as laser applications on the rest of the eye, for example the ocular deep (photocoagulation) or glaucoma (trabulectomy). In the end, the last chapter is about the main pulse lasers, which are nowadays used in ophthalmology (excimer laser, femtosecond laser).

Περιεχόμενα

Μέρος 1^ο

Εισαγωγή

Τι είναι Laser;.....	9
Χαρακτηριστικά laser.....	9
Εφαρμογές laser.....	9

Κεφάλαιο 1

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LASER – ΜΕΡΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ LASER.....	13
Αρχές λειτουργίας του laser.....	13
Φωτόνιο.....	13
Ενεργειακές Στάθμες.....	13
Απορρόφηση.....	14
Αυθόρμητη Εκπομπή.....	14
Εξαναγκασμένη Εκπομπή.....	15
Αναστροφή Πληθυσμών.....	16
Μέρη συστήματος Laser.....	17

Κεφάλαιο 2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΑΛΜΩΝ LASER

Laser συνεχούς και παλμικής λειτουργίας.....	21
Παλμικά Lasers.....	21
Παράγοντας Ποιότητας Q.....	22
Τεχνική Q- switching.....	22
Μέθοδοι υλοποίησης της τεχνικής Q- switching.....	24
Ενεργός και παθητική μεταβολή του Παράγοντα Q.....	24
Τεχνική Εγκλείδωσης Ρυθμών (Mode Locking).....	27
Τεχνική Εγκλείδωσης Ρυθμών με τη μέθοδο του Ακουστοοπτικού Διαμορφωτή (AOM).....	27

Μέρος 2^ο

Εισαγωγή

Ο οφθαλμός.....	31
-----------------	----

Τα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού	32
Ο κερατοειδής	32
Ανατομία κερατοειδούς	32
Ο κρυσταλλοειδής φακός.....	34
Ανατομία κρυσταλλοειδούς φακού.....	34

Κεφάλαιο 3 LASER ΣΤΗΝ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑ- ΟΦΘΑΛΜΟΛΟΓΙΑ

Τι είναι η διαθλαστική χειρουργική;.....	37
Προεγχειρητικός έλεγχος.....	38
Τεχνικές laser στην διαθλαστική χειρουργική.....	40
PRK (Photorefractive Keratectomy).....	40
t-PTK- PRK.....	41
Epi-LASIK.....	44
LASEK.....	44
Σύγκριση LASIK και PRK	45
LASIK.....	46
PRK.....	46
Επούλωση & φαρμακευτική αγωγή μετά από PRK/LASIK	47
Διόρθωση διαθλαστικών ανωμαλιών με τη χρήση ενδοφακών.....	50
Ένθεση φακικού ενδοφακού (Phakic Refractive Lens).....	50
Αντικατάσταση του κρυσταλλοειδούς φακού με ενδοφακό (Clear Lens Extraction, CLE)	51
Διόρθωση Πρεσβυωπίας	51
LASER ΣΤΗ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΓΛΑΥΚΩΜΑΤΟΣ	53
ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΑΘΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΜΦΙΒΛΗΣΤΡΟΕΙΔΟΥΣ ΜΕ LASER	54

Κεφάλαιο 4 ΥΠΕΡΒΡΑΧΕΙΣ ΠΑΛΜΟΙ ΣΤΗΝ ΟΦΘΑΛΜΟΛΟΓΙΑ

Επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς.....	56
Η χρήση παλμικών laser στην οφθαλμολογία	57
Οφέλη των παλμικών laser στην οφθαλμολογία	57
Φωταποδόμηση κερατοειδικού ιστού με laser.....	58

Παλμικό Excimer Laser	58
Femtoseconds lasers	61
Άλλα lasers στη διαθλαστική χειρουργική	67
Διαφορές laser βυθού με laser που εφαρμόζεται στην αντιμετώπιση διαθλαστικών ανωμαλιών	68
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69

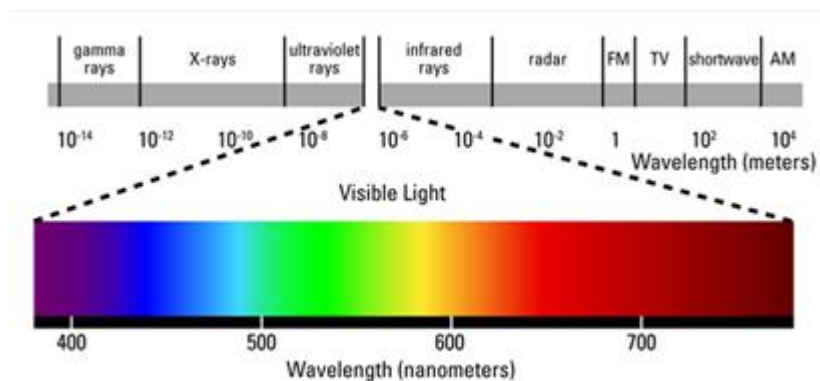
Μέρος 1^ο

Εισαγωγή

Τι είναι Laser; - Γενικά χαρακτηριστικά του Laser- Εφαρμογές του Laser

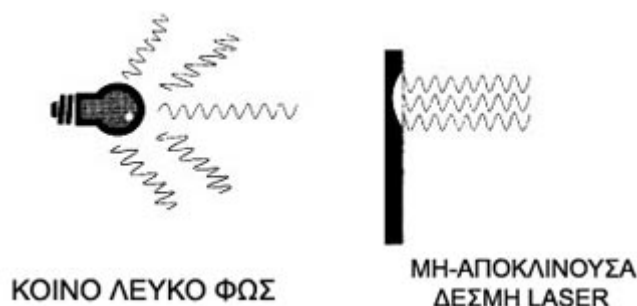
Τι είναι laser;

Το laser είναι μια πηγή φωτός η οποία παράγει μια δέσμη σχεδόν μονοχρωματικού φωτός με υψηλό βαθμό συμφωνίας, σαν αποτέλεσμα συντονισμένης εκπομπής από πολλά άτομα. Η λέξη laser προέρχεται από τα ακρωνύμια των λέξεων *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, δηλαδή ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας (εικ. 1). Στην ουσία ένα laser είναι ένας ενισχυτής φωτός που παράγει μια έντονη δέσμη φωτονίων τα οποία έχουν την ίδια συχνότητα, φάση και διεύθυνση.



Εικόνα 1: το φάσμα της ακτινοβολίας

Αυτή η ιδιαιτερότητα έχει ως αποτέλεσμα μια δέσμη laser να ξεχωρίζει από μια απλή δέσμη φωτός εξαιτίας των εξής ειδικών χαρακτηριστικών: λαμπρότητα, μονοχρωματικότητα, συμφωνία, κατευθυντικότητα και πόλωση. Από τα παραπάνω, το χαρακτηριστικό που τονίζει την ιδιαιτερότητα του laser είναι η συμφωνία, χαρακτηριστικό που εκλείπει από το κοινό φως (εικ. 2).



Εικόνα 2: δέσμη φωτός από λαμπτήρα πυρακτώσεως και δέσμη laser.

Γενικά Χαρακτηριστικά του laser

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του laser.

1. Κατευθυντικότητα (Σταθερή, μη-αποκλίνουσα πορεία).

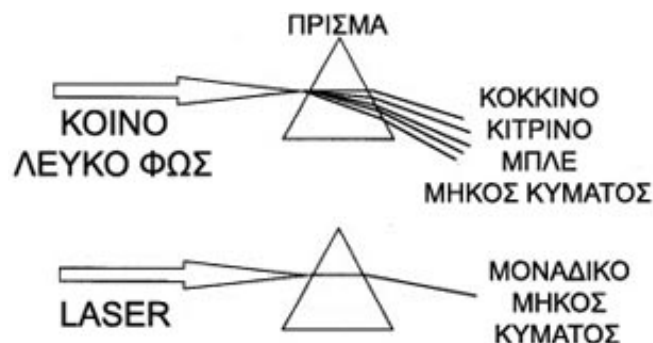
Μια δέσμη φωτός laser δεν παρουσιάζει αποκλίσεις κατά την πορεία της γιατί αποτελείται από κύματα που ταξιδεύουν παράλληλα μεταξύ τους προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση χωρίς εκτροπές (και συνεπώς χωρίς απώλειες ενέργειας). Αυτό επιτρέπει στη δέσμη του laser να εστιάζει με πολύ μεγάλη ένταση σε ένα σημείο. Τα συνηθισμένα κύματα φωτός διαχέονται προς όλες τις κατευθύνσεις (εκτροπές) και έτσι χάνουν γρήγορα την ενέργειά τους (εικ. 3).



Εικόνα 3: σύγκριση της κατανομής έντασης laser και κοινού φωτός

2. Μονοχρωματικότητα (Ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος).

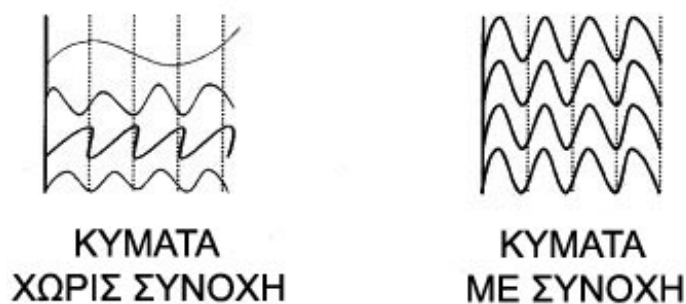
Η ακτινοβολία laser είναι μονοχρωματική, δηλαδή τα σωματίδια της δέσμης έχουν ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος (λ) ή ένα περιορισμένο εύρος μήκους κυμάτων. Το συνηθισμένο φως αποτελείται από ένα πολύ ευρύτερο φάσμα κυμάτων. Στην πράξη, αν και καμιά φωτεινή πηγή δεν δίνει απόλυτα μονοχρωματικό φως, τα laser προσφέρουν την καλύτερη δυνατή και υπαρκτή προσέγγιση του ιδανικού μονοχρωματικού φωτός (εικ. 4).



Εικόνα 4: Μονοχρωματικότητα laser

3. Συμφωνία.

Η φωτεινή δέσμη του laser παρουσιάζει συμφωνία, που σημαίνει ότι τα φωτεινά κύματα που την αποτελούν κινούνται ταυτόχρονα σε ίδιες φάσεις στον χρόνο και στο χώρο (ίδιες συχνότητες). Αντιθέτως, το κοινό φως (π.χ. το φως ενός κοινού λαμπτήρα), συνήθως δεν παρουσιάζει αυτή την ιδιότητα καθώς αποτελείται από ένα διάφορα φωτεινά κύματα με διαφορετικές συχνότητες που διαχέονται προς διαφορετικές κατευθύνσεις (εικ. 5). Στα laser συναντάται ο μεγαλύτερος βαθμός συμφωνίας από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός για αυτό και η συμφωνία αποτελεί το σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους.



Εικόνα 5: Συμφωνία Laser

4. Λαμπρότητα (Τεράστια συγκέντρωση ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας).

Τα laser είναι πηγές ακτινοβολίας με μεγάλη λαμπρότητα. Όπως προαναφέρθηκε, η ακτινοβολία laser εστιάζεται σε ένα σημείο. Η δέσμη laser δηλαδή ξεκινάει από την πηγή εκπομπής της και καταλήγει στο σημείο διατηρώντας στην πορεία της σχεδόν αναλλοίωτες τις ιδιότητες της (διάμετρος, χρώμα). Η δέσμη φωτός laser μπορεί να μεταφερθεί είτε άμεσα στον αέρα όπως το κοινό φως είτε μέσω ειδικών μεταφορέων (όπως π.χ. αρθρωτοί βραχίονες, οπτικές ίνες κλπ). Η ενέργεια που έχει η ακτινοβολία laser είναι τεράστια (σε ένα τετραγωνικό εκατοστό είναι 360.000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη που έχει η ηλιακή ακτινοβολία). Παρεμβάλλοντας επιπλέον ειδικούς φακούς, η ενέργεια της ακτινοβολίας laser που απελευθερώνεται σε κάθε τετραγωνικό εκατοστό μπορεί να αυξηθεί ακόμη μέχρι και 1.000 φορές.

5. Πόλωση.

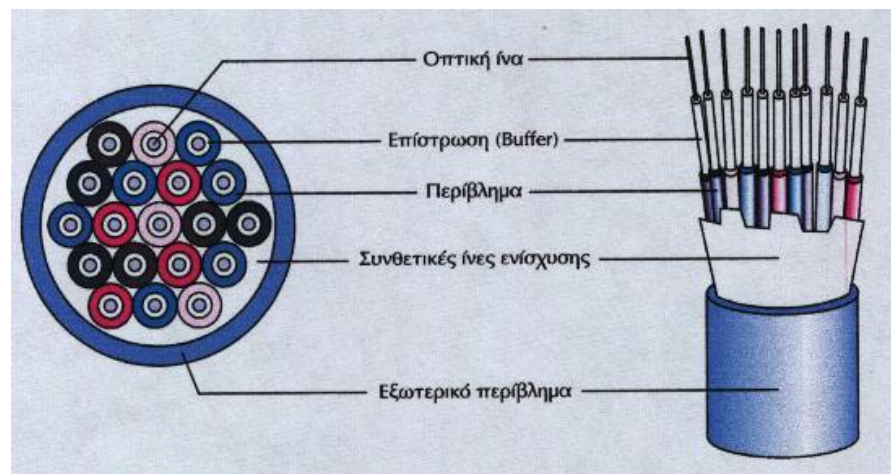
Το φως που εκπέμπεται από τις συνηθισμένες φωτεινές πηγές είναι συνήθως μη πολωμένο ή μερικώς πολωμένο. Αντίθετα πολλά laser παράγουν πολωμένο φως είτε λόγω της φύσης και της μοριακής διάταξης του ενεργού υλικού τους (βλ κεφ. 1) όπως π.χ. το ρουμπίνιο (ruby), είτε λόγω προσθήκης πολωτικών

στοιχείων στο οπτικό αντηχείο (βλ. Κεφ. 1) όπως π.χ. πρίσματα, φράγματα ανάκλασης κ.λπ.

Εφαρμογές του laser

Όλες οι εφαρμογές των laser βασίζονται σε ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Τα πεδία που χρησιμοποιούνται είναι πάρα πολλά και συνεχώς με την πρόοδο της τεχνολογίας αυξάνονται. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά μερικοί από τους τομείς εφαρμογής τους.

1. Προϊόντα καταναλωτών (π.χ. CDs).
2. Τηλεπικοινωνίες (π.χ. καλώδια οπτικών ινών(εικ.6), δορυφορικές ζεύξεις).
3. Εξοπλισμός γραφείου (π.χ. Αναγνώστες bar code, Fax, εκτυπωτές).
4. Μέσα οπτικής αποθήκευσης (π.χ. σκληροί δίσκοι H/Y).
5. Όργανα ανίχνευσης και ελέγχου (π.χ. συμβολόμετρα, μετρητές ταχύτητας, ολογραφία).
6. Ιατρικές εφαρμογές (π.χ. οφθαλμική χειρουργική, βιοχημικές αναλύσεις).
7. Βιομηχανία (π.χ. μηχανήματα κοπής μετάλλων).



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση καλωδίου οπτικών ινών

Κεφάλαιο 1

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ LASER – ΜΕΡΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ LASER

Αρχές λειτουργίας του laser

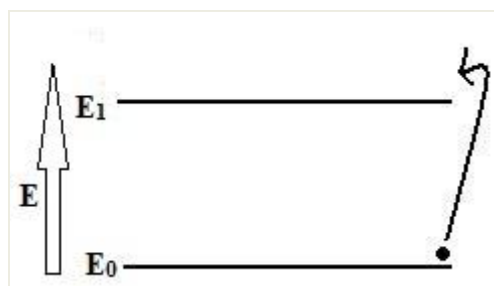
Απαραίτητες έννοιες για την κατανόηση της αρχής λειτουργίας του laser είναι τα φωτόνια, οι ενεργειακές στάθμες και οι όροι απορρόφηση, αυθόρμητη εκπομπή, εξαναγκασμένη εκπομπή και η αναστροφή πληθυσμών.

Φωτόνιο

Το φωτόνιο είναι το στοιχειώδες σωματίδιο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ΗΜ). Δεν έχει μάζα και ηλεκτρικό φορτίο. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι κβαντωμένη, η ενέργειά της εκπέμπεται και απορροφάται δηλαδή σε μικρά, διακριτά «πακέτα» τα κβάντα φωτός ή φωτόνια (Planck 1900, Einstein 1905).

Ενεργειακές Στάθμες

Το άτομο ανάλογα με την ενέργεια του μπορεί να βρίσκεται σε δύο ενεργειακές καταστάσεις ή αλλιώς στάθμες: τη βασική ενεργειακή στάθμη E_0 που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενέργεια και τη διεγερμένη ενεργειακή στάθμη E_1 που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ενέργεια (εικ. 7). Όταν το άτομο βρίσκεται στη βασική ενεργειακή στάθμη, τότε λέμε ότι βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Οι E_0 , E_1 απέχουν μεταξύ τους ενέργεια ίση με $\Delta E = E_1 - E_0$ ή συχνότητα $\Delta E = hf$, όπου h η σταθερά του Planck ($h \approx 6,626 \times 10^{-34}$ Js). Όταν τα άτομα μεταβαίνουν από υψηλότερες ενεργειακές στάθμες σε χαμηλότερες ή στη βασική στάθμη τότε εκπέμπονται φωτόνια.



Εικόνα 7: Μετάβαση από τη βασική στη διεγερμένη κατάσταση

Απορρόφηση

Στις συνηθισμένες συνθήκες το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση ώστε να κατέχει την ελάχιστη δυνατή ενέργεια. Στην κατάσταση αυτή το άτομο μπορεί να διεγερθεί από ένα φωτόνιο, δηλαδή να το απορροφήσει και να μεταβεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Η ενέργεια του φωτονίου που απορροφήθηκε είναι ίση με τη διαφορά ενέργειας των σταθμών μεταξύ των οποίων γίνεται η μετάβαση ($\Delta E = E_1 - E_0 = hf$). Η διεργασία αυτή λέγεται **απορρόφηση** (εικ. 8a). Η πιθανότητα να απορροφήσει το άτομο ένα φωτόνιο στη μονάδα του χρόνου συμβολίζεται ως P_{01} και εξαρτάται από το πλήθος των φωτονίων που κατέχουν ενέργεια hf . Ισχύει:

$$P_{01} = B_{01} \cdot \rho(\nu) \quad (1)$$

όπου B_{01} είναι ο συντελεστής Einstein για την απορρόφηση και $\rho(\nu)$ η ενεργειακή πυκνότητα της ακτινοβολίας.

Αυθόρμητη Εκπομπή

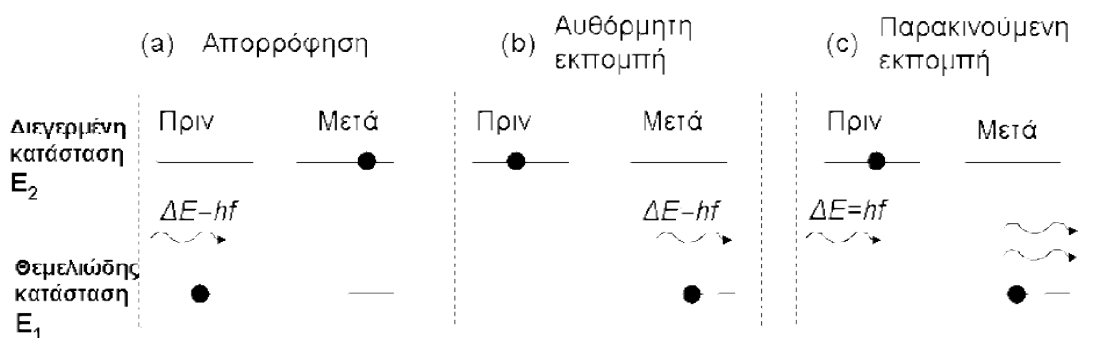
Αν το άτομο βρεθεί σε μια διεγερμένη κατάσταση με ενεργειακή στάθμη E_1 πάνω από τη θεμελιώδη κατάσταση E_0 , τότε έχει απορροφήσει φωτόνιο με συχνότητα f και ισχύει $\Delta E = hf$. Λίγο αργότερα το διεγερμένο άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο ίδιας συχνότητας με αυτό που απορρόφησε και μεταβαίνει σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, απελευθερώνοντας την πλεονάζουσα ενέργεια. Η διεργασία αυτή λέγεται **αυθόρμητη εκπομπή** (χωρίς την επίδραση εξωτερικής πηγής), (εικ. 8b).

Το χρονικό διάστημα που το άτομο παραμένει στη διεγερμένη κατάσταση, διαφέρει από άτομο σε άτομο και έτσι το φωτόνιο που εκπέμπεται έχει τυχαία διεύθυνση και φάση. Συνήθως ένα άτομο παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση περίπου για χρόνο 10^{-8} sec και μετά αποδιεγείρεται αυθόρμητα επιστρέφοντας στην θεμελιώδη κατάσταση. Ο χρόνος παραμονής στη διεγερμένη κατάσταση ονομάζεται χρόνος ημιζωής (τ) και δίνεται από τον τύπο $\tau = 1/A_{10}$, όπου A_{10} είναι η πιθανότητα της μετάπτωσης προς τη χαμηλότερη στάθμη. Όταν οι χρόνοι ημιζωής είναι πολύ μεγαλύτεροι (10^{-3} s) επιμηκύνεται ο χρόνος παραμονής του ατόμου στη διεγερμένη κατάσταση. Οι αντίστοιχες ενεργειακές καταστάσεις καλούνται μετασταθείς και παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργία των Laser.

Εξαναγκασμένη Εκπομπή

Αν κατά τη διάρκεια παραμονής του ατόμου στη διεγερμένη κατάσταση προσπέσει πάνω του ένα φωτόνιο ενέργειας $\Delta E=hf$, το φωτόνιο αυτό παρακινεί το άτομο να αποδιεγερθεί, εκπέμποντας ένα δεύτερο φωτόνιο, το οποίο έχει **ίδια συχνότητα, κατεύθυνση, φάση και πόλωση** με το φωτόνιο που υποκίνησε την αποδιέγερση. Τα δύο φωτόνια έχουν μια καθορισμένη σχέση φάσεων και αναδύονται μαζί ως σύμφωνη ακτινοβολία. Στην ουσία δηλαδή το διεγερμένο άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και εκπέμπει δύο (ενίσχυση του φωτός). Συνεπώς το αρχικό φωτόνιο συνεχίζει την διαδρομή του και το εκπεμπόμενο φωτόνιο προστίθεται σε αυτήν. Η διαδικασία αυτή λέγεται **παρακινούμενη ή εξαναγκασμένη εκπομπή** (επίδραση εξωτερικής πηγής), (εικ. 8c) και είναι η βάση της λειτουργίας του laser. Από ένα λοιπόν αρχικό φωτόνιο παράγονται δύο όμοια φωτόνια, και αν αυτά προσκρούσουν σε δύο νέα άτομα γίνονται 4 όμοια φωτόνια κ.ο.κ.(φαινόμενο χιονοστιβάδας¹). Κατά αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ενίσχυση του φωτός, με απολύτως όμοια φωτόνια.

Σημαντικό ρόλο στην εξαναγκασμένη εκπομπή παίζει ο χρόνος ημιζωής (τ) του ατόμου. Όσο μεγαλύτερος είναι ($>10^{-4}$ ms) καθυστερεί η αυθόρμητη αποδιέγερση του ατόμου, η διεγερμένη κατάσταση του συστήματος είναι μετασταθής (εικ. 6), και έτσι γίνεται παρακινούμενη αποδιέγερση του ατόμου. Η πιθανότητα να συμβεί εξαναγκασμένη εκπομπή δίνεται πάλι από τη σχέση (1).



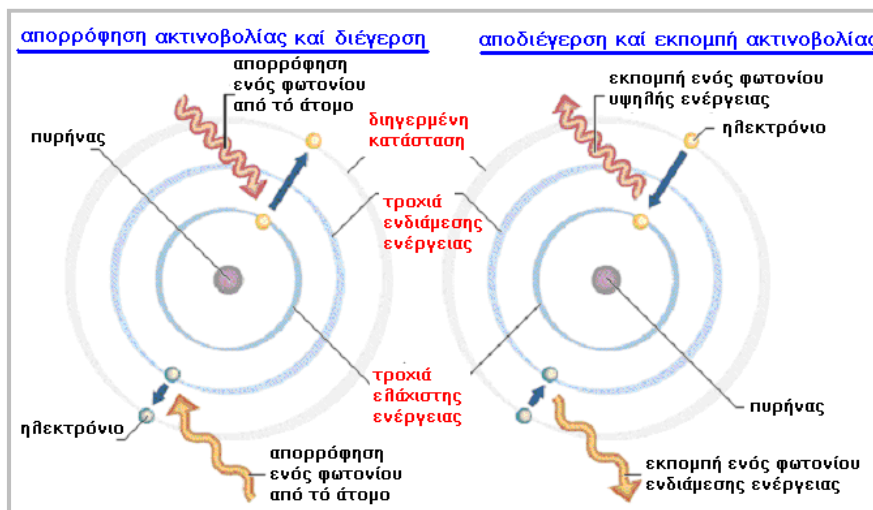
Εικόνα 8: Σχηματική επεξήγηση της απορρόφησης, της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης εκπομπής.

Για να εξετάσουμε την εξαναγκασμένη εκπομπή χρειάζεται να είναι γνωστός ο αριθμός των ατόμων που βρίσκονται στις διάφορες ενεργειακές στάθμες του συστήματος. Στα αέρια ο αριθμός αυτός καθορίζεται από την συνάρτηση κατανομής των Maxwell- Boltzmann, όπου σύμφωνα με αυτή σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας με απόλυτη θερμοκρασία T , ο αριθμός n των ατόμων της

κάθε στάθμης E είναι ανάλογος του $e^{-k/T}$ (2), όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann ($= 1,38 \times 10^{-23}$ J/K).

Αν E_0 είναι η θεμελιώδης κατάσταση και E_1 η διεγερμένη, ο λόγος των πληθυσμών των ατόμων στις 2 καταστάσεις είναι:

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{e^{-E_1/kT}}{e^{-E_0/kT}} \quad (3)$$

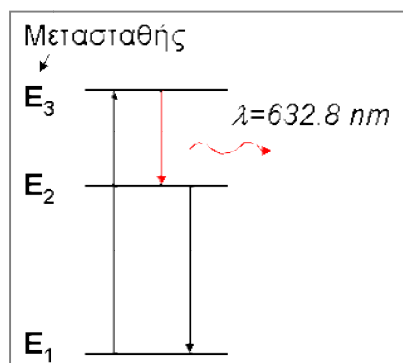


Εικόνα 9: απορρόφηση, διέγερση, αποδιέγερση και τελικός εκπομπή ακτινοβολίας

Αναστροφή Πληθυσμών

Από τον παραπάνω τύπο της κατανομής (3), μέσω υπολογισμών, (εξαιτίας του αρνητικού εκθέτη), βρέθηκε ότι ο αριθμός των ατόμων (n) στις διεγερμένες καταστάσεις είναι πολύ μικρότερος από αυτόν της θεμελιώδους κατάστασης ($n_1 < n_0$), με αποτέλεσμα να υπερτερεί τελικά η απορρόφηση και όχι η εξαναγκασμένη εκπομπή στην οποία βασίζεται η δημιουργία του Laser. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαία η δημιουργία συνθηκών όπου το ποσοστό των ατόμων στις διεγερμένες καταστάσεις θα είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό της θεμελιώδους. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών όπου ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπονται τα φωτόνια μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής είναι πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό της απορρόφησης (εικ. 9).

Η αναστροφή πληθυσμών απαιτεί την ύπαρξη συστήματος πάνω των 3 ενεργειακών σταθμών (επιπέδων) επειδή ένα ενεργειακό σύστημα 2 επιπέδων δεν μπορεί να δημιουργήσει συνθήκες αναστροφής πληθυσμών καθώς όση ακτινοβολία παράγεται τόση και απορροφάται (εικ. 10).



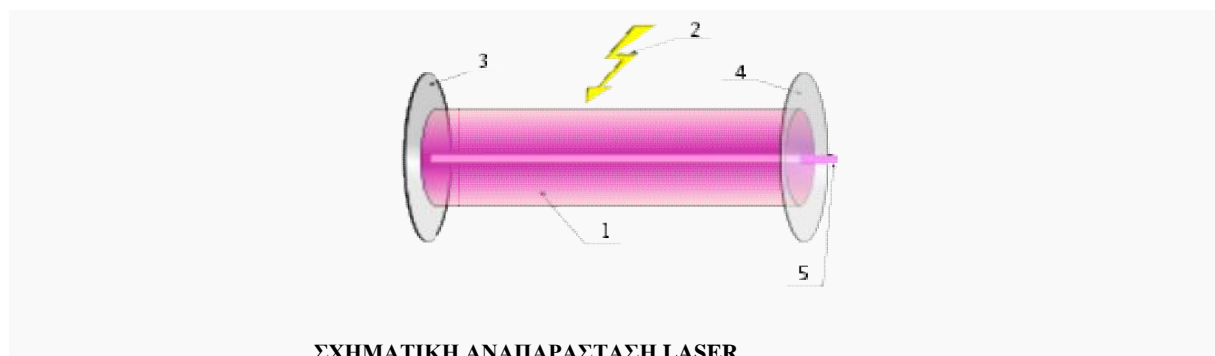
Εικόνα 10: Διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου του νέου. Το φως laser στο σύστημα He-Ne προέρχεται από τη μετάβαση από την μετασταθή στάθμη E_3 στην E_2 .

Οι συνθήκες για την αναστροφή πληθυσμών, δημιουργούνται από μια εξωτερική πηγή άντλησης ενέργειας, που μπορεί να είναι είτε μια παλμική λυχνία ή μια ηλεκτρική εκκένωση (δημιουργία παλμικών πηγών Laser π.χ. Laser ρουμπινίου) , είτε μια σταθερή οπτική άντληση (δημιουργία συνεχών πηγών Laser, π.χ. Laser Ηλίου – Νέου).

B) Μέρη συστήματος Laser

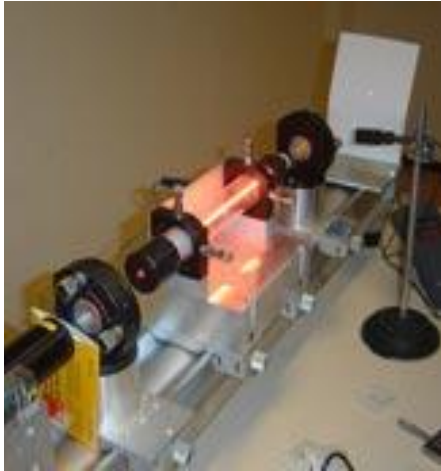
Το Laser αποτελεί μία ειδική δέσμη φωτεινής ακτινοβολίας, που δεν υπάρχει σε φυσικές συνθήκες, αλλά παράγεται σε εργαστηριακό περιβάλλον με ειδικό τεχνολογικό εξοπλισμό (εικ. 11).

Εικόνα 11: Σύστημα laser



ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ LASER

1. Ενεργό υλικό του Laser (στερεάς, υγρής ή αέριας κατάστασης).
2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης (π.χ. ηλεκτρική εκκένωση ή χημική αντίδραση).
3. Υψηλής αντανakλαστικότητας κάτοπτρο ($T= 100\%$).
4. Ημπερατό κάτοπτρο ($T= 4\%$) / Διάταξη εξόδου δέσμης.
5. Παραγόμενη Δέσμη Laser.



Εικόνα 12: Συσκευή παραγωγής Laser

Ένα σύστημα Laser αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το ενεργό υλικό, το μηχανισμό άντλησης, και το οπτικό αντηχείο (εικ. 12).

Ενεργό υλικό

Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια από το μηχανισμό άντλησης σε δέσμη φωτός. Κάθε υλικό που παρουσιάζει αναστροφή πληθυσμών, καλείται ενεργό υλικό. Μπορεί να είναι συλλογή ατόμων, μορίων ή ιόντων, σε στερεά, υγρή ή αέρια κατάσταση, οπότε τα παραγόμενα Laser βάσει του υλικού τους χωρίζονται στις εξής κατηγορίες (πίνακας 1): Laser στερεάς κατάστασης, Laser υγρών χρωστικών, Laser αέριων χρωστικών και Laser ημιαγωγών. Το ενεργό υλικό βρίσκεται μέσα στην κοιλότητα του οπτικού αντηχείου και όταν τα σωματίδιά του διεγείρονται φθορίζει.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΚΥΡΙΟΙ ΤΥΠΟΙ LASER ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΝΕΡΓΟ ΥΛΙΚΟ		
Στερεάς κατάστασης	Κρυστάλλου Π.χ. YAG, Ruby, YVO κ.λπ. Σε μορφή δίσκου, ράβδου ή πλάκας.	Υάλου Π.χ. BK7, πυριτίου κ.λπ. Σε μορφή ίνας ή ράβδου.
Υγρών Χρωστικών	Π.χ. Ροδαμίνης 6G, Φλουορεσκεΐνης, Κουμαρίνης, Στιλβενίου, Σκιαδοφερόνης, Τετρακαΐνης, Πράσινου του μαλαχίτη κ.λπ..	
Αέριων Χρωστικών	Ηλεκτρικά Π.χ. CO ₂ , N, Cu, Au.	Χημικά Π.χ. O ₂ , I, H ₂ F.
Ημιαγωγών	Αποτελούνται από ένα άτομο ευγενούς αερίου (Ar, Kr, Xe) και ένα άτομο αλογόνου (F, Cl, Br, I). Το μόριο αυτό υπάρχει μόνο σε διεγερμένη κατάσταση. Όταν αποδιεγερθεί, τα άτομα διαχωρίζονται.	

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

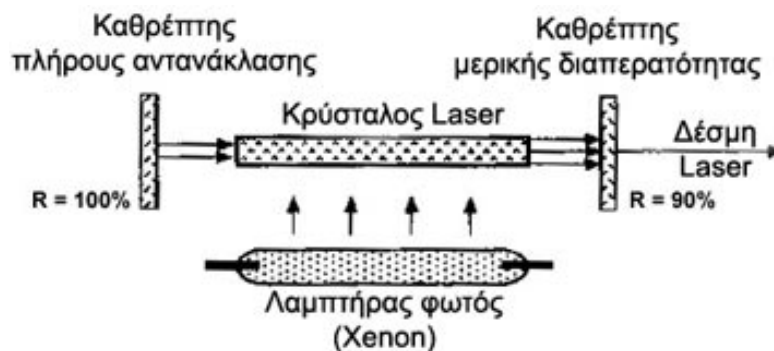
Μηχανισμός άντλησης

Η εξωτερική ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία συνθηκών αναστροφής πληθυσμών συνήθως προέρχεται μια λυχνία έκλαμψης (φλας), από ηλεκτρική εκκένωση, από χημική αντίδραση ή από οπτική άντληση ενός άλλου Laser. Η ενέργεια που παράγεται, αποτίθεται στα σωματίδια του ενεργού υλικού ώστε να οδηγηθούν στη διεγερμένη κατάσταση. Η ελάχιστη τιμή ισχύς άντλησης που απαιτείται για την παραγωγή λέιζερ ονομάζεται **κατώφλι Laser**.

Οπτικό αντηχείο

Η ακτινοβολία που δημιουργείται από την εξαναγκασμένη εκπομπή, εγκλωβίζεται σε μια μικρή κοιλότητα που περιέχει το ενεργό υλικό και καλείται οπτικό αντηχείο. Το οπτικό αντηχείο έχει στις άκρες του δύο κάτοπτρα υψηλής ποιότητας, ένα με πολύ υψηλή αντανακλαστικότητα ($R_1=100\%$) και ένα ημιπερατό (πχ $R_2=94\%$), από το οποίο κάποια στιγμή εξέρχεται η δέσμη Laser (οπή εξόδου δέσμης). Τα κάτοπτρα αυτά αντανακλούν πολλές φορές σε ευθεία ταλάντωση τα παραγόμενα φωτόνια μέσα στην κοιλότητα του ενεργού υλικού ώστε αυτά να αλληλεπιδράσουν με τα διεγερμένα άτομα πολλές φορές μέχρι η ακτινοβολία να αποκτήσει την επιθυμητή ένταση (εικ.13).

Το κάθε φωτόνιο να περνά τουλάχιστον δύο φορές από το ενεργό υλικού προτού φύγει από την οπή εξόδου της δέσμης Laser ή χαθεί λόγω απορρόφησης ή περίθλασης² (απώλειες οπτικού αντηχείου). Αν η ενισχυμένη ακτινοβολία που προέρχεται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση των φωτονίων μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε εμφανίζεται εκθετική αύξηση της ισχύς του φωτός μέσα στην κοιλότητα. Όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί μετά από κάθε εξαναγκασμένη εκπομπή το άτομο επιστρέφει στη θεμελιώδη κατάσταση και έτσι δεν γίνεται περαιτέρω ενίσχυση της δέσμης Laser. Όταν το φαινόμενο μεγιστοποιείται τότε ότι η ενίσχυση έχει φτάσει σε **κορεσμό**. Όταν η ισχύς της άντλησης γίνει περίπου ίση με την τιμή κορεσμού της ενίσχυσης και τις απώλειες του οπτικού αντηχείου οδηγεί σε κατάσταση ισορροπίας της ισχύς του Laser στην κοιλότητα. Αυτή η τιμή ισορροπίας καθορίζει την αρχή λειτουργίας του Laser.



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση οπτικού αντηχείου

Συνοψίζοντας, για τη δημιουργία δέσμης Laser θα πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- **Αναστροφή πληθυσμών** στο σύστημα.
- Η διεγερμένη κατάσταση του συστήματος πρέπει να είναι **μετασταθής**.

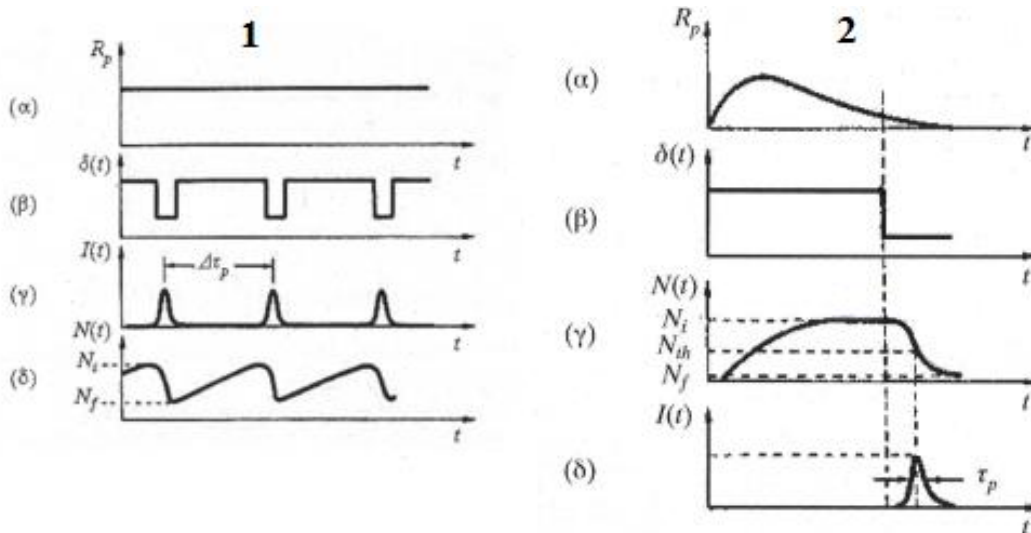
- **Περιορισμός** των εκπεμπόμενων φωτονίων σε μικρό χώρο, ώστε να αλληλεπιδράσουν με όσο γίνεται περισσότερα άτομα του ενεργού υλικού και να τα "παρακινήσουν" σε εκπομπή φωτονίων (οπτικό αντηχείο).
- **Συνθήκη κατωφλίου ενίσχυσης:** Πρέπει η ενίσχυση της ακτινοβολίας που οφείλεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή να εξισορροπεί την εξασθένηση που οφείλεται στις απώλειες (διαπερατότητα κατόπτρων, σκέδαση κ.α.).

Κεφάλαιο 2

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΑΛΜΩΝ LASER

Laser συνεχούς και παλμικής λειτουργίας

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους τα lasers μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) laser συνεχούς λειτουργίας των οποίων η έξοδος είναι συνεχής με σταθερό ρυθμό ισχύος και β) σε laser διακεκομμένης ή παλμικής λειτουργίας των οποίων η έξοδος έχει τη μορφή παλμών διάρκειας συνήθως από μερικές εκατοντάδες microseconds έως μερικά milliseconds με σταθερό ή μεταβλητό ρυθμό ισχύος (εικ. 14). Η έξοδος ενός laser συνεχούς λειτουργίας μπορεί να τροποποιηθεί ως ένα βαθμό με κατάλληλες τεχνικές ώστε να δημιουργηθούν παλμοί.



Εικόνα 14: στάδια laser συνεχούς και παλμικής λειτουργίας (Q-switching)

Παλμικά Lasers

Ως laser παλμικής λειτουργίας μπορεί να οριστεί κάθε laser του οποίου η έξοδος δεν είναι συνεχής αλλά αποτελείται από παλμούς κάποιας διάρκειας και επαναλαμβανόμενου ρυθμού. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πολλά είδη laser. Μερικά lasers είναι παλμικά απλώς και μόνο επειδή δεν λειτουργούν σε συνεχόμενη λειτουργία.

Σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται η παραγωγή παλμών που να έχουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Ο στόχος αυτός μπορεί μερικές φορές να επιτευχθεί με τη μείωση του αριθμού των παλμών έτσι ώστε να συσσωρευτεί μεγαλύτερη ενέργεια μεταξύ των διαδοχικών παλμών.

Σε άλλες καταστάσεις χρειάζεται η μέγιστη ισχύς του παλμού (γιγαντοπαλμός) και όχι η ενέργεια εντός του παλμού. Αυτό απαιτεί τη δημιουργία παλμών πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (υπερβραχείς παλμοί) χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως το Q-switching ή την Εγκλείδωση Ρυθμών.

Οι υπερβραχείς παλμοί είναι ιδιαίτερος χρήσιμοι στην μελέτη και την έρευνα φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε μοριακά και ατομικά συστήματα (π.χ. μέτρηση του χρόνου ζωής διεγερμένων ατόμων ή μορίων).

Παρακάτω θα εξεταστούν οι τεχνικές με τις οποίες μπορούν να παραχθούν laser υπερβραχέων παλμών.

Παράγοντας Ποιότητας Q

Μέσα σε ένα οπτικό αντηχείο το πλάτος της ακτινοβολίας που παράγεται παραμένει αμείωτο εφόσον τηρείται η συνθήκη του κατωφλιού ενίσχυσης. Αν για κάποιο λόγο η συνθήκη αυτή διακοπεί τότε οι ταλαντώσεις μεταξύ των κατόπτρων γίνονται φθίνουσες και η ακτινοβολία μειώνεται σε πλάτος όσο περνάει ο χρόνος μέχρι να σταματήσει εντελώς η εκπομπή laser. Το πόσο γρήγορα εμφανίζονται οι απώλειες αυτές το εκφράζει ο παράγοντας Q ο οποίος είναι το μέτρο της ποιότητας του αντηχείου. Ο παράγοντας Q συνδέεται άμεσα με το χρόνο ημιζωής (τ) της άνω στάθμης και την αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος σε χρόνο μιας περιόδου ταλάντωσης. Ποιοτικά, μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Q = 2\pi \frac{\text{αποθηκευμένη ενέργεια}}{\text{απώλεια ενέργειας σε μια ταλάντωση}} \quad (4)$$

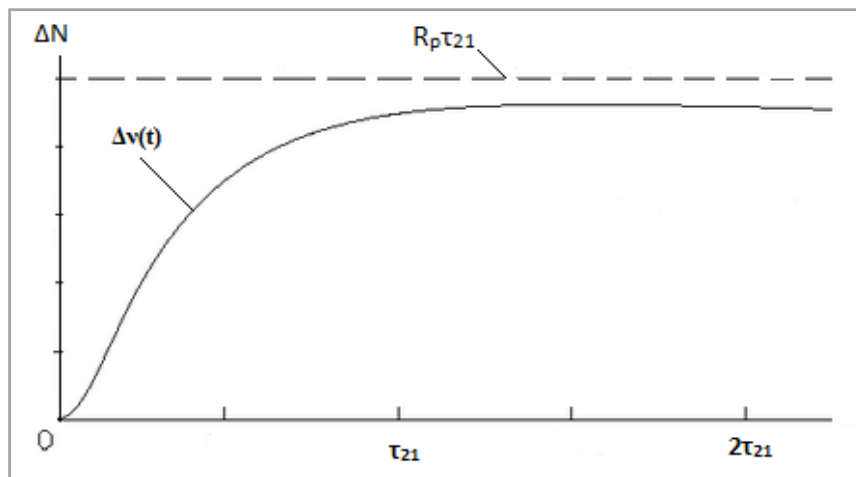
✓ Μεγάλη τιμή του Q σημαίνει μικρές απώλειες ενέργειας για το αντηχείο ενώ μικρή τιμή του Q, μεγάλες ενεργειακές απώλειες.

Τεχνική Q-switching

Η τεχνική Q-switching χρησιμοποιείται ευρύτατα για τη δημιουργία παλμών laser πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (μερικών nanoseconds (10^{-9}) έως μερικών δεκάδων nanoseconds) και υψηλής ισχύος (από μερικά MW έως μερικές δεκάδες MW). Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής έγκειται στη διαμόρφωση του παράγοντα Q από μια χαμηλή τιμή σε μία υψηλή τιμή.

Έστω ένα σύστημα παραγωγής laser (οπτικό αντηχείο, ενεργό υλικό, μηχανισμός άντλησης) το οποίο παράγει συνεχόμενη ακτινοβολία. Στο σύστημα αυτό τηρείται η συνθήκη του κατώφλιού ενίσχυσης συνεπώς ο παράγοντας Q έχει υψηλή τιμή. Αν μεταξύ των κατόπτρων τοποθετηθεί ένα εμπόδιο π.χ. ένα πέτασμα, τότε η τιμή του Q μειώνεται και το σύστημα αρχίζει να παρουσιάζει απώλειες μέχρι να σταματήσει η παραγωγή laser. Η άντληση παρόλα αυτά συνεχίζεται κανονικά και το ενεργό υλικό στην κοιλότητα του αντηχείου εξακολουθεί να διεγείρεται με αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της αναστροφής πληθυσμών απουσία εξαναγκασμένης εκπομπής (εικ. 15). (Οι απώλειες εμφανίζονται λόγω της αυθόρμητης εκπομπής.)

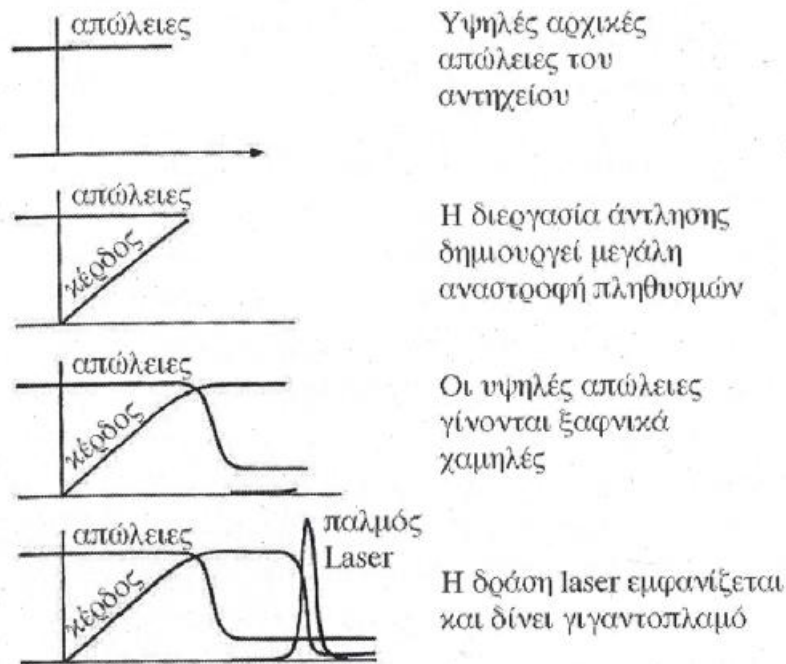
Αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας είναι μετά από λίγο να επέλθει κορεσμός (μέγιστη αναστροφή πληθυσμών = ελάττωση λόγω αυθόρμητης εκπομπής) και να συσσωρευτεί μεγάλο ποσό ενέργειας στην διεγερμένη στάθμη.



Εικόνα 15: αύξηση της αναστροφής πληθυσμών απουσία εξαναγκασμένης εκπομπής

Αν στη συνέχεια αρθεί το εμπόδιο μεταξύ των κατόπτρων τότε συμβαίνουν τα εξής: Ο παράγοντας Q παίρνει απότομα υψηλή τιμή με αποτέλεσμα την άμεση μείωση των ενεργειακών απωλειών του συστήματος. Αυτό σημαίνει γρήγορη ανάπτυξη της ακτινοβολίας laser εξαιτίας του μεγάλου πλήθους εξαναγκασμένων εκπομπών λόγω του υψηλού ποσοστού συσσωρευμένης ενέργειας και επακόλουθα απότομη μείωση της αναστροφής πληθυσμών. Αυτή η ταχύτατη παραγωγή laser οδηγεί στην δημιουργία ενός γιγαντοπαλμού (εικ. 16).

Όταν η αναστροφή πληθυσμών πέσει κάτω από το κατώφλι ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή laser τότε η εκπομπή της ακτινοβολίας διακόπτεται.



Εικόνα 16: στάδια Q-switching (4 στάδια), χρονική εξέλιξη των απωλειών

Μέθοδοι υλοποίησης της τεχνικής Q-switching

Ενεργός και παθητική μεταβολή του Παράγοντα Q

Η διαμόρφωση της τιμής του παράγοντα Q μπορεί να επιτευχθεί με ενεργές και παθητικές μεθόδους. Στην ενεργό μεταβολή του παράγοντα Q ένα εξωτερικό σήμα καθοδηγεί τις μεταβολές του Q. Με αυτόν τον τρόπο ο ρυθμός επανάληψης των παλμών ελέγχεται εξωτερικά. Αντίθετα, στην παθητική μεταβολή του παράγοντα Q τοποθετείται ένα απορροφητικό υλικό (κορέσιμος απορροφητής) εντός των δύο κατόπτρων του συστήματος παραγωγής laser διαμορφώνοντας έτσι την τιμή του Q.

Οι μηχανικές και ηλεκτροοπτικές τεχνικές (π.χ. περιστρεφόμενο κάτοπτρο και οι κορέσιμοι απορροφητές) χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεταβολή Q με παλμική άντληση. Παρακάτω θα εξετασθούν οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι υλοποίησης της τεχνικής Q-switching.

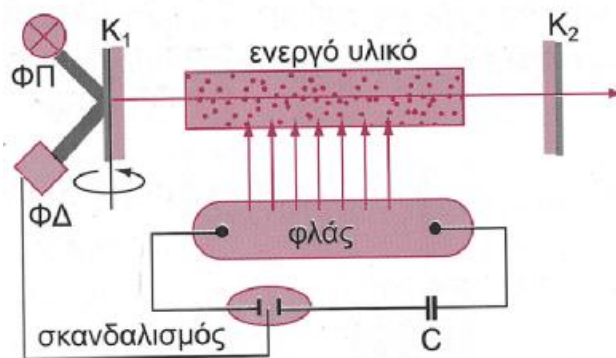
1) Περιστρεφόμενο κάτοπτρο (Q-Switching)

Η μέθοδος αυτή ανήκει στις ενεργές μεθόδους μεταβολής του παράγοντα Q.

Το ένα από τα δύο κάτοπτρα του οπτικού αντηχείου στρέφεται ταχύτατα συνεχώς (περίπου 10000 στροφές το λεπτό). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες του οπτικού αντηχείου να είναι μεγάλες (μικρό Q) εκτός από την χρονική στιγμή που τα δύο κάτοπτρα είναι σχεδόν παράλληλα. Στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι τα κάτοπτρα να παραλληλιστούν (μία περίοδος

άντλησης), η άντληση συνεχίζεται κανονικά με αποτέλεσμα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω την ραγδαία αύξηση της αναστροφής πληθυσμών και τη συσσώρευση μεγάλου πλήθους διεγερμένων σωματιδίων στην άνω στάθμη λόγω απουσίας της εξαναγκασμένης εκπομπής.

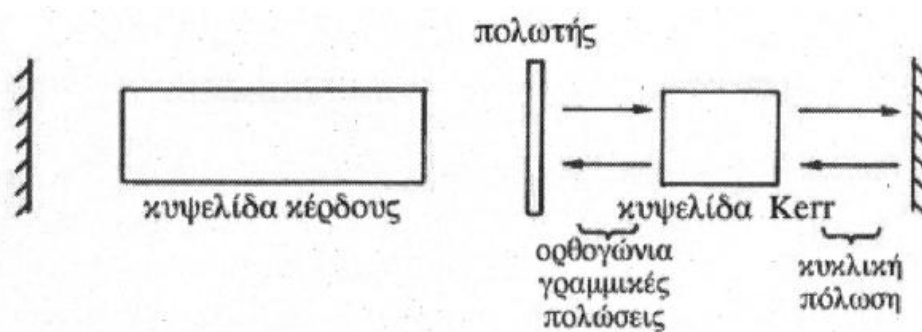
Τη χρονική στιγμή που τα κάτοπτρα παραλληλίζονται οι απώλειες μειώνονται δραστικά (μεγάλο Q) με αποτέλεσμα ο μεγάλος αριθμός των διεγερμένων σωματιδίων στην άνω στάθμη να αποδιεγερθεί μέσω εξαναγκασμένων εκπομπών. Αποτέλεσμα της έντονης αυτής διεργασίας είναι η δημιουργία ενός γιγαντιαίου παλμού Laser (εικ. 17).



Εικόνα 17: Q- switching, περιστρεφόμενο κάτοπτρο

2) Ηλεκτροοπτικοί κρύσταλλοι (*Pockels* και *Kerr*)

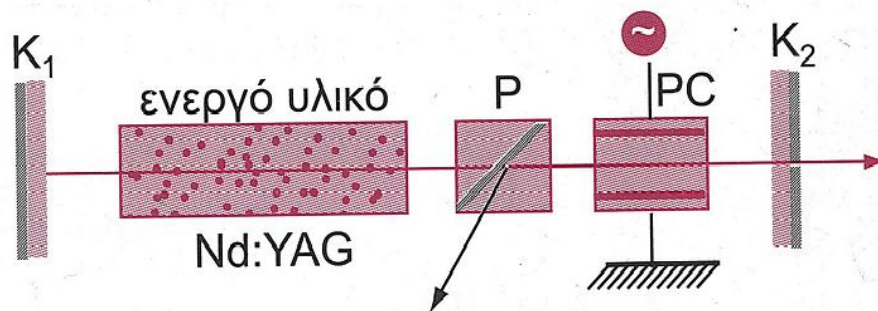
Η μέθοδος αυτή ανήκει στις ενεργές μεθόδους μεταβολής του παράγοντα Q και είναι η πλέον δημοφιλής. Χρησιμοποιεί ηλεκτροοπτικούς κρυστάλλους ως μέσο μεταβολής του παράγοντα Q βασισόμενη στη διπλοθλαστικότητα που συμβαίνει σε κάποια υλικά όταν εφαρμόζεται σε αυτά ηλεκτρική τάση. Η μεταβολή του Q επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο και έναν πολωτή που εκτρέπει τη δέσμη και παίζει το ρόλο διακόπτη. Η παρουσία των κρυστάλλων αυτών δημιουργεί μεγάλες απώλειες στο οπτικό αντηχείο.



Εικόνα 18: Q-switching, διάταξη Kerr

Οι κρύσταλλοι αυτοί, (π.χ. Pockels, Kerr), εμφανίζουν διπλοθλαστικές ιδιότητες όταν εφαρμόζεται σε αυτούς μια συνεχόμενη ή εναλλασσόμενη ηλεκτρική τάση με αποτέλεσμα να στρέφουν το επίπεδο πόλωσης του φωτός. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μετατρέπουν το γραμμικά πολωμένο φως που εκτρέπεται από τον πολωτή σε κυκλικά πολωμένο λόγω της τάσης που τους εφαρμόζεται. Στη συνέχεια λόγω της ανάκλασης από τα κάτοπτρα το φως διέρχεται ξανά μέσα από τον κρύσταλλο και μετατρέπεται σε γραμμικά πολωμένο αλλά με διαφορετική διάταξη σε σχέση με το επίπεδο του πολωτή. Έτσι ο κρύσταλλος εμποδίζει την ανάδραση και οι απώλειες του αντηχείου είναι πολύ μεγάλες.

Όταν η τάση που εφαρμόζεται στον κρύσταλλο μηδενισθεί τότε αυτός χάνει την διπλοθλαστικότητα του και δεν μπορεί να στρέψει πλέον το επίπεδο πόλωσης του φωτός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απότομη μείωση των απωλειών (υψηλό Q) που οδηγεί στη δημιουργία ενός γιγαντοπαλμού (εικ. 18, 19).



Εικόνα 19: διάταξη κοιλότητας laser ND: YAG με ηλεκτροοπτικό κρύσταλλο Pockels.

3) Κορέσιμος Απορροφητής

Η μέθοδος αυτή ανήκει στις παθητικές μεθόδους μεταβολής του παράγοντα Q . Στην τεχνική αυτή τοποθετείται μεταξύ των δύο κατόπτρων μια κυψελίδα με απορροφητικό υλικό κορέσιμος απορροφητής) της οποίας ο συντελεστής απορρόφησης μειώνεται για μεγάλες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Αρχικά, οι απώλειες του αντηχείου λόγω του απορροφητή είναι υψηλές (μικρό Q), αλλά εξακολουθούν να είναι αρκετά χαμηλές ώστε να επιτρέπεται κάποια εκπομπή laser καθώς ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας είναι αποθηκευμένο στο ενεργό υλικό (συνεχόμενη άντληση). Καθώς η ισχύς του laser αυξάνεται διαποτίζεται ο απορροφητής, δηλαδή μειώνονται γρήγορα οι απώλειες του αντηχείου με αποτέλεσμα την ακόμα γρηγορότερη αύξηση της ισχύος του laser. Ίδανικά, αυτό φέρνει τον απορροφητή σε μια κατάσταση με μικρές απώλειες (μεγάλο Q) επιτρέποντας αποτελεσματικότερη εξαγωγή της αποθηκευμένης ενέργειας και οδηγώντας στη δημιουργία ενός γιγαντοπαλμού.

Μετά τον παλμό ο απορροφητής επιστρέφει στην κατάσταση υψηλών απωλειών, έτσι ώστε ο επόμενος παλμός να καθυστερήσει μέχρι η ενέργεια που αποθηκεύεται στο ενεργό υλικό να είναι πλήρως ανανεωμένη. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών μπορεί να ελεγχθεί μόνο έμμεσα (π.χ. μεταβολή της τάσης της αντλίας laser).

Τεχνική Εγκλείδωσης Ρυθμών (Mode Locking)

Με την Τεχνική Εγκλείδωσης Ρυθμών ένα laser μπορεί να παράγει εξαιρετικά στενούς παλμούς (υπερβραχείς παλμοί) της τάξης των μερικών picoseconds (10^{-12}) ή μερικών femtoseconds (10^{-15}). Οι παλμοί αυτοί επαναλαμβάνονται στο χρόνο που χρειάζεται το φως για να ολοκληρώσει μια κυκλική διαδρομή μεταξύ των κατόπτρων του οπτικού αντηχείου. Η βάση αυτής της τεχνικής είναι να δημιουργήσει μια σταθερή φάση μεταξύ των συχνοτήτων εντός του οπτικού αντηχείου. Η κατάσταση αυτή καλείται Εγκλείδωση Φάσης.

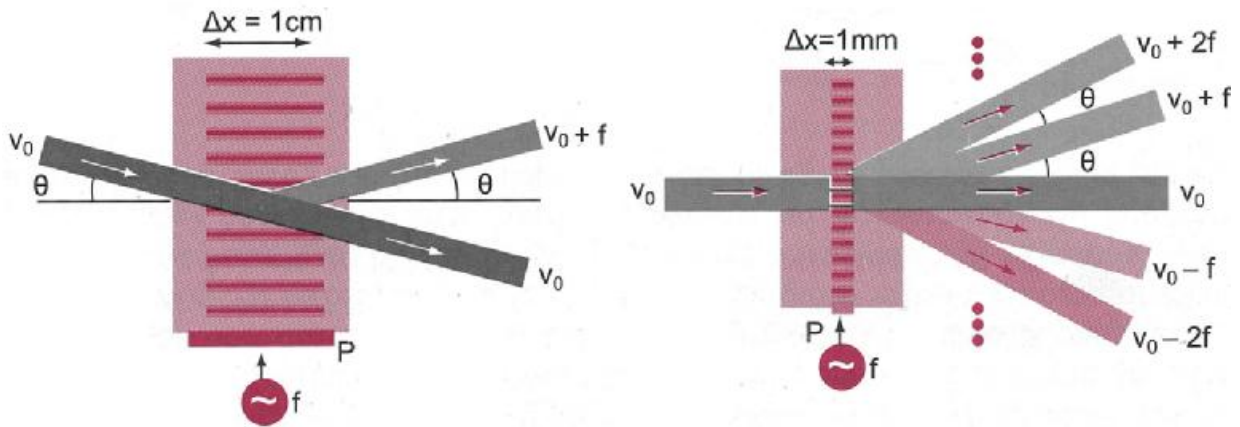
Η τεχνική Εγκλείδωσης ρυθμών μπορεί να πραγματοποιηθεί με ενεργές, παθητικές ή και υβριδικές μεθόδους. Στις ενεργές ανήκουν οι ακουστοοπτικοί διαμορφωτές ενώ στις παθητικές χρησιμοποιούνται κορέσιμοι απορροφητές όπως και στην τεχνική Q-switching. Στις υβριδικές μεθόδους χρησιμοποιείται ένας κορέσιμος απορροφητής και αυξομειώνεται η ηλεκτρική τάση στην συχνότητα που το laser είναι κλειδωμένο.

Η τεχνική Εγκλείδωσης Ρυθμών με τη μέθοδο του ακουστοοπτικού μετατροπέα είναι η δημοφιλέστερη μέθοδος για την παραγωγή υπερβραχέων παλμών και μπορεί να εφαρμοστεί σε Laser συνεχούς και παλμικής λειτουργίας.

Τεχνική Εγκλείδωσης Ρυθμών με τη μέθοδο του Ακουστοοπτικού Διαμορφωτή (AOM)

Ένας ακουστοοπτικός διακόπτης αποτελείται από έναν διαφανή κύβο στον οποίο εφάπτεται πλευρικά ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος χαλαζία. Αν από μια εξωτερική πηγή εφαρμοστεί στον κρύσταλλο μια εναλλασσόμενη τάση τότε ασκείται πίεση στα τοιχώματα του κύβου. Η πίεση αυτή μεταφέρεται στο

εσωτερικό του με τη μορφή στάσιμων ακουστικών κυμάτων. Τα στάσιμα κύματα προκαλούν τοπικές εναλλαγές στο δείκτη διάθλασης και έτσι αν ένα φωτεινό κύμα προσπέσει πάνω στον κύβο περιθλάται κατά τη διέλευση του με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες συχνότητες (ιδιοσυχνότητες).



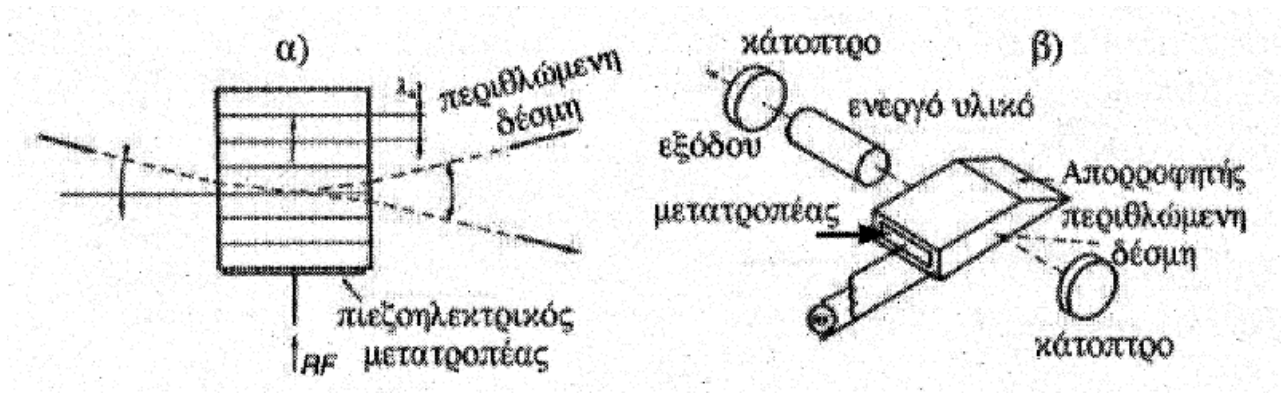
Εικόνα 20: διάταξη ΑΟΜ. Αριστερά, πλάγια πρόσπτωση κύματος οδηγεί σε μία τάξη περίθλασης. Δεξιά, κάθετη πρόσπτωση του κύματος οδηγεί σε διαδοχικές περιθλάσεις και στη δημιουργία νέων ιδιοσυχνοτήτων.

Αν ένας ακουστοοπτικός διακόπτης τοποθετηθεί εντός μιας κοιλότητας laser στο χώρο μεταξύ των κατόπτρων και εφαρμοστεί σε αυτόν εναλλασσόμενη τάση, τότε το αντηχείο θα παρουσιάσει υψηλές απώλειες (χαμηλό Q), έως και διακοπή του laser, εξαιτίας της περίθλασης που θα υφίσταται η εισερχόμενη δέσμη. Οι ιδιοσυχνότητες που δημιουργούνται από την περίθλαση μπορούν να συνεισφέρουν στην ενίσχυση καθώς διερχόμενες ξανά μέσα από τον διαμορφωτή παράγουν νέες πλευρικές συχνότητες οι οποίες με τη σειρά τους παράγουν καινούριες κ.ο.κ. (εικ. 20, 21).

Αν υποθεθεί ότι το πλάτος της ζώνης εκπομπής του ενεργού υλικού είναι $\Delta\nu$ και $\delta\nu$ το πλάτος των ιδιοσυχνοτήτων, τότε το μέγιστο πλήθος N συχνοτήτων που μπορεί να παραχθεί είναι:

$$N = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} \quad (5)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι προφανές ότι όταν $\Delta\nu = \delta\nu$ τότε το N ισούται με τη μονάδα. Η κατάσταση αυτή καλείται εγκλείωση φάσης. Πρακτικά, αυτό οδηγεί σε μηδενισμό της τάσης που ασκείται στον μετατροπέα και στη συνέχεια σε παραγωγή πολύ στενών παλμών laser (υψηλό Q).



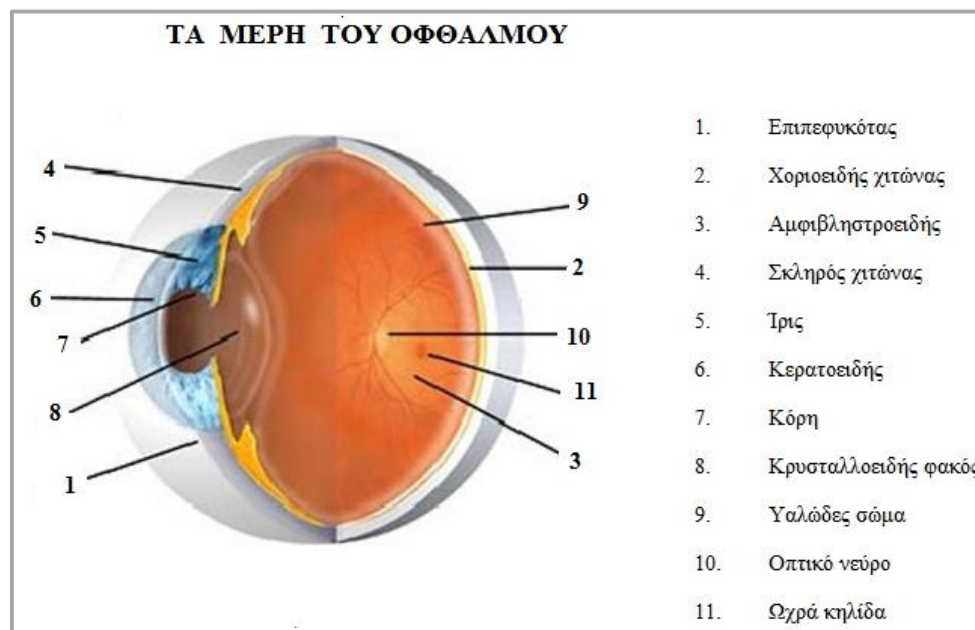
Εικόνα 21: Α. η προσπίπτουσα, διαδιδόμενη και περιθλώμενη ακτίνα σε AOM, Β. διάταξη Laser μεταβλητού Q σε AOM

Μέρος 2^ο

Εισαγωγή

Ο ΟΦΘΑΛΜΟΣ

Ο οφθαλμός (εικ. 22) σαν οπτικό σύστημα λειτουργεί όπως μια φωτογραφική μηχανή. Τα κατάλληλα ερεθίσματα για τον οφθαλμό προέρχονται από το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ανάμεσα δηλαδή στα 400 και 780 nm. Οι πληροφορίες από τα ερεθίσματα φθάνουν στον οφθαλμό με ακτίνες φωτός, που εστιάζονται πρώτα στον διάφανο κερατοειδή χιτώνα, και στη συνέχεια με τη βοήθεια του κρυσταλλοειδούς φακού εστιάζονται πάνω στον αμφιβληστροειδή (εικ.). Με λίγα λόγια ο αμφιβληστροειδής αντιστοιχεί στο φιλμ της φωτογραφικής μηχανής. Από τον αμφιβληστροειδή το ερέθισμα μετατρέπεται σε νευρικό παλμό και μεταφέρεται μέσω του οπτικού νεύρου στον εγκέφαλο όπου γίνεται συνένωση των δυο αμφιβληστροειδικών εικόνων σε μία ενιαία.



Εικόνα 22: Τα μέρη του οφθαλμού

Η ευκρίνεια της όρασης εξαρτάται εν μέρει από την απόσταση μεταξύ κερατοειδούς και αμφιβληστροειδούς, καθώς και από το σχήμα του κερατοειδούς και του κρυσταλλοειδούς φακού. Ένα μάτι χωρίς διαθλαστικές ανωμαλίες λέγεται εμμετρικό και η εικόνα εστιάζεται επάνω στον αμφιβληστροειδή. Εάν η απόσταση μεταξύ κερατοειδούς και αμφιβληστροειδούς δεν είναι η σωστή ή ο κερατοειδής δεν έχει το κατάλληλο σχήμα, η εικόνα προβάλλεται μπροστά ή πίσω από τον αμφιβληστροειδή, με αποτέλεσμα η όραση να είναι θολή και τότε ο οφθαλμός είναι αμμετρικός.

ΤΑ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΑ ΜΕΣΑ ΤΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

Τα σημαντικότερα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού είναι ο κερατοειδής και ο κρυσταλλοειδής φακός. Στο έργο αυτό επικουρούνται από το υδατοειδές υγρό (που ο ρόλος του είναι η ρύθμιση της ενδοφθάλμιας πίεσης και η θρέψη του ματιού) και το υαλώδες σώμα που εκτός από διαθλαστικό ρόλο συμβάλλει στην διατήρηση της δομής του οφθαλμού.

Ο ΚΕΡΑΤΟΕΙΔΗΣ

Ανατομία κερατοειδούς

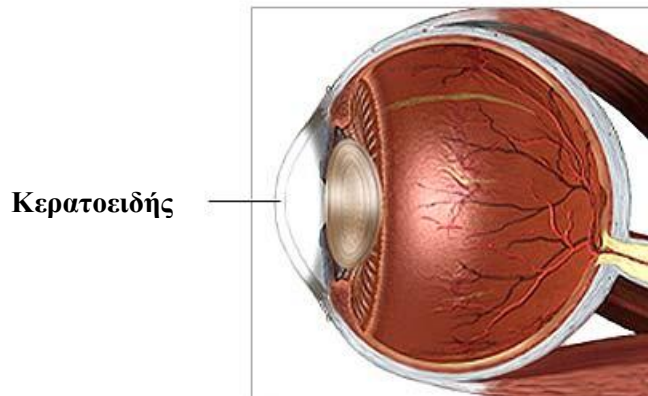
Ο κερατοειδής (εικ. 23) καλύπτει το 1/6 του βολβού και είναι ο πρόσθιος χιτώνας του ματιού. Βρίσκεται στο πρόσθιο ημιμόριο του οφθαλμού μπροστά από την κόρη και την ίριδα και μαζί με τον σκληρό αποτελούν τον ινώδη χιτώνα (εικ.).

Φυσιολογικά είναι ανάγγειος εξασφαλίζοντας την απαραίτητη διαφάνεια για την όραση και έχει ανεπτυγμένο νευρικό δίκτυο. Αποτελείται από ίνες κολλαγόνου παράλληλα διατεταγμένες και έχει 78% περιεκτικότητα σε νερό. Αποτελείται ακόμη από κύτταρα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να επιδιορθώνουν ελαφρές τοπικές βλάβες.

Η νεύρωση του κερατοειδή γίνεται από το τρίδυμο νεύρο (V εγκεφαλική συζυγία) μέσω μακρών ακτινωτών νεύρων γεγονός που τον καθιστά το νευροβριθέστερο ιστό του οφθαλμού. Το κεντρικό πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 450 και 610 μm με το μέσο όρο να είναι 550 μm . Είναι λεπτότερος στο κέντρο του (500- 600 μm) και παχύτερος στην περιφέρεια (700- 1200 μm). Στην πρόσθια επιφάνεια έχει ακτίνα καμπυλότητας (B.C.) 7,8 mm και στην οπίσθια 6,5 mm. Έχει δείκτη διάθλασης 1,38 ο οποίος είναι σταθερός για όλους τους ανθρώπους, σε αντίθεση με την καμπυλότητα που διαφέρει από άτομο σε άτομο.

Ο κερατοειδής αποτελεί τη διαθλαστικότερη επιφάνεια του ανθρώπινου οφθαλμού και έτσι είναι ο κυρίως υπεύθυνος για την ακριβή εστίαση των ακτινών του φωτός στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Στο έργο αυτό συμβάλλει επίσης ο κρυσταλλοειδής φακός του οφθαλμού. Ο οφθαλμός έχει συνολικά διαθλαστική ισχύ 60 διοπτριών(D) περίπου. Από αυτές οι 40 περίπου ανήκουν στον κερατοειδή. Το μεγαλύτερο μέρος της διάθλασης γίνεται στην πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή και αυτό γιατί η οπίσθια επιφάνεια του είναι σε επαφή με το υδατοειδές υγρό που έχει σχεδόν τον ίδιο δείκτη διάθλασης με τον κερατοειδή.

Αποτελείται από 5 ιστολογικές στιβάδες με την εξής σειρά (πρόσθιο προς οπίσθιο τμήμα): επιθήλιο, μεμβράνη του Bowman, στρώμα, δεσκεμέτειος μεμβράνη και ενδοθήλιο.

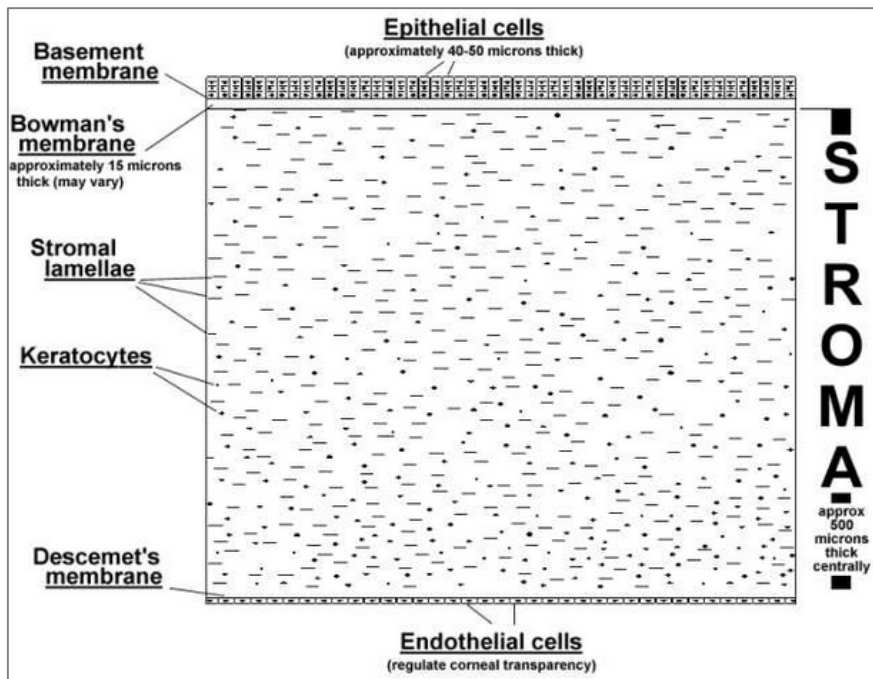


Εικόνα 23: Θέση του κερατοειδή στον οφθαλμό

Αναλυτικότερα οι 5 στιβάδες του κερατοειδή (εικ. 24):

- **Επιθήλιο:** Αποτελείται από 5 στιβάδες κυττάρων (πάχος: 50-60 μm). Ανανεώνει τον αριθμό των κυττάρων του σε μόνιμη βάση αποβάλλοντας τα παλιά κύτταρα (μέσω των δακρύων απομακρύνονται από την επιφάνειά του). Ένα φυσιολογικό επιθήλιο αποτελείται κυρίως από ζωντανά κύτταρα και έναν μικρό αριθμό νεκρών κυττάρων. Όταν αφαιρείται από τον οφθαλμό αναδημιουργείται σε 24 ώρες με πάχος διπλάσιο από το αρχικό και μέσα σε 1- 4 μέρες επανέρχεται στο φυσιολογικό.
- **Μεμβράνη του Bowman ή πρόσθιο αφοριστικό πέταλο:** Αποτελείται από συμπυκνωμένες ίνες κολλαγόνου με ακανόνιστη διάταξη (πάχος: 8-10 μm).
- **Στρώμα ή ιδίως ουσία:** Αποτελεί το 90% του κερατοειδή και δεν είναι ποτέ λεπτότερο από 240 μm . Είναι διαφανές, ινώδες και συμπαγές και αποτελείται από πολλαπλά πέταλα κολλαγόνων ινών που πορεύονται παράλληλα προς την επιφάνεια. Ανάμεσα στις ίνες κολλαγόνου βρίσκονται διάσπαρτα κερατοκύτταρα. Παίζει σημαντικό ρόλο στην θρέψη και στη διατήρηση της δομής του κερατοειδούς.
- **Μεμβράνη του Descemet ή οπίσθιο αφοριστικό πέταλο:** Αποτελεί τη βασική μεμβράνη του ενδοθηλίου και αποτελείται από πολύ λεπτά ινίδια κολλαγόνου (πάχος: 10 μm).
- **Ενδοθήλιο:** Αποτελείται από μια μονή στιβάδα αποπλατυσμένων κυττάρων. Είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά υγρών στο οπίσθιο τμήμα του

κερατοειδούς και διατηρεί την ελαφρά αφυδατωμένη κατάσταση στην οποία πρέπει να βρίσκεται ο κερατοειδής ώστε να διατηρείται η διαύγειά του.

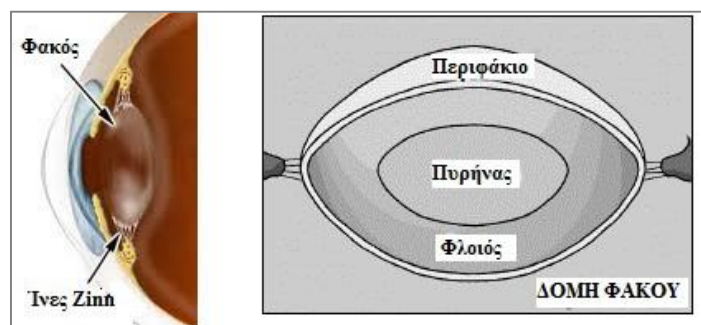


Εικόνα 24: δομή κερατοειδούς (οι 5 στοιβάδες από πάνω προς τα κάτω)

Ο ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΕΙΔΗΣ ΦΑΚΟΣ

Ανατομία κρυσταλλοειδούς φακού

Ο φακός του οφθαλμού (εικ. 25) αποτελεί μια διάφανη αμφίκυρτη δομή αυξημένης ελαστικότητας, που ανατομικά στον οφθαλμό βρίσκεται πίσω από την ίριδα και την κόρη και μπροστά από το υαλώδες σώμα. Η κυρτότητα της πρόσθιας επιφάνειας του είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή της οπίσθιας και ο δείκτης διάθλασης του κυμαίνεται από 1,37 έως 1,42 (ανάλογος με του υδατοειδούς υγρού και του υαλώδους σώματος). Σε ενήλικα οφθαλμό έχει διάμετρο περίπου 10mm και πάχος περίπου 4mm.



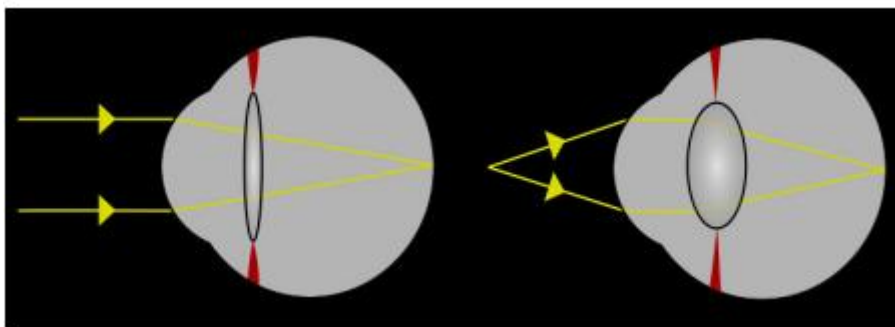
Εικόνα 25: Θέση του φακού και δομή του

Ο φακός διατηρείται στη θέση του στηριζόμενος από τις ίνες της ζηννείου ζώνης οι οποίες προσφύονται στο ακτινωτό σώμα. Τα κύτταρα του είναι κανονικά διατεταγμένα και για αυτό το λόγο ονομάζεται κρυσταλλοειδής. Λόγω της κανονικής διάταξης των κυττάρων ελαχιστοποιείται η διάχυση και η απορρόφηση του φωτός.

Από έξω προς τα μέσα αποτελείται από τρία μέρη: το περιφάκιο, τον φλοιό και τον πυρήνα που περιέχει τις φακαίες ίνες (εικ. 25).

Ο κρυσταλλοειδής φακός έχει τρεις βασικούς ρόλους να επιτελέσει:

1. **Την διάθλαση του φωτός.** Ο φακός διαθλά το φως λόγω της διαφοράς στον δείκτη διάθλασης με τα υλικά που τον περιβάλλουν η οποία όμως είναι μικρή και για το λόγο αυτό έχει μικρότερη διαθλαστική ικανότητα από τον κερατοειδή. Σε κατάσταση μη προσαρμογής συνεισφέρει περίπου 15-20 D από το σύνολο των περίπου 60 της διαθλαστικής δύναμης του ματιού.
2. **Την προσαρμογή.** Λόγω της ελαστικότητάς του, έχει την δυνατότητα να ακολουθεί της συσπάσεις του ακτινωτού μυός με αποτέλεσμα να πραγματοποιεί την λειτουργία της προσαρμογής ώστε να επιτυγχάνεται ευκρινής απεικόνιση για κοντά, μακριά και ενδιάμεσες αποστάσεις. Για μακρινές αποστάσεις μέσω των συσπάσεων ο φακός κυρτώνεται ενώ για κοντινή εστίαση επιπεδώνεται. Σε άτομα κάτω των 40 ετών, ο φακός είναι μαλακός και εύκαμπτος επιτρέποντας μια καλή εστίαση σε όλες τις αποστάσεις (εικ. 26). Με την πάροδο του χρόνου όμως (>40 ετών) χάνει σταδιακά την ελαστικότητα του κάνοντας δύσκολη την κοντινή εστίαση των αντικειμένων (πρεσβυωπία). Τέλος, όπως και ο κερατοειδής, μπορεί να υποστεί βλάβη από έκθεση σε υπεριώδη ή άλλη ακτινοβολία.

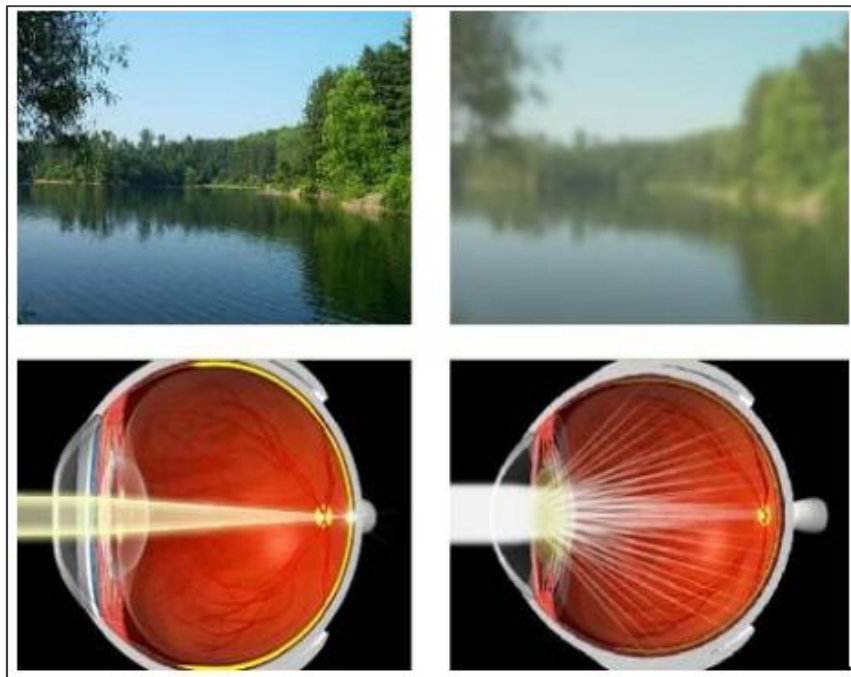


Εικόνα 26: Προσαρμοστική ικανότητα: αριστερά, επιπέδωση του φακού για τη μακρινή εστίαση, δεξιά, αύξηση της επιφάνειας του για κοντινή εστίαση.

3. Την διατήρηση της εσωτερικής ανατομίας του οφθαλμού. Ο φακός μαζί με το υαλώδες σώμα διατηρούν το σχήμα του βολβού.

ΚΑΤΑΡΡΑΚΤΗΣ

Η κυρίαρχη οντότητα στην παθολογία του κρυσταλλοειδούς φακού είναι η θόλωση του, που ονομάζεται καταρράκτης (δεξιά εικόνα). Με τον όρο καταρράκτης εννοούμε οποιαδήποτε θόλωση του φακού, που είτε είναι μικρή και εντοπισμένη είτε καταλαμβάνει ολόκληρο τον φακό. Όταν επηρεάζει την όραση του ασθενούς τότε είναι κλινικά σημαντικός και αντιμετωπίζεται με χειρουργικές τεχνικές που αποβλέπουν κυρίως στην αντικατάσταση του με οργανικό ενδοφακό (εικ. 27).



Εικόνα 27: Πάνω και κάτω αριστερά, όραση και διάθλαση με φυσιολογικό φακό. Πάνω και κάτω δεξιά, όραση και διάθλαση με καταρράκτη.

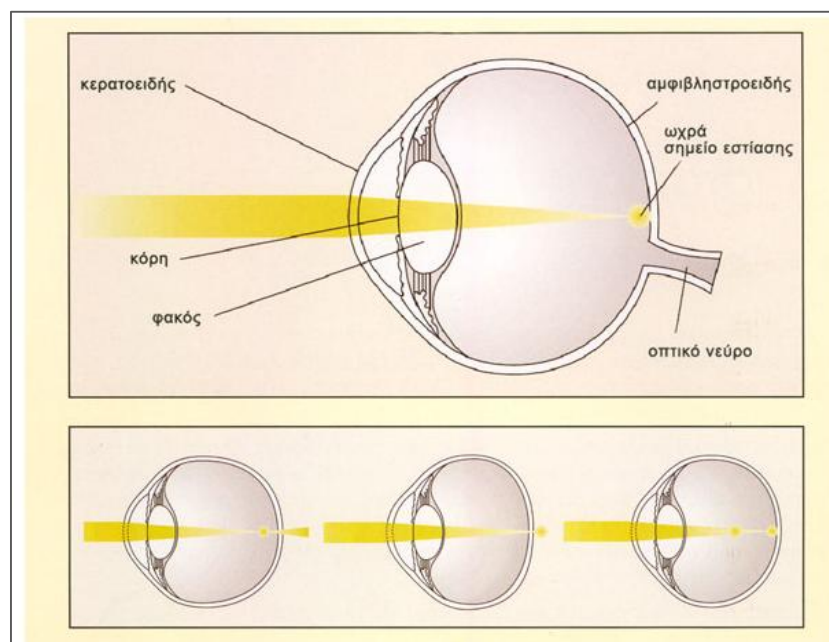
Κεφάλαιο 3

LASER ΣΤΗΝ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑ

Τι είναι η διαθλαστική χειρουργική;

Η διαθλαστική χειρουργική είναι το σύνολο των χειρουργικών τεχνικών που εφαρμόζονται για την διόρθωση διαθλαστικών ανωμαλιών όπως η μυωπία, η υπερμετρωπία, ο αστιγματισμός και η πρεσβυωπία (εικ. 28). Στην ουσία πρόκειται για επεμβάσεις που ρυθμίζουν την εστίαση του οφθαλμού, επεμβαίνοντας σε δομές όπως ο κερατοειδής ή ο κρυσταλλοειδής φακός έτσι, ώστε να επιτυγχάνεται ευκρινής όραση μειώνοντας ή ακόμα και εξαλείφοντας την ανάγκη χρήσης διορθωτικών γυαλιών ή φακών επαφής. Οι τεχνικές που εφαρμόζονται είναι αρκετές και διαφορετικές, και κάθε φορά επιλέγεται αυτή που θα προσφέρει το καλύτερο αποτέλεσμα στον ασθενή ανάλογα με τις ανάγκες και τις ιδιαιτερότητες της κατάστασης του.

Κύριος στόχος της διαθλαστικής χειρουργικής είναι η αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδούς μέσω της σμίλευσης της επιφάνειάς του με την χρήση laser καθώς και η χειρουργική αντιμετώπιση του καταρράκτη. Παρακάτω θα αναφερθούν αρκετές τεχνικές.



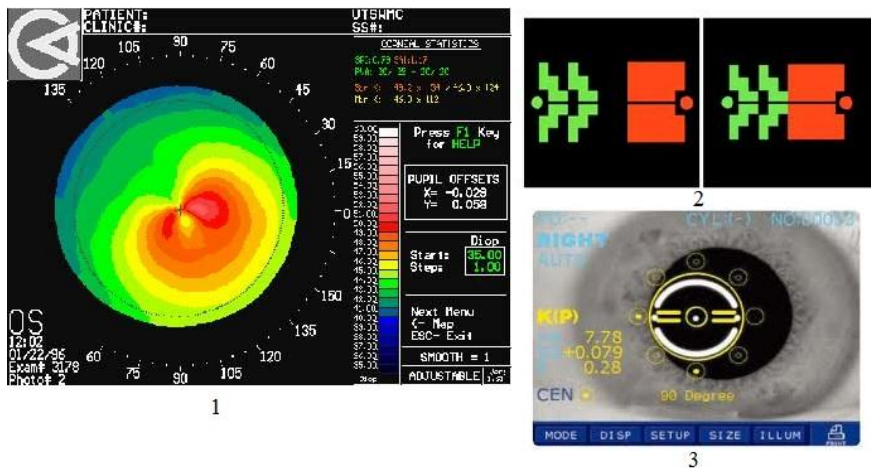
Εικόνα 28: Πάνω, εστίαση με φυσιολογικό οφθαλμό. Κάτω (με σειρά από αριστερά προς δεξιά), εστίαση σε μυωπικό, υπερμετρωπικό και αστιγματικό οφθαλμό.

Προεγχειρητικός έλεγχός

Πριν από μια επέμβαση laser στα μάτια, είναι απαραίτητο να γίνεται σχολαστικός έλεγχος καταλληλότητας του υποψηφίου ασθενούς για τη διαθλαστική επέμβαση, ανεξάρτητα αν αυτή αφορά τη διόρθωση μυωπίας, αστιγματισμού, πρεσβυωπίας ή υπερμετροπίας, καταρράκτη κ.τ.λ. Σκοπός του προεγχειρητικού ελέγχου είναι να διασφαλιστεί ότι ο ασθενής που θα υποβληθεί στην επέμβαση laser έχει τις μέγιστες πιθανότητες για επιτυχή αποτελέσματα, χωρίς επιπλοκές και να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνική laser με βάση τις ανάγκες του υποψηφίου (εικ. 29).

Οι γενικές προϋποθέσεις για την καταλληλότητα ασθενούς για επέμβαση laser στα μάτια είναι:

- § Ηλικία ασθενούς τουλάχιστον 18 ετών
- § Σταθερή όραση ασθενούς κατά τους τελευταίους 12 μήνες
- § Καλή γενική υγεία ασθενούς
- § Οι γυναίκες να μην βρίσκονται σε περίοδο εγκυμοσύνης ή θηλασμού
- § Ο ασθενής να μην πάσχει από χρόνιες παθήσεις του οφθαλμού
- § Ο ασθενής να έχει σταματήσει την χρήση μαλακών φακών επαφής για τουλάχιστον 20 μέρες πριν ή την χρήση σκληρών φακών επαφής για τουλάχιστον 1 μήνα πριν από τις προεγχειρητικές εξετάσεις και την επέμβαση laser.



Εικόνα 29: 1. εικόνα από τοπογραφία κερατοειδή, 2. εικόνα από κερατόμετρο Javal, 3. εικόνα από αυτόματο κερατοδιαθλασίμετρο.

Εκτός από τις παραπάνω γενικές προϋποθέσεις που θα πρέπει να πληρούνται από τον ο υποψήφιο, εκτελούνται μια σειρά από εξειδικευμένες οφθαλμολογικές εξετάσεις για τον έλεγχο της ανατομικής και οπτική κατάσταση του οφθαλμού του ασθενούς (πίνακας 2). Οι εξετάσεις αυτές περιλαμβάνουν:

- Πλήρη διαθλαστικός έλεγχος (συνταγή), με και χωρίς κυκλοπληγία τα αποτελέσματα του οποίου θα συγκριθούν με παλαιότερες συνταγές προηγούμενων ετών.
- Τοπογραφία κερατοειδούς(Orbscan, Pentacam) για να ελεγχθεί η μορφολογία του κερατοειδή και να αξιολογηθεί η καταλληλότητα του για την επέμβαση.
- Έλεγχος wavefront την εκτίμηση των μικρό-ανωμαλιών του κερατοειδή.
- Παχυμετρία κερατοειδούς. Οι πολύ λεπτοί κερατοειδείς αποτελούν αντένδειξη για επέμβαση. Απαιτείται ένα ελάχιστο πάχος γύρω στα 510μm. Η επέμβαση LASIK αντενδεικνύεται σε λεπτούς κερατοειδείς.
- Έλεγχος ξηροφθαλμίας. Μετά από επέμβαση τύπου LASIK η ξηροφθαλμία θα επιταθεί για αρκετό χρονικό διάστημα.
- Μέτρηση του εύρους της κόρης στο σκοτάδι. Το εύρος της σμίλευσης με το laser θα πρέπει να το υπερβαίνει.
- Πλήρης οφθαλμολογική εξέταση:
 - Ø Εξέταση των βλεφάρων και του προσθίου ημιμορίου του οφθαλμού (σχισμοειδής λυχνία),
 - Ø των οφθαλμοκινητικών μυών,
 - Ø του οπτικού νεύρου (placebo disk),
 - Ø της ενδοφθάλμιας πίεσης (τονομέτρηση),
 - Ø του βυθού (βυθοσκόπηση).
- Σε ειδικές περιπτώσεις, μέτρηση των κυττάρων του κερατοειδούς, οπτικών πεδίων (περιμετρία), κ.α.

Μετρήσεις του Κερατοειδή που χρησιμοποιούνται στη Διαθλαστική Χειρουργική			
Πάχος (μm)		Ακτίνα	
Περιφερικό	700	καμπυλότητας(mm)	
Κεντρικό	540	Πρόσθια	7,7
		Οπίσθια	6,9
Δείκτης Διάθλασης		Κεντρική ακτίνα	
		καμπυλότητας και	
		διαθλαστική ισχύς	
Αέρας	1,00	Αέρας- δάκρυ	7,7mm= +43,6D
Δάκρυ	1,336	Δάκρυ- κερατοειδής	7,7 mm= +5,3D
Κερατοειδής	1,376	Κερατοειδής- υδατοειδές	6,9mm= -5,8 D
Υδατοειδές	1,336	Ολική κεντρική διαθλαστική ισχύς	=43,1 D

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: βασικές μετρητικές ενδείξεις που απαιτούνται πριν μια επέμβαση laser.

Όλες οι παραπάνω εξετάσεις είναι σημαντικές και απαραίτητες πριν από κάθε διαθλαστική επέμβαση laser καθώς στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι 1 στους 4 υποψήφιους ασθενείς δεν είναι κατάλληλοι για εγχείρηση laser.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ LASER ΣΤΗΝ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΗ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των laser οδήγησε στην ανάπτυξη μιας πληθώρας τεχνικών με σκοπό την διόρθωση των διαθλαστικών ανωμαλιών ανάλογα με τις ανάγκες του υποψήφιου αμμέτρωπα. Οι δύο πιο γνωστές τεχνικές στις οποίες βασίζονται και οι υπόλοιπες παραλλαγές είναι η Laser in Situ Κερατοσμίλευση (LASIK) και η Φωτοδιαθλαστική Κερατεκτομή (Photorefractive Keratectomy – PRK).

Τρόπος εφαρμογής της δέσμης laser ανάλογα με το διαθλαστικό σφάλμα

Μυωπία: Για τη διόρθωση της μυωπίας απαιτείται επιπέδωση του κερατοειδή που σημαίνει ότι το laser εφαρμόζεται κεντρικά, κάθετα στον κερατοειδή σε κυκλικό σχήμα.

Υπερμετρωπία: Στην υπερμετρωπία απαιτείται δέσμη laser μικρότερου εύρους. Η δέσμη εφαρμόζεται περιφερικά στον κερατοειδή με κλίση ώστε να αυξηθεί η καμπυλότητα του και αποδομεί τον ιστό σε σχήμα έλλειψης. Η διόρθωση της υπερμετρωπίας πάνω από 3- 4 D είναι λιγότερο προβλέψιμη από της μυωπίας και εμφανίζονται συχνά φαινόμενα υποστροφής.

Αστιγματισμός: Το βάθος της φωτοαποδόμησης είναι μεγαλύτερο στο μεσημβρινό με το μεγαλύτερο σφάλμα.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι τεχνικές laser που εφαρμόζονται για την αντιμετώπιση των διαθλαστικών ανωμαλιών του οφθαλμού.

PRK (Photorefractive Keratectomy)

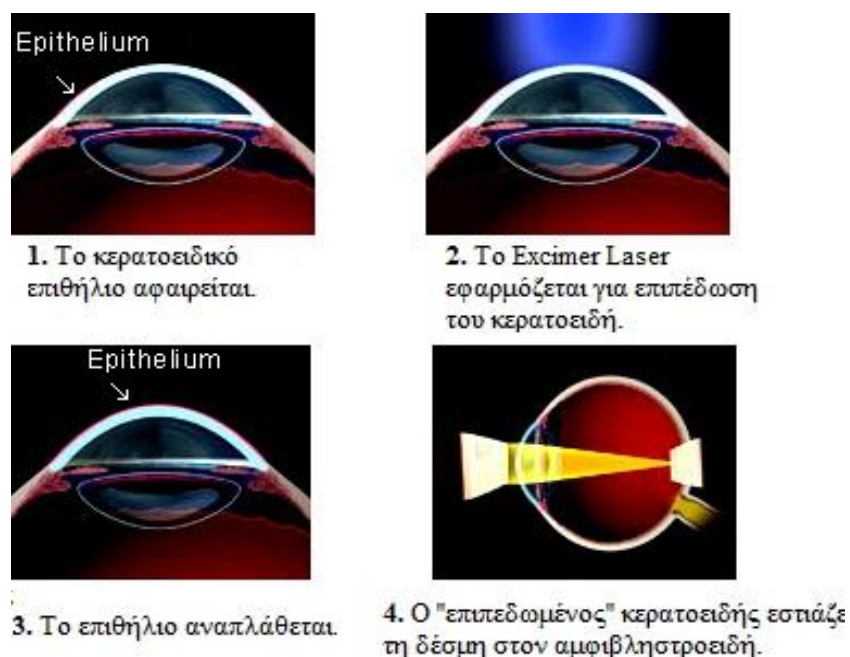
Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην φωτοαποδόμηση (κεφ. 4) των επιφανειακών στοιβάδων του κερατοειδούς έτσι ώστε να αλλάξει η καμπυλότητα του και να εστιάζεται το φως στον αμφιβληστροειδή.

Τεχνική (εικ. 30):

Αρχικά, με ένα ειδικό εργαλείο τον μικροκερατόμο γίνεται αφαίρεση του επιθηλίου σε μια κεντρική περιοχή του κερατοειδούς. Στην συνέχεια, μετά την

απομάκρυνση του επιθηλίου, με τη χρήση Excimer laser φωτοαφαιρείται η μεμβράνη του Bowman και το κερατοειδικό στρώμα σε προκαθορισμένο βάθος και σε χρόνο 30- 60 δευτερολέπτων). Το Excimer laser δρα σε ζώνη διαμέτρου 6-7 mm και τροποποιεί ελεγχόμενα τον κερατοειδικό ιστό διορθώνοντας το διαθλαστικό σφάλμα.

Όταν η διόρθωση αφορά και αстиγματισμό η επέμβαση ονομάζεται Φωτοαστιγματική Κερατεκτομή.



Εικόνα 30: Τα στάδια της τεχνικής PRK

Στο τέλος της επέμβασης, τοποθετείται ένας μαλακός φακός επαφής για να βοηθήσει την επούλωση του κερατοειδή μέσα στις επόμενες τρεις με τέσσερις μέρες (το επιθήλιο του κερατοειδή συνήθως αναπλάθεται εντός 48-72 ωρών).

ΕΝΔΕΙΞΕΙΣ PRK	
ΜΥΩΠΙΑ	<6,00 D με αστιγματισμό <3,00 D
ΥΠΕΡΜΕΤΡΩΠΙΑ	<2,50 D

t-PTK- PRK

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια παραλλαγή της PRK. Στην μέθοδο αυτή η επέμβαση γίνεται εξολοκλήρου με την χρήση laser υψηλής ακρίβειας. Η αφαίρεση του κερατοειδικού επιθηλίου πραγματοποιείται με laser και στην συνέχεια εφαρμόζεται η διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος με Excimer

Laser στην επιφάνεια του κερατοειδούς όπως και στην PRK. Η τεχνική αυτή δεν χρησιμοποιεί μηχανικές μεθόδους για την αφαίρεση του επιθηλίου και την διεκπεραίωση της διόρθωσης, με αποτέλεσμα να γίνεται πρακτικά «χωρίς να αγγίζει» τον κερατοειδή.

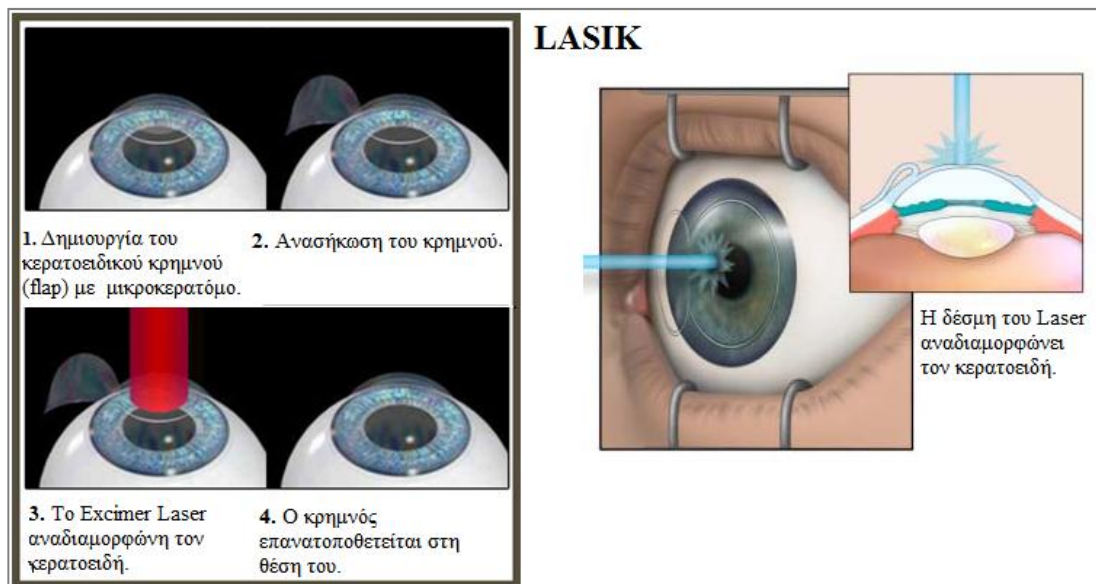
Η επέμβαση διαρκεί λίγα λεπτά για τον κάθε οφθαλμό. Η διαδικασία γίνεται με σταγόνες όπως και η PRK και στην συνέχεια τοποθετείται φακός επαφής μέχρι την επούλωση του επιθηλίου για τρεις με τέσσερις περίπου μέρες.

LASIK (με Excimer Laser)

Η LASIK σαν μέθοδος είναι μεταγενέστερη της PRK. Στη μέθοδο αυτή η διόρθωση της διαθλαστικής ανωμαλίας γίνεται στο εσωτερικό του κερατοειδούς και όχι στην επιφανειακές στιβάδες όπως στην PRK. Συνήθως εφαρμόζεται σε ασθενείς με διαθλαστικό σφάλμα άνω των 5,0 D επειδή απαιτεί μεγαλύτερο πάχος κερατοειδή.

Τεχνική (εικ. 31):

Με τη βοήθεια του μικροκερατόμου αρχικά δημιουργείται ένα λεπτό επιφανειακό πέταλο κερατοειδικού ιστού (κερατοειδικός κρημνός-corneal flap) πάχους 160 μm το οποίο δεν αφαιρείται αλλά συνεχίζει να συνδέεται με ένα μίσχο με τον υπόλοιπο κερατοειδή στη μια του πλευρά. Στη συνέχεια, το πέταλο ανασηκώνεται, αποκαλύπτοντας τις εσωτερικές στιβάδες του κερατοειδούς και εφαρμόζεται το Excimer Laser στο κερατοειδικό στρώμα, αλλάζοντας την καμπυλότητα του κερατοειδούς με στόχο τη διαθλαστική μεταβολή του.



Εικόνα 31: Τα στάδια τεχνικής LASIK και δράση δέσης laser στον κερατοειδή

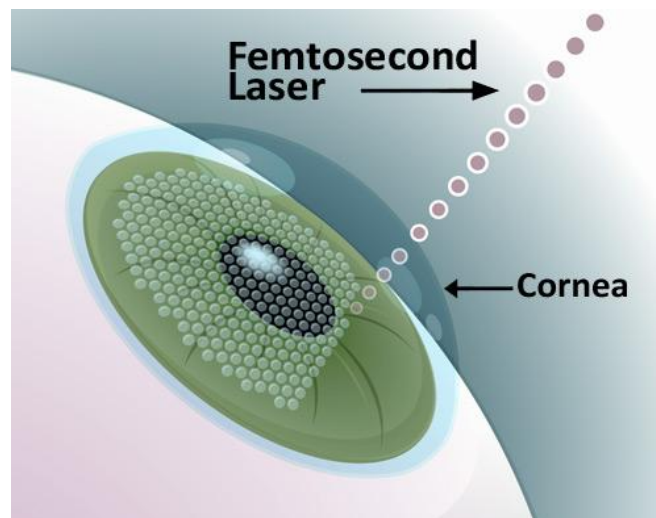
Μετά την εφαρμογή του Excimer Laser ο κερατοειδικός κρημνός επανατοποθετείται στην θέση του, στρώνεται και κολλά χωρίς να χρειάζονται ράμματα.

Η επέμβαση γίνεται με αναισθητικές σταγόνες, διαρκεί λίγα λεπτά για το κάθε μάτι και είναι ανώδυνη.

Femtosecond LASIK (Μέθοδος διαθλαστικής διόρθωσης με τη χρήση Femtosecond Laser) (εικ. 32)

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται laser τελευταίας γενιάς και εξαιρετικής ακρίβειας για τη δημιουργία της κερατοειδικής τομής χωρίς τη χρήση του μικροκερατόμου. Έτσι η τομή δημιουργείται με απόλυτη ακρίβεια ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του οφθαλμού του κάθε ασθενούς.

Μετά την δημιουργία του πετάλου ακολουθεί η διόρθωση του διαθλαστικού σφάλματος με τη χρήση laser που αλλάζει την καμπυλότητα του κερατοειδούς όπως και στην παραδοσιακή LASIK. Η αποκατάσταση της όρασης είναι άμεση, αφού οι ασθενείς βλέπουν καθαρά αμέσως μετά το χειρουργείο.



Εικόνα 32: εφαρμογή femtosecond laser στον κερατοειδή

Η επέμβαση διαρκεί λίγα λεπτά για το κάθε μάτι, είναι ανώδυνη και γίνεται με αναισθητικές σταγόνες.

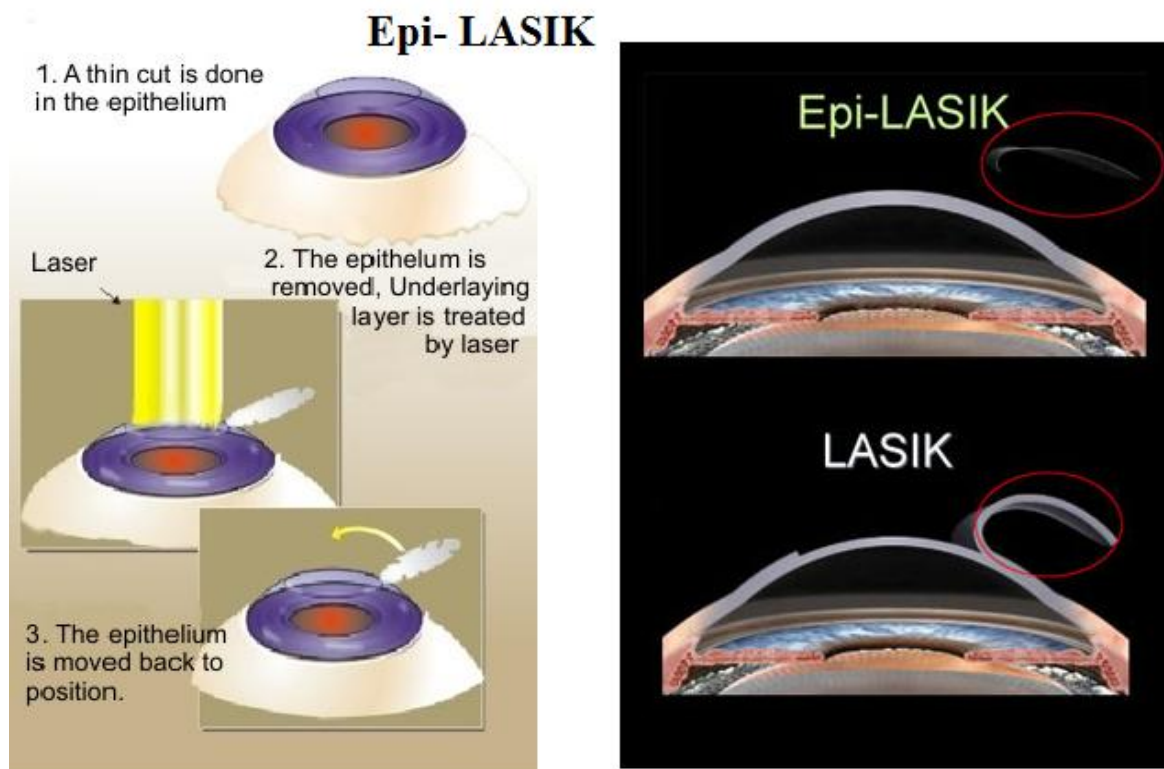
Δυο παραλλαγές της φωτοδιαθλαστικής χειρουργικής είναι η LASEK και η Epi-LASIK. Στις δύο αυτές τεχνικές το αφαιρούμενο επιθήλιο επανατοποθετείται στον κερατοειδή μέχρι να ολοκληρωθεί η ανάπλαση του καινούριου.

Epi-LASIK (εικ. 33)

Η τεχνική Epi-LASIK είναι μια μέθοδος επιφανειακής φωτοεκτομής. Όπως και στην PRK, πραγματοποιείται επιφανειακή φωτοεκτομή και αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδούς. Η διαφορά είναι ότι το επιθήλιο δεν αφαιρείται αλλά διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο κερατοειδή με ένα ειδικό εργαλείο, τον επικερατόμο. Στη συνέχεια το laser δρα πάνω στην επιφάνεια του υπόλοιπου κερατοειδούς διορθώνοντας το διαθλαστικό σφάλμα και το επιθήλιο που αφαιρέθηκε επανατοποθετείται στο τέλος της επέμβασης.

Στο τέλος της επέμβασης τοποθετείται ένας προστατευτικός φακός επαφής που μένει για τρεις με τέσσερις μέρες μέχρι να ολοκληρωθεί η επούλωση.

Η επέμβαση διαρκεί λίγα λεπτά για το κάθε μάτι, γίνεται με τοπικές αναισθητικές σταγόνες και είναι ανώδυνη.



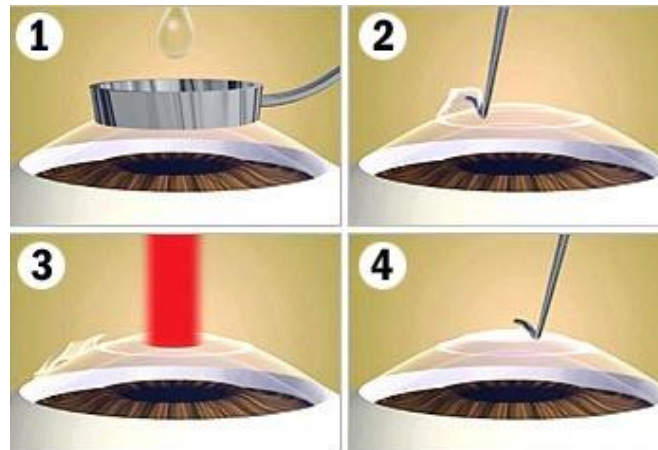
Εικόνα 33: Στάδια της Epi- LASIK, διαφορά κρημού LASIK- Epi- LASIK

LASEK (εικ.34)

Στην μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται αραιό διάλειμμα αλκοόλης για να διαχωριστεί το επιθήλιο από τον υπόλοιπο κερατοειδή. Στη συνέχεια ο κερατοειδής ανασηκώνεται και με ένα αμβλύ μαχαίριδιο αποκολλάται

συρρικνώνεται προς μια κατεύθυνση. Έπειτα εφαρμόζεται το laser που αλλάζει την καμπυλότητά του κερατοειδούς, όπως στην PRK.

Το επιθήλιο επανατοποθετείται στον κερατοειδή και στο τέλος της επέμβασης τοποθετείται ένας φακός επαφής μέχρι να ολοκληρωθεί η επούλωση του επιθηλίου μέσα στις επόμενες τρεις με τέσσερις μέρες.



εικόνα 34: Στάδια της μεθόδου LASEK

Η επέμβαση διαρκεί λίγα λεπτά για το κάθε μάτι, είναι ανώδυνη και γίνεται με αναισθητικές σταγόνες.

Σύγκριση LASIK και PRK (πίνακας 3)

Στην PRK αφαιρείται λιγότερος κερατοειδικός ιστός και το επιθήλιο αναπλάθεται εκ νέου και δεν επικολλείται όπως στη LASIK. Αυτό σημαίνει ότι μειώνονται οι επιπλοκές στην όραση λόγω κακής «συγκόλλησης» του κερατοειδικού κρημνού. Κατά την επούλωση του κρημνού μπορεί να συμβούν αλλαγές στην καμπυλότητα του κερατοειδή που να οδηγήσουν στη δημιουργία εκτροπών. Κύριο μειονέκτημα της PRK έναντι στη LASIK είναι ο μετεγχειρητικός πόνος και η ανάγκη χρήσης τοπικών στεροειδών για περίπου τρεις μήνες που δρουν στον κερατοειδή ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση επιφανειακών νεφελίων (haze) και η επανάκαμψη του διαθλαστικού σφάλματος.

Η εμφάνιση των επιφανειακών νεφελίων και η επανάκαμψη της μυωπίας οφείλονται στο ότι ενόσω το επιθήλιο αναπλάθεται μετεγχειρητικά έρχεται σε επαφή με το κερατοειδικό στρώμα καθώς η μεμβράνη του Bowman έχει φωτοαφαιρεθεί. Επίσης, η αποκατάσταση της όρασης παίρνει 1- 2 εβδομάδες.

Στη μέθοδο LASIK ο ασθενής δεν αισθάνεται πόνο μετά την επέμβαση και η χρήση των στεροειδών είναι πολύ περιορισμένη (περίπου μια εβδομάδα). Η μεμβράνη του Bowman παραμένει ακέραια και έτσι αποφεύγονται οι επιπλοκές της PRK. Η όραση επανέρχεται σε 2-3 μέρες. Στη LASIK η μεγάλη αφαίρεση κερατοειδικού ιστού μπορεί να οδηγήσει αργότερα κατά την επούλωση σε εκτασία του κερατοειδή.

Η PRK επιλέγεται για διαθλαστικά σφάλματα κάτω των 5,0 D ενώ η LASIK για μεγαλύτερα.

LASIK	PRK
FLAP/ πιο πολύπλοκη επέμβαση	Ολική αφαίρεση επιθηλίου
Ανώδυνη μετεγχειρητικά	Πόνος για 2-3 μέρες μετεγχειρητικά
Ταχεία επάνοδος όρασης 1-3 μέρες	Πιο αργή επάνοδος όρασης 1-2 εβδομάδες
Καλύτερη για υπερμετροπία	Καλύτερη σε ξηροφθαλμία
Απαιτεί μεγαλύτερο πάχος κερατοειδή	Γίνεται και σε λεπτότερο κερατοειδή
Απαιτεί συγκεκριμένα ανατομικά στοιχεία κερατοειδούς, κόγχου	Δεν επηρεάζεται τόσο από ακραίες παραμέτρους αυτών των στοιχείων.
Προβλήματα κυρίως λόγω FLAP	Προβλήματα κυρίως λόγω haze
Σταθερότητα σε 1 εβδομάδα έως 1 μήνα (έως και 3 μήνες)	Σταθερότητα σε 1-3 μήνες (έως και 6-12 μήνες)

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: σύγκριση LASIK- PRK

ΕΠΟΥΛΩΣΗ & ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΗ ΑΓΩΓΗ ΜΕΤΑ ΑΠΟ PRK/LASIK

Μετά από μια επέμβαση με μέθοδο PRK, τοποθετείται στον οφθαλμό ένας προστατευτικός μαλακός φακός επαφής, ο οποίος αφαιρείται τρεις με πέντε ημέρες μετά την επέμβαση, όσο δηλαδή χρειάζεται για να αναπλαστεί το επιθήλιο του κερατοειδούς. Αντιθέτως, στη LASIK δεν απαιτείται συνήθως η χρήση φακού για επούλωση. Μετά από επέμβαση PRK ο ασθενής έχει την αίσθηση ξένου σώματος στον οφθαλμό κάτι που είναι απολύτως φυσιολογικό λόγω των τομών.

Στους ασθενείς μετά από διαθλαστική επέμβαση χορηγούνται κολλύρια τα οποία βοηθούν στη διαδικασία της επούλωσης του κερατοειδή και καταπραΰνουν τον πόνο (PRK). Τα κολλύρια (π.χ. Refresh, Exocin, Denaclof, FML κ.α) δίνονται σε συγκεκριμένες δοσολογίες και χρονοδιαγράμματα που πρέπει να τηρούνται με ακρίβεια. Μετά από επέμβαση LASIK η χρήση των κολλυρίων συνεχίζεται συνήθως για 15 ημέρες, ενώ μετά από PRK για πέντε μήνες. Η όραση τις πρώτες ώρες μετά το χειρουργείο είναι θολή αποκαθιστάται σταδιακά και κατά το μεγαλύτερο μέρος της (περίπου μέχρι και 80%) τις πρώτες τρεις τέσσερις μετεγχειρητικές ημέρες ανάλογα και από το είδος της επέμβασης.

Σημεία που πρέπει να προσέξει ο υπονήφιος πριν και μετά την επέμβαση διαθλαστικής χειρουργικής (πηγή: www.ivo.gr)

Την ημέρα της επέμβασης:

- ✓ Ο ασθενής θα πρέπει να έχει μαζί του ένα ζευγάρι γυαλιών ηλίου με σκουρόχρωμους φακούς λόγω αυξημένης φωτοευαισθησίας.
- ✓ Ο ασθενής θα πρέπει να αποφύγει να οδηγήσει μετά την επέμβαση λόγω θολερότητας της όρασης.
- ✓ Ο ασθενής θα πρέπει να αποφύγει τη χρήση αρωμάτων η καλλυντικών για να αποφευχθούν τυχόν ερεθισμοί στα μάτια..

Μετά την επέμβαση:

- ✓ Να αποφεύγεται το τρίψιμο των ματιών (ερεθισμός- μηχανική επιπέδωση του κερατοειδή).
- ✓ Να αποφεύγονται δραστηριότητες όπως το τρέξιμο ή το κολύμπι για τουλάχιστον 10 μέρες μετά την επέμβαση.
- ✓ Να αποφεύγεται η εισροή νερού στα μάτια.
- ✓ Να αποφεύγονται ουσίες που μπορεί να ερεθίσουν τα μάτια όπως σαμπουάν, καπνός κτλ.
- ✓ Να αποφεύγεται η χρήση καλλυντικών ή μακιγιάζ ματιών για τουλάχιστον 10 μέρες μετά την επέμβαση.

Μετά την επέμβαση και μέχρι να αποκατασταθεί ο κερατοειδής και να σταθεροποιηθεί η όραση ακολουθεί μια σειρά εξετάσεων στο μετεγχειρητικό διάστημα που ποικίλει ανάλογα με το είδος του χειρουργείου.

- **1η μέρα:** έλεγχος του κερατοειδικού κρημνού (LASIK)
- **1η εβδομάδα:** έλεγχος της όρασης
- **1ος μήνας:** έλεγχος για το αν χρειάζεται συμπληρωματική επέμβαση
- **3ος- 6ος μήνας:** συμπληρωματική επέμβαση εάν είναι απαραίτητη και εφικτή.
- **6ος μήνας:** έλεγχος οπτικής σταθερότητας του οφθαλμού
- **12ος μήνας:** τελικός έλεγχος

Συμπτώματα μετά την επέμβαση (εικ. 35)

Η φωτοδιαθλαστική χειρουργική μπορεί να δημιουργήσει πιθανές επιπλοκές οι οποίες προέρχονται κυρίως από ανωμαλίες στην συγκόλληση του κερατοειδικού κρημνού (LASIK), από διαταραχές στη μηχανική σταθερότητα του κερατοειδή και από τη δημιουργία κρημνού σε περιπτώσεις μεγάλης μείωσης του πάχους του κερατοειδή (ειδικά σε διορθώσεις υψηλών αμμετροπιών). Τα κυριότερα συμπτώματα που μπορεί να παρουσιάσει ένας ασθενής μετά την επέμβαση με laser είναι:

- Ελαφρά ενόχληση και αίσθηση ξένου σώματος στο μάτι.
- Ερυθρότητα/ Κόκκινα στίγματα (αιμορραγία επιπεφυκότα).
- Υπερβολική έκκριση δακρύων (δακρύρροια ή ξηροφθαλμία).
- Ελαφριά διόγκωση του βλεφάρου.
- Ευαισθησία στο φως.

Μετά από 48 ώρες, τα περισσότερα από τα παραπάνω συμπτώματα θα ελαχιστοποιηθούν, ενώ τα παρακάτω μέσα στους πρώτους 3 μήνες:

- Ξηροφθαλμία/ Αίσθημα ξηρότητας του οφθαλμού.
- Πρόβλημα στο διάβασμα/ ενδεχόμενη κούραση μετά από πολύωρη κοντινή εργασία.
- Αυξομειώσεις ευκρινούς όρασης (θολώσεις) κατά την διάρκεια της ημέρας μέσα στο πρώτο 3μήνο.



Εικόνα 35: Εικόνα οφθαλμού μετά από LASIK

Επιπλοκές

Μετά την επέμβαση με laser είναι πιθανόν να εμφανιστούν επιπλοκές στους οφθαλμούς. Βάσει κλινικών έρευνες έχουν διαπιστωθεί οι ακόλουθες επιπλοκές με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης:

- Πιθανότητα κεντρικών κερατοειδικών θολωμάτων(PRK) μικρότερη του 3% (αντιμετωπίζεται φαρμακευτικά).
- Πιθανή ανάγκη συμπληρωματικής επέμβασης μικρότερη του 5%.
- Πιθανότητα ύπαρξης φωτοστέφανων γύρω από φωτεινές πηγές και δυσκολίας στη νυχτερινή όραση μικρότερη του 5%.
- Πιθανότητα ξηροφθαλμίας μικρότερη του 5-10%.
- Πιθανότητα πτώσης βλεφάρου μικρότερη του 1%.
- Πιθανότητα φλεγμονής μικρότερη του 0,03% (συνήθως αντιμετωπίζεται φαρμακευτικά).

Ποιο σπάνιες επιπλοκές που έχουν διαπιστωθεί είναι οι εξής:

- *Φλεγμονή/μόλυνση και καθυστερημένη επούλωση του κερατοειδή:* Υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα ο κερατοειδής του ματιού να μολυνθεί από μικροβιακή κερατίτιδα. Αυτό σημαίνει πόνος και αργή επούλωση του ματιού.
- *Υποδιόρθωση ή Υπερδιόρθωση:* Ο κάθε κερατοειδής έχει μοναδικά χαρακτηριστικά. Σε διαθλαστικά σφάλματα μέχρι 7 D υπολογίζεται ότι μπορεί να μείνει ένα υπόλοιπο σφάλματος της τάξης της 1 D. Υπάρχουν οφθαλμοί όμως που αντιδρούν διαφορετικά στο laser, με αποτέλεσμα η διόρθωση να μην είναι η επιθυμητή και ο ασθενής να χρειάζεται ακόμα γυαλιά ή φακούς για να βλέπει καθαρά. Σε διαθλαστικά σφάλματα μεγαλύτερα των 8 D η πρόβλεψη για μετά την επέμβαση δεν μπορεί να είναι ακριβής. Στις περιπτώσεις αυτές ελέγχεται το πάχος του κερατοειδή και αν είναι σε επιτρεπτό όριο (τουλάχιστον 440μm) η επέμβαση μπορεί να επαναληφθεί μετά το πέρας 6 μηνών.
- *Πτώση της οπτικής αξότητας:* Δημιουργία θόλωσης (αντιμετωπίζεται φαρμακευτικά) ή έκκεντρης εκτομής (αντιμετωπίζεται με συμπληρωματική επέμβαση).
- *Διακοπή/Αναβολή:* Κατά τη διάρκεια επεμβάσεων LASIK, υπάρχει μια πολύ μικρή πιθανότητα, λόγω τεχνικού προβλήματος στο laser, να πρέπει να διακοπεί η επέμβαση χωρίς να γίνει η διόρθωση. Σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία επαναλαμβάνεται αφού το μάτι επούλωθεί (3 μήνες).
- *Επιπλοκές στη δημιουργία του πετάλου του κερατοειδικού ιστού:* Σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να συμβεί επιπλοκή στη δημιουργία του επιφανειακού πετάλου του κερατοειδούς (LASIK τεχνική).

- *Εκτασίες του κερατοειδούς:* Σε βάθος χρόνου αν το laser διεισδύσει βαθύτερα στον κερατοειδή.
- *Βλάβες αμφιβληστροειδούς.*

ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΔΙΑΘΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΔΟΦΑΚΩΝ

ΕΝΔΟΦΑΚΟΣ

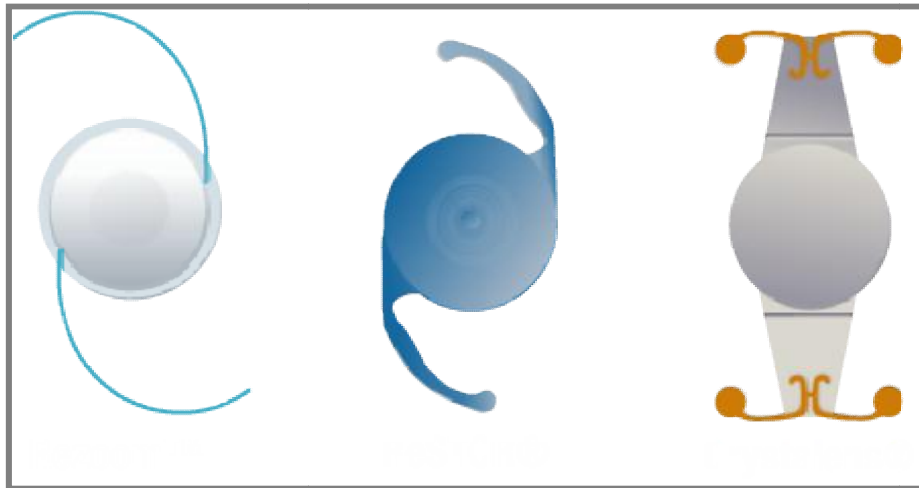
Είναι ένας μικρός φακός από τεχνητό υλικό (ακρυλικός ή σιλικόνης) ειδικά κατασκευασμένος για να αντικαθιστά τον θολωμένο κρυσταλλοειδή φακό του οφθαλμού και να γίνεται καλά ανεκτός από το μάτι (εικ. 36).

Υπάρχουν διάφορα είδη και ποιότητες ενδοφακών και η σωστή επιλογή από είναι σημαντική για την μετεγχειρητική όραση του ασθενούς. Η σύγχρονη τεχνολογία πλέον προσφέρει μια ευρεία γκάμα επιλογής από **απλούς** μέχρι **αστιγματικούς** και **πολυεστιακούς** φακούς. Οι τελευταίοι με την πρωτοποριακή τους τεχνολογία επιτρέπουν στον ασθενή να βλέπει καθαρά σε όλες τις αποστάσεις **χωρίς την χρήση γυαλιών.**

Ένθεση φακικού ενδοφακού (Phakic Refractive Lens)

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται για τη διόρθωση υψηλής μυωπίας (συνήθως άνω των 9-10 D) και υπερμετρωπίας (συνήθως άνω των 5-6 D). Επίσης, ενδείκνυται και για χαμηλότερες διοπτρίες, όταν κάποιος παράμετροι, με κύρια το μειωμένο πάχος του κερατοειδούς, δεν επιτρέπουν την εφαρμογή laser. Ο ενδοφακός τοποθετείται στον οπίσθιο θάλαμο του οφθαλμού μπροστά απ' τον κρυσταλλοειδή φακό του ματιού, χωρίς να έρχεται σε επαφή μ' αυτόν.

Η επέμβαση γίνεται με τοπική αναισθησία, διαρκεί 10-15 λεπτά για κάθε οφθαλμό και απαιτούνται συνολικά 3 ημέρες νοσηλείας. Συνήθως μεταξύ των επεμβάσεων του δεξιού και του αριστερού οφθαλμού μεσολαβούν 1-2 ημέρες. Η μέθοδος ενδείκνυται συνήθως για ηλικίες μικρότερες των 45 ετών, καθώς σε μεγαλύτερες ηλικίες αρχίζει η θόλωση του κρυσταλλοειδούς φακού και προτιμάται η αντικατάστασή του. Επίσης, με την ένθεση του ενδοφακού διατηρείται η προσαρμογή και επομένως η κοντινή όραση του ατόμου, αφού ο κρυσταλλοειδής φακός παραμένει στη θέση του. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι άμεσα και ικανοποιητικά.



Εικόνα 36: διάφοροι ενδοφακοί

Αντικατάσταση του κρυσταλλοειδούς φακού με ενδοφακό (Clear Lens Extraction, CLE)

Εφαρμόζεται σε μέσου και υψηλού βαθμού μυωπίες και υπερμετρωπίες, κυρίως σε μεγαλύτερες ηλικίες (άνω των 45 ετών), όταν αρχίζει ο καταρράκτης, δηλαδή η θόλωση του κρυσταλλοειδούς φακού. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια επέμβαση αντίστοιχη με αυτήν του καταρράκτη, η οποία ταυτόχρονα διορθώνει το διαθλαστικό σφάλμα του οφθαλμού του ατόμου. Γίνεται με τοπική αναισθησία (σταγόνες) και διαρκεί 10-15 λεπτά για κάθε οφθαλμό.

Μετεγχειρητικά απαιτείται μια μέρα νοσηλείας για παρακολούθηση. Με την αφαίρεση του φακού του οφθαλμού καταργείται η προσαρμογή και το άτομο χρειάζεται γυαλιά για την κοντινή όραση αν τοποθετηθεί συμβατικός ενδοφακός.

Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα ένθεσης νέας γενιάς ενδοφακών, των πολυεστιακών και των προσαρμοστικών, που αποκαθιστούν τουλάχιστον εν μέρει και την κοντινή όραση του ασθενούς, δηλαδή διορθώνουν σε κάποιο βαθμό και την πρεσβυωπία.

Διόρθωση Πρεσβυωπίας

Η πρεσβυωπία εμφανίζεται στην ηλικία των 40 ετών και βασικό της σύμπτωμα είναι η μειωμένη κοντινή όραση. Το άτομο δυσκολεύεται να διαβάσει χωρίς γυαλιά σε απόσταση 35 - 40 εκατοστών και κουράζεται μετά από σύντομο διάστημα κοντινής εργασίας. Φυσιολογικά, κατά την όραση κοντινών αντικειμένων για να εστιάσει η εικόνα πάνω στον αμφιβληστροειδή ο κρυσταλλοειδής φακός αλλάζει σχήμα.

Ο λόγος της εμφάνισης της πρεσβυωπίας είναι η απώλεια της ευκαμψίας και της ελαστικότητας του φακού λόγω γήρανσης. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη αποτελεσματικής και μόνιμης χειρουργικής θεραπείας για την πρεσβυωπία αποτελεί πεδίο εντατικής έρευνας.

Ενδοκερατοειδικά ενθέματα

Μία σύγχρονη μέθοδος αντιμετώπισης της πρεσβυωπίας είναι η ένθεση ενδοκερατοειδικών ενθεμάτων-φακών. Στην επέμβαση αυτή τοποθετείται ένας λεπτός φακός μέσα στον κερατοειδή. Η δημιουργία της τομής για την ένθεση του φακού γίνεται με *femtosecond laser* και με απόλυτη ακρίβεια. Η επέμβαση γίνεται μόνο στο ένα μάτι με σταγόνες, διαρκεί λίγα λεπτά και είναι ανώδυνη και αναστρέψιμη.

Αντικατάσταση κρυσταλλοειδούς φακού με πολυεστιακό ή προσαρμοστικό ενδοφακό (multifocal or accommodative lens)

Η ένθεση πολυεστιακών ενδοφακών αποτελεί μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα της πρεσβυωπίας διότι επιτυγχάνεται ταυτόχρονα καλή μακρινή και κοντινή όραση. Λειτουργούν με τρόπο αντίστοιχο με τα πολυεστιακά γυαλιά δίνοντας την δυνατότητα εστίασης σε διάφορες αποστάσεις και ως εκ τούτου ικανοποιητικής όρασης χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση κοντινών γυαλιών.

Οι προσαρμοστικοί ενδοφακοί είναι μια νέα γενιά τεχνητών ενδοφακών των οποίων η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στη δυνατότητα μετακίνησης του τεχνητού φακού σύμφωνα με τις κινήσεις της προσαρμογής που υπόκειται ο σάκος του περιφακίου, στον οποίο είναι τοποθετημένος. Η μετακίνηση αυτή προκαλεί πρόσθια μετακίνηση του φακού και αποκατάσταση μέχρι ενός σημείου της φυσιολογικής προσαρμογής η οποία θεωρητικά χάνεται με την εμφύτευση ενός τεχνητού ενδοφακού. Οι προσαρμοστικοί ενδοφακοί ουσιαστικά στοχεύουν στη λύση του προβλήματος του καταρράκτη και ταυτόχρονα αποτελούν μια ικανοποιητική λύση για την αντιμετώπιση της πρεσβυωπίας.

Πολυεστιακό LASER (PresbVis)

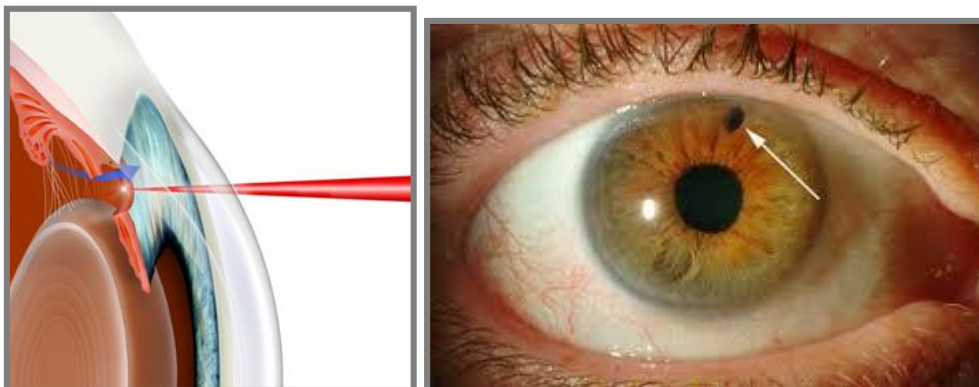
Το πολυεστιακό laser χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ασθενών που εκτός από πρεσβυωπία πάσχουν και από κάποιο άλλο διαθλαστικό πρόβλημα όπως μυωπία, υπερμετροπία ή αστιγματισμό. Η όραση διορθώνεται για μακρινές, ενδιάμεσες και κοντινές αποστάσεις με ανασχηματισμό της ενδοστρωματικής περιοχής του κερατοειδή.

LASER ΣΤΗ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΓΛΑΥΚΩΜΑΤΟΣ

Μια άλλη εφαρμογή του laser είναι η χρησιμοποίησή του στη χειρουργική διάνοιξη της γωνίας του προσθίου θαλάμου του οφθαλμού για την φυσιολογική αποχέτευση του υδατοειδούς υγρού.

Οξύ γλαύκωμα κλειστής γωνιάς

Όπως προαναφέρθηκε το υδατοειδές υγρό είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της ενδοφθάλμιας πίεσης (φυσιολογικά έως 18- 21mmHg) του ματιού. Το υδατοειδές υγρό παράγεται από το ακτινωτό σώμα του οφθαλμού, ρέει στον οπίσθιο και στον πρόσθιο θάλαμο και αποχετεύεται από την γωνία του προσθίου θαλάμου. Αν για κάποιο λόγο η γωνία φράξει τότε έχουμε απότομη αύξηση της ενδοφθάλμιας πίεσης (>24mmHg) που εκδηλώνεται με οξύ πόνο στον οφθαλμό. Η κατάσταση αυτή καλείται οξύ γλαύκωμα κλειστής γωνιάς και μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της όρασης λόγω βλάβης του οπτικού νεύρου αν δεν αντιμετωπιστεί άμεσα. Στην επέμβαση με laser για τη χειρουργική διάνοιξη της γωνίας (τραμπουλεκτομή) γίνεται ιριδοτομή και χρησιμοποιείται Nd: YAG laser (εικ. 37, 38).



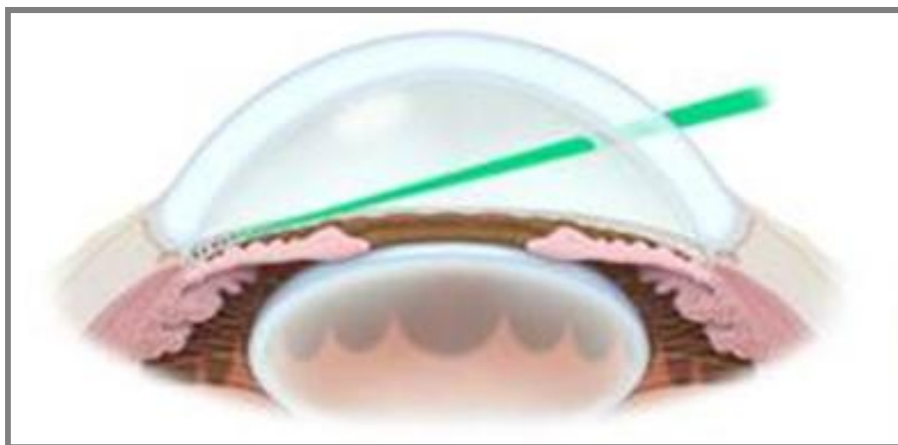
Εικόνα 37: ιριδοτομή με laser για διάνοιξη γωνίας προσθίου θαλάμου

Χρόνιο γλαύκωμα ανοιχτής γωνιάς

Υπάρχει και ένας άλλος τύπος γλαυκώματος, ο οποίος είναι και ο συνηθέστερος, το χρόνιο γλαύκωμα ανοιχτής γωνιάς. Στην κατάσταση αυτή η γωνία του προσθίου θαλάμου χάνει την επάρκεια της λόγω γήρανσης και δεν αποχετεύει το υδατοειδές υγρό.

Σε αντίθεση με το οξύ γλαύκωμα δεν παρουσιάζει συμπτώματα (η ενδοφθάλμια πίεση είναι φυσιολογική, ανώδυνη κατάσταση) και πολλές φορές γίνεται αντιληπτή σε πολύ προχωρημένο και μη αναστρέψιμο στάδιο.

Η επέμβαση για την αύξηση της αποχέτευσης της γωνίας ονομάζεται τραμπεκουλοπλαστική και χορηγείται μια ειδική κατηγορία φαρμάκων οι αντιμεταβολίτες για να επιβραδυνθεί η διαδικασία της ουλοποίησης (χρησιμοποιούνται argon ή διοδικό laser.)

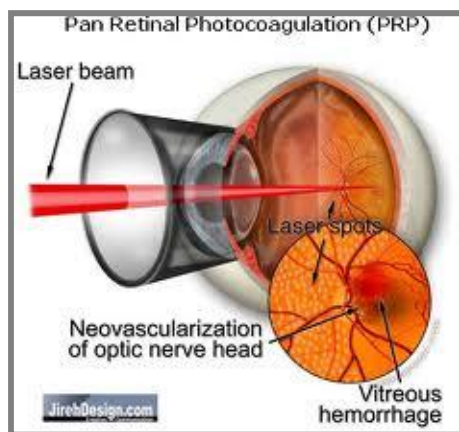


Εικόνα 38: διάνοιξη γωνίας προσθίου θαλάμου με laser

ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΠΑΘΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΜΦΙΒΛΗΣΤΡΟΕΙΔΟΥΣ ΜΕ LASER

Για την αντιμετώπιση διαφόρων παθήσεων του αμφιβληστροειδούς (π.χ. εκφυλίσεις, ωχροπάθειες) χρησιμοποιούνται χειρουργικές τεχνικές με laser (**laser φωτοπηξία**, εικ. 39). Ανάλογα με την περίπτωση τα laser που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι το Green (532 nm), το Yellow (577 nm) και το διοδικό laser.

Η laser φωτοπηξία διακρίνεται σε δύο τύπους ανάλογα με την περιοχή του αμφιβληστροειδή που εφαρμόζεται το laser: την εστιακή και την περιφερική φωτοπηξία.



Εικόνα 39: laser φωτοπηξία

Η *εστιακή φωτοπηξία* αφορά την εφαρμογή laser στην κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδή, δηλαδή στην περιοχή της ωχράς κηλίδας προκειμένου να αντιμετωπιστούν παθήσεις όπως το διαβητικό οίδημα της ωχράς κηλίδας ή το οίδημα λόγω φλεβικής απόφραξης του αμφιβληστροειδούς.

Στην *περιφερική φωτοπηξία* το laser εφαρμόζεται στην περιφέρεια του αμφιβληστροειδή για την καταστολή νεοαγγείων σε καταστάσεις όπως η διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια για να περιοριστεί ο κίνδυνος απώλειας της όρασης και σε καταστάσεις που υπάρχει ρωγμή στον αμφιβληστροειδή προκειμένου να αποφευχθεί μελλοντική αποκόλληση.

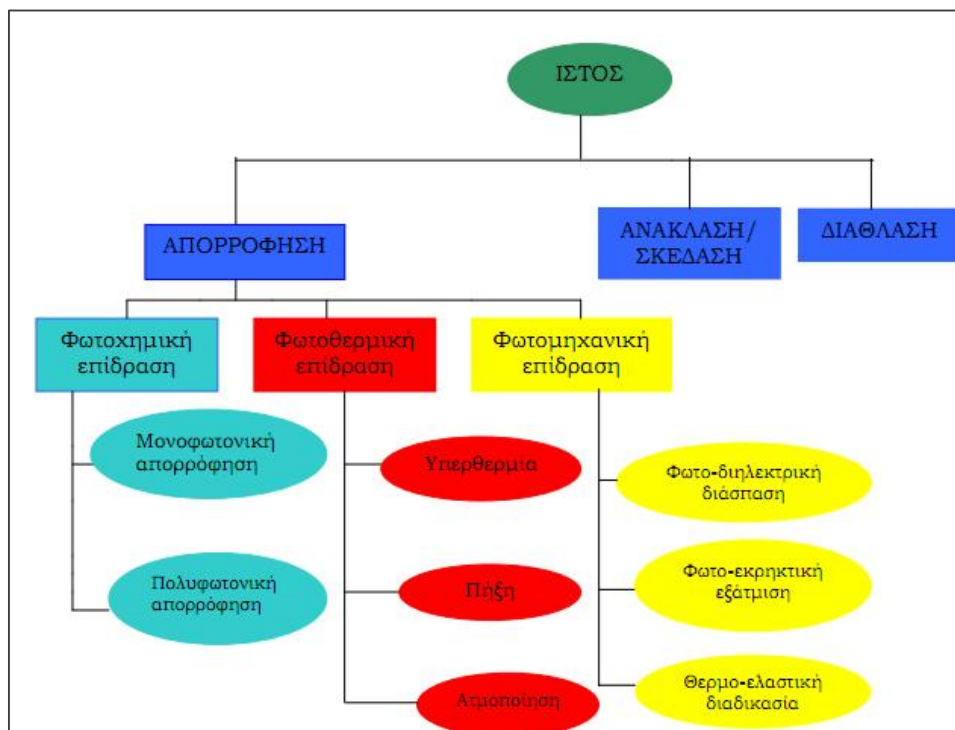
Κεφάλαιο 4

ΥΠΕΡΒΡΑΧΕΙΣ ΠΑΛΜΟΙ ΣΤΗΝ ΟΦΘΑΛΜΟΛΟΓΙΑ

Οι επεμβάσεις με laser στην οφθαλμολογία μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες: Σε αυτές του προσθίου ημιμορίου που αφορούν κυρίως την διόρθωση των διαθλαστικών ανωμαλιών και σε αυτές του οπίσθιου ημιμορίου που αφορούν τη θεραπεία παθήσεων της περιοχής του αμφιβληστροειδή, της ωχράς και του χοριοειδή.

Επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς

Η επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της δέσμης (π.χ. μήκος κύματος, ισχύς, θερμότητα) όσο και από τα χαρακτηριστικά του ιστού (οπτικές, θερμικές και μηχανικές ιδιότητες). Οι οπτικές ιδιότητες περιλαμβάνουν φαινόμενα όπως η απορρόφηση, η διάχυση και η ανάκλαση ενώ οι μηχανικές και θερμικές χαρακτηριστικά όπως η αγωγιμότητα και ο συντελεστής απορρόφησης (από το νερό). (εικ.40).



Εικόνα 40: Σχεδιάγραμμα πιθανών φαινομένων ύστερα από επίδραση laser σε ιστό

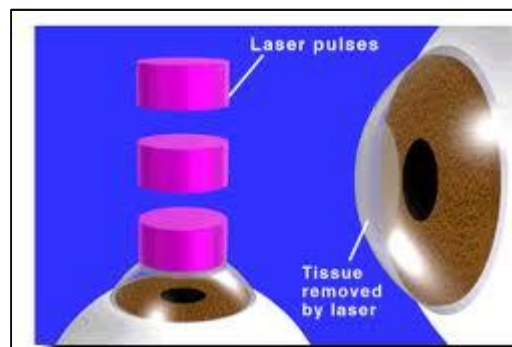
Όταν μια δέσμη laser έρχεται σε επαφή με έναν ιστό ένα μέρος της μπορεί να απορροφηθεί, να ανακλαστεί ή να σκεδαστεί. Γενικά τα αποτελέσματα που

προκαλούνται από την επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τα θερμικά φαινόμενα όπως η τήξη και η ατμοποίηση και τα μη θερμικά φαινόμενα όπως το φωτομηχανικό και το φωτοχημικό φαινόμενο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ανάλογα με την περίπτωση επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος laser.

Η χρήση παλμικών laser στην οφθαλμολογία

Τα τελευταία χρόνια τα παλμικά laser (εικ. 41) χρησιμοποιούνται κυρίως στην μικροχειρουργική του οφθαλμού. Βασικό πλεονέκτημα τους είναι ότι παράγουν πολύ λεπτή δέσμη ελαχιστοποιώντας έτσι τον κίνδυνο καταστροφής γειτονικών ιστών του οφθαλμού κατά την εφαρμογή τους. Επιπλέον, η χρήση παλμών επιτρέπει την ψύξη των ιστών στα διαστήματα μεταξύ των παλμών ελαχιστοποιώντας έτσι τον κίνδυνο βλάβης και στους παρακείμενους ιστούς που γίνεται η εφαρμογή του laser. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης του νερού είναι μικρότερος από τη διάρκεια του παλμού, τότε η θερμότητα που εκπέμπει η δέσμη παγιδεύεται στον όγκο που ορίζεται από την ακτινοβολημένη επιφάνεια και το οπτικό μήκος διείσδυσης της ακτινοβολίας και άρα η θερμική καταστροφή περιορίζεται σε αυτήν την περιοχή.



Εικόνα 41: παλμικό laser

Οφέλη των παλμικών laser στην οφθαλμολογία

Τα παλμικά lasers παρουσιάζουν μια σειρά βασικών πλεονεκτημάτων έναντι των υπολοίπων συμβατικών επεμβάσεων καθιστώντας τα ιδιαίτερα δημοφιλή επιλογή στην μικροχειρουργική του οφθαλμού. Αυτά είναι:

1. Μεγάλη ακρίβεια στην τομή των ιστών.
2. Αναίμακτες επεμβάσεις.

3. Μικρή διάρκεια επέμβασης.
4. Μείωση των επιπλοκών και κυρίως των μολύνσεων.
5. Μείωση της ανάγκης χορήγησης αναισθητικών φαρμάκων για την περάτωση της επέμβασης.
6. Μείωση του χρόνου νοσηλείας.

Για να θεωρηθεί ένα σύστημα laser τελευταίας γενιάς πρέπει να διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Σύστημα ανίχνευσης του οφθαλμού (eye- tracker).
2. Διάμετρο δέσμης laser μικρότερη από 1.0 mm.
3. Συχνότητα επανάληψης βολής του laser (repetition rate) μεγαλύτερη από 380 Hertz/sec.
4. Δυνατότητα πραγματοποίησης εξατομικευμένων επεμβάσεων.
5. Σύστημα εντοπισμού κυκλοστροφής του οφθαλμού ώστε να γίνουν οι ανάλογες προσαρμογές της δέσμης laser πριν την εφαρμογή της.

Φωταποδόμηση κερατοειδικού ιστού με laser

Η αποδόμηση των ιστών του κερατοειδούς στην οποία στηρίζεται η διαθλαστική χειρουργική για τη διόρθωση των αμμετροπιών, βασίζεται στο φωτοθερμικό φαινόμενο.

Στο φωτοθερμικό φαινόμενο όταν η ακτινοβολία laser έρχεται σε επαφή με τους κερατοειδικούς ιστούς αυξάνεται απότομα η θερμοκρασία με αποτέλεσμα το νερό που περιέχεται σε αυτούς να γίνεται ατμός. Η πίεση που ασκείται στο εσωτερικό του κερατοειδικού ιστού προκειμένου να απελευθερωθεί ο ατμός ξεπερνά κάποια χρονική στιγμή τις μηχανικές δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για τη συνοχή του με αποτέλεσμα οι ίνες που τον αποτελούν να σκίζονται και να αποδομείται.

Αυτό το φαινόμενο δίνει τη δυνατότητα ανάλογα με την περίπτωση να επιπεδώνεται ή να καμπυλώνεται ο κερατοειδής ώστε να διορθωθεί το διαθλαστικό σφάλμα.

Παλμικό Excimer Laser

Το Excimer Laser (ή laser διεγερμένων διμερών μορίων) προέρχεται από την σύμπτυξη των λέξεων excited dimmers= excimers και είναι το πιο διαδεδομένο laser στην διαθλαστική χειρουργική του οφθαλμού (μυωπία, υπερμετροπία,

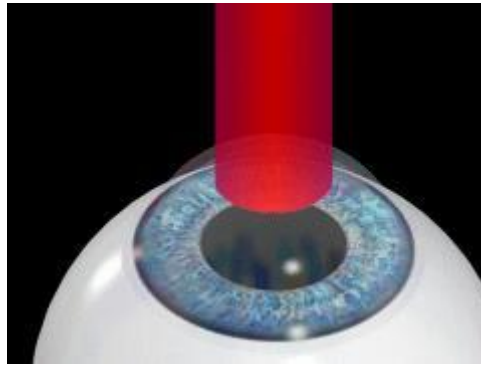
αστιγματισμός). Είναι laser παλμικής λειτουργίας με κύριες εκπομπές στο υπεριώδες φάσμα (UV), συχνότητα επανάληψης 100Hz και διάρκεια παλμού μερικών ns. Κατά τη διάρκεια αυτού του είδους της επέμβασης αποδομείται με τη βοήθεια της ακτινοβολίας laser ένα διαμορφωμένο τμήμα του κερατοειδούς σε οποιοδήποτε βάθος. Η ένταση της ακτινοβολίας είναι ελεγχόμενη. Βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι δεν καίει ή κόβει τους ιστούς αλλά σπάει τους επιφανειακούς συνεκτικούς δεσμούς.

Ονομάζεται διμερές γιατί το ενεργό του μέσο αποτελείται από άτομα ενός ευγενούς αερίου (π.χ. αργό, κρύπτον, ξένο) και ενός αλογόνου (π.χ. χλώριο). Τα άτομα αυτά στη θεμελιώδη κατάσταση δεν μπορούν να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες ηλεκτρικής ισχύος και υψηλής πίεσης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και σχηματίζουν μόρια στη διεγερμένη κατάσταση. Αν με κατάλληλες τεχνικές συγκεντρωθεί μεγαλύτερος αριθμός διεγερμένων διμερών μορίων από τον πληθυσμό των ατόμων στη θεμελιώδη κατάσταση (αναστροφή πληθυσμών) τότε θα υπάρξει παραγωγή laser (κεφ. 1, κεφ. 2). Lasers διεγερμένων διμερών μορίων αντλούνται είτε με ηλεκτρική εκκένωση υψηλής τάσης είτε με ηλεκτρική δέσμη (πίνακας 4).

ΕΙΔΗ EXCIMER LASER & ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ			
Είδος Excimer laser	Μήκος κύματος	Είδος Excimer laser	Μήκος κύματος
Ar ₂	126 nm	XeBr	282 nm
Kr ₂	146 nm	XeCl	308 nm
Xe ₂	172 & 175 nm	XeF	351 nm
ArF	193 nm	KrCl	222 nm
KrF	248 nm		

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: είδη excimer laser

Σημαντικό πλεονέκτημα του excimer laser είναι πως τα μόρια που μεταπίπτουν από τη διεγερμένη στη βασική κατάσταση διασπώνται αμέσως και πως δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη ζώνη μετάπτωσης αλλά ένα ευρύ φάσμα μεταπτώσεων. Αυτό δίνει τη δυνατότητα επιλεγόμενης ακτινοβολίας μέσα από το φάσμα.



Εικόνα 42: spot scanning excimer laser

Παρακάτω παρατίθενται οι τύποι σύγχρονων Excimer laser που χρησιμοποιούνται στη LASIK και τα χαρακτηριστικά τους. (παράρτημα)

1. **Lasers ταινιοειδούς σάρωσης (slit scanning lasers):** Τα slit scanning lasers χρησιμοποιούν συσχετιζόμενες μικρές δέσμες που συνδέονται με μια περιστρεφόμενη συσκευή με ταινιοειδείς οπές αυξανόμενου μεγέθους. Οι δέσμες lasers σαρώνουν κατά τη διάρκεια της επέμβασης κατά μήκος των οπών, δημιουργώντας μια σταδιακά αυξανόμενη ζώνη εκτομής. Αυτός ο τύπος laser παρέχει ομοιόμορφη δέσμη και –δυστυχώς– αδρότερες εκτομές από τις παρωχημένες δέσμες laser. Τα μειονεκτήματα του περιλαμβάνουν ένα ελαφρώς αυξημένο κίνδυνο αποκέντρωσης και υπερδιόρθωσης αν δεν χρησιμοποιηθεί μια συσκευή ανίχνευσης του οφθαλμού (eye- tracker) μαζί με το laser. Τα περισσότερα σύγχρονα excimer laser χρησιμοποιούν eye- trackers για να διατηρήσουν την εστίαση της δέσμης laser.
2. **Lasers κυκλικής σάρωσης (spot scanning lasers):** Τα spot scanning lasers (εικ. 42), που είναι ο συνηθέστερος τύπος, χρησιμοποιούν δέσμες μικρής διαμέτρου (0.8 με 0.2 mm) και σαρώνουν κατά μήκος του κερατοειδή για να δημιουργήσουν την ζώνη εκτομής. Αυτή η μέθοδος έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί πολύ αδρές τομές για την καλύτερη αντιμετώπιση του ανώμαλου αστιγματισμού.
3. **Wavefront- κατευθυνόμενα lasers:** Πολλά excimer lasers συνδέονται με μια συσκευή η οποία ανιχνεύει και «χαρτογραφεί» τις ανωμαλίες του

οπτικού συστήματος, βασιζόμενη στην πορεία των ακτινών στον οφθαλμό. Αυτές οι συσκευές καθοδηγούν τον ανασχηματισμό του κερατοειδή για να δημιουργηθεί η εκτομή κατά τη LASIK. Τόσο τα slit scanning όσο και τα spot scanning lasers έχουν την ικανότητα να χρησιμοποιηθούν για wavefront- κατευθυνόμενες τεχνικές.

Άλλα πεδία εφαρμογής των excimer laser εκτός της χειρουργικής του οφθαλμού είναι η μικροηλεκτρονική και η μικρομηχανική.

Femtoseconds lasers

Τα femtoseconds lasers είναι παλμικά lasers υπερβραχέων παλμών τελευταίας τεχνολογίας και εξαιρετικής ακρίβειας. Η ονομασία τους προέρχεται από το πλήθος των παλμών που παράγουν ανά δευτερόλεπτο οι οποίοι είναι της τάξης των χιλιάδων τρισεκατομμυρίων (10^9 s). Η δημιουργία αυτών των lasers επιτεύχθηκε με τις τεχνικές της παθητικής εγκλείδωσης ρυθμών (passive mode locking- κεφ.2). Οι σημαντικότερες παράμετροι των femtosecond lasers είναι:

1. η διάρκεια του παλμού η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι συντονισμένη ένα συγκεκριμένο εύρος,
2. ο ρυθμός επανάληψης των παλμών ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι καθορισμένος ή συντονισμένος για ένα μικρό εύρος,
3. η μέση τιμή της ισχύς εξόδου και της ενέργειας του παλμού.

Τύποι femtosecond lasers

Παρακάτω θα αναφερθούν οι διάφοροι τύποι femtosecond lasers.

Μαζικά lasers (bulk lasers)

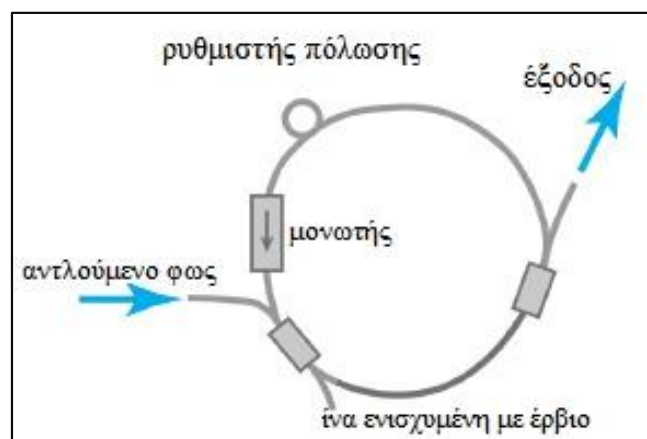
Είναι lasers στερεάς κατάστασης που παράγονται με παθητική εγκλείδωση ρυθμών και εκπέμπουν υπερβραχείς παλμούς εξαιρετικής ποιότητας με τυπική διάρκεια μεταξύ των 30 fs και 30 ps. Χρησιμοποιούν κρυστάλλους ως ενεργό μέσο.

Διάφορα διοδικά lasers, π.χ. βασιζόμενα σε προσμείξεις νεοδυμίδιου, εκπέμπουν σε αυτή την χρονική κλίμακα, με χαρακτηριστική μέση ισχύ εξόδου μεταξύ περίπου 100 mW και 1 W. Το πιο αντιπροσωπευτικό είδος της κατηγορίας είναι το laser τιτανίου-σαπφείρου. Το laser τιτανίου-σαπφείρου είναι κατάλληλο για παλμούς διάρκειας κάτω από τα 10 fs, ή ακόμα σε

εξαιρετικές περιπτώσεις μέχρι περίπου τα 5 fs. Ο ρυθμός επανάληψης των παλμών στις περισσότερες περιπτώσεις κυμαίνεται μεταξύ 50 MHz και 500 MHz, ακόμα σε περιπτώσεις χαμηλού ρυθμού επανάληψης των παλμών (λίγων MHz) για υψηλότερες ενέργειες παλμού, καθώς επίσης και για laser μερικών δεκάδων MHz.

Lasers οπτικών ινών (fiber lasers)

Πρόκειται για διάφορους τύπους laser εξαιρετικής ταχύτητας με ενεργό μέσο οπτικές ίνες (οι οποίες περιέχουν στοιχεία όπως το νεοδύμιο, το έρβιο, κ.α., εικ. 43) που στις περισσότερες περιπτώσεις παράγονται όπως και τα bulk lasers με παθητική εγκλείδωση ρυθμών. Παράγουν παλμούς διάρκειας συνήθως μεταξύ 50 και 500 fs, έχουν ρυθμούς επανάληψης μεταξύ 10 και 100 MHz, και η μέση ισχύς τους ανέρχεται σε μερικά milliwatts. Μπορεί όμως να επιτευχθεί και μεγαλύτερη ισχύς, π.χ. με τεντωμένο παλμό λέιζερ ινών ή σε συνδυασμό με έναν ενισχυτή ινών.



Εικόνα 43: διάταξη ενός fiber femtosecond laser

Τα fiber lasers μπορεί να είναι αρκετά αποδοτικά για τη μαζική παραγωγή, αλλά απαιτείται σημαντική μελέτη για την ανάπτυξη ενός προϊόντος με υψηλή απόδοση και αξιόπιστη λειτουργία, λόγω διαφόρων τεχνικών προκλήσεων.

Lasers χρωστικών (dye lasers)

Τα lasers χρωστικής στερεάς κατάστασης (SSDL) κυριάρχησαν στον τομέα της παραγωγής υπερβραχέων παλμών πριν από την έλευση του laser τιτανίου-σαπφείρου. Χρησιμοποιούν ως ενεργά μέσα χρωστικές ουσίες (π.χ. ροδαμίνη, φλουορεσκεΐνη, κουμαρίνη κ.α.). Το εύρος ζώνης κέρδους τους επιτρέπει διάρκεια παλμών της τάξεως των 10 fs, και υπάρχουν διάφοροι τύποι lasers χρωστικών κατάλληλοι για εκπομπές σε διάφορα μήκη κύματος, κυρίως στην

ορατή περιοχή του φάσματος (400- 700 nm). Κυρίως λόγω των μειονεκτημάτων που συνδέονται με το χειρισμό των χρωστικών ουσιών μαζί με lasers, δεν χρησιμοποιούνται πλέον συχνά.

Lasers ημιαγωγών (semiconductor lasers)

Μερικά διοδικά lasers που παράγονται με παθητική εγκλείωση ρυθμών μπορούν να δημιουργήσουν παλμούς με χρονική διάρκεια της τάξης των femtoseconds. Οι παλμοί που παράγουν κατά την έξοδο έχουν διάρκεια τουλάχιστον κάποιων εκατοντάδων femtoseconds, αλλά με εξωτερική συμπίεση μπορούν να επιτευχθούν παλμοί ακόμα μικρότερης χρονικής διάρκειας.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα κατηγορία laser ημιαγωγών είναι τα VESCELS (vertical external- cavity surface- emitting lasers). Τα lasers αυτά προσφέρουν παλμούς πολύ μικρής διάρκειας με υψηλό ρυθμό επανάληψης και (ορισμένες φορές) υψηλή τιμή ισχύος. Δεν είναι όμως κατάλληλα για παραγωγή παλμών υψηλής ενέργειας.

Άλλοι τύποι

Πιο σπάνια είδη femtoseconds lasers είναι το κέντρο- χρωματικά (color center lasers) και τα lasers ελευθέρων ηλεκτρονίων (free electron lasers). Το τελευταία μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να εκπέμπουν παλμούς της τάξεως των femtoseconds ακόμη και με τη μορφή ακτινών X.

Femtosecond lasers στην οφθαλμολογία

Η σύγχρονη τεχνολογία των femtosecond lasers βρίσκει εφαρμογές στον τομέα της μικροχειρουργικής του οφθαλμού. Όπως προαναφέρθηκε, τα femtosecond lasers παράγουν εξαιρετικά στενούς παλμούς πολύ μικρής χρονικής διάρκειας. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως χρησιμοποιείται πολύ μικρή ενέργεια για να επιτευχθούν διαδικασίες όπως η φωτοαποδόμηση, κάτι που τα συνιστά πιο ασφαλή στη χρήση τους στην χειρουργική του οφθαλμού.

Η τεχνολογία των femtosecond lasers χρησιμοποιείται σε πολλούς κλάδους της οφθαλμολογίας όπως για τη διόρθωση των διαθλαστικών σφαλμάτων (πίνακας 5) συμπεριλαμβανομένης και της πρεσβυωπίας καθώς και στη χειρουργική του καταρράκτη.

Βασική διαφορά των Femtosecond από τα EXCIMER lasers είναι ότι οι παλμοί των πρώτων λόγω του εξαιρετικά βραχέος μήκους τους μπορούν και διαπερνούν τον κερατοειδή φθάνοντας μέχρι το οπίσθιο στρώμα και το ενδοθήλιο.

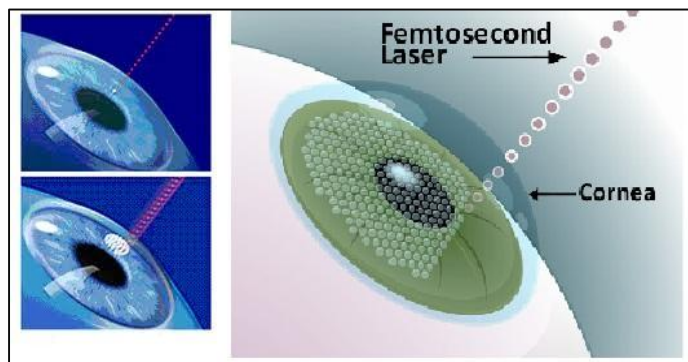
ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ FEMTOSECOND LASER			
ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΕΤΟΣ ΕΓΚΡΙΣΗΣ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
INTRALASE FS 60KHz	AMO	2008	-Λεία επιφάνεια τομής. -Flap διαμέτρου 9mm σε 15-20sec.
FEMTEC FS LASER	PERFECT VISION	2004	Ενδοκερατικές-κερατικές τομές (LASIK flap, ICR κ.α.)
FEMTO LDV	ZIEMER	2005	Πιο ευέλικτο και εύχρηστο.
VISUMAX	ZEISS	2007	-Συνδυασμός με MEL-80 EXCIMER LASER. -Λογισμική πλατφόρμα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: συστήματα femtosecond laser που χρησιμοποιούνται στην διαθλαστική χειρουργική

Εφαρμογές του femtosecond laser στη σύγχρονη διαθλαστική χειρουργική

- 1. Διαμπερής κερατοπλαστική.** Στην διαμπερή κερατοπλαστική η χρήση femtosecond laser εξασφαλίζει μεγαλύτερη στεγανότητα του τραύματος, γρηγορότερη επούλωση και αποκατάσταση της όρασης, γρηγορότερη αφαίρεση των ραμμάτων, μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης μετεγχειρητικού αστιγματισμού και νεοαγγείωσης καθώς και τη δυνατότητα μεταμόσχευσης περισσότερων ενδοθηλιακών κυττάρων σε περιπτώσεις μεταμόσχευσης κερατοειδή.
- 2. Ενδοθηλιακή τμηματική κερατοπλαστική.** Με τη χρήση του F- DSEK femtosecond laser επιτυγχάνεται εκτομή πάχους 400μm αφήνοντας ανέπαφα τη δεσκεμέτριο μεμβράνη και το ενδοθήλιο (100μm).

3. **Δημιουργία κερατοειδικού κρημνού (flap).** Η δημιουργία του κερατοειδικού κρημνού είναι η πιο δημοφιλής χρήση του femtosecond laser στη διαθλαστική χειρουργική καθώς εξαιτίας των υπερβραχέων παλμών προσφέρουν εξαιρετική ακρίβεια στον υπολογισμό του πάχους του κρημνού και η επιφάνεια εκτομής είναι πολύ λεία γεγονός σημαντικό για την ομαλή συγκόλληση του κερατοειδή. Στις επιπλοκές που μπορούν να προκύψουν μετεγχειρητικά ανήκουν η φωτοφοβία η οποία υποχωρεί λίγες μέρες μετά, η φλεγμονώδης αντίδραση στα άκρα του κρημνού και η θόλωση του κερατοειδούς η οποία εξαφανίζεται λίγες ώρες μετά.
4. **Αντιμετώπιση του κερατόκωνου.** Μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση του κερατόκωνου είναι η εφαρμογή ριβοφλαβίνης σε μια καθορισμένη περιοχή του κερατοειδή και στη συνέχεια η έκθεση της σε υπεριώδη ακτινοβολία για να ενδυναμωθεί (σκλήρυνση) ο κερατοειδής. Με τη χρήση femtosecond laser δημιουργείται μια ενδοστρωματική κοιλότητα στον κερατοειδή όπου εναποτίθεται η ριβοφλαβίνη.
5. **Καθαρισμός του κρυσταλλοειδούς φακού.** Με τα χρόνια ο φακός λόγω συσσώρευσης πρωτεϊνών χάνει τη διαύγειά του και αποκτά μια κιτρινωπή απόχρωση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η όραση και η αντίληψη των χρωμάτων. Μια νέα μέθοδος με ενθαρρυντικά αποτελέσματα η οποία όμως είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο, είναι η χρήση femtosecond laser για καθαρισμό του κρυσταλλοειδούς φακού από τις πρωτεϊνικές εναποθέσεις. Τα πρώτα στοιχεία δείχνουν ότι ο φακός αποκτά διαύγεια αυξάνοντας έτσι τη διαθλαστική του ικανότητα και βελτιώνοντας την ποιότητα της όρασης.
6. **Διόρθωση της πρεσβυωπίας (κεφ. 3).**
7. **Χειρουργική του καταρράκτη (κεφ. 3).**

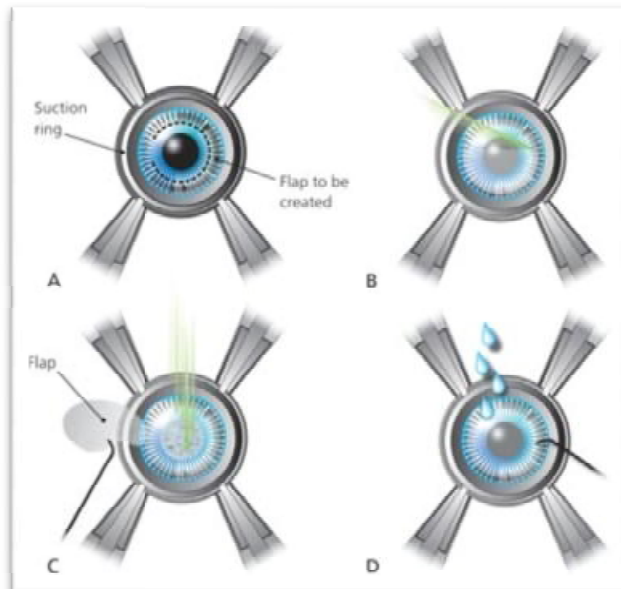


Εικόνα 44: δράση femtosecond laser στον κερατοειδή (φυσαλίδες)

Χρήση femtoseconds lasers στη LASIK

Σήμερα παγκοσμίως το 50% των επεμβάσεων LASIK γίνονται με τη χρήση femtoseconds lasers. Τα σύγχρονα femtoseconds lasers χρειάζονται περίπου 17- 20 δευτερόλεπτα για τη δημιουργία κερατοειδικού κρημονού στη μέθοδο LASIK, χωρίς τη χρήση μικροκερατόμου στο πρώτο στάδιο, επιτυγχάνοντας τομή βάθους 9-11μm. (Οι μηχανικοί μικροκερατόμοι δημιουργούν τομές βάθους 20- 35 μm)

Συγκεκριμένα οι υπερβραχείς παλμοί των femtoseconds lasers σχηματίζουν τον κερατοειδικό κρημόν δημιουργώντας μικρές φυσαλίδες σε συγκεκριμένο βάθος και θέση στον κερατοειδή (εικ. 45). Στη συνέχεια, ο κρημόν δημιουργείται ανασηκώνοντας τον κερατοειδή προς τα πίσω, στο σημείο που έχουν δημιουργηθεί οι φυσαλίδες (εικ. 46).



Εικόνα 45: Στάδια LASIK με femtosecond laser. A. δημιουργία flap, B. ανασήκωση flap, C. εφαρμογή laser, D. συγκόλληση

Τα πλεονεκτήματα του femtosecond laser στην LASIK είναι :

1. Υψηλότερα επίπεδα ασφάλειας (εξαλείφονται οι κίνδυνοι από τη χρήση του μηχανικού μικροκερατόμου).
2. Τα flaps είναι πιο ομοιόμορφα και η πρόβλεψη για το πάχος τους έχει ακρίβεια που φθάνει το 1μm.
3. Η επούλωση του flap γίνεται γρηγορότερα (μικρότερη πιθανότητα για παρεκτόπιση του flap άμεσα μετεγχειρητικά και ταχύτερη αποκατάσταση της όρασης).

Άλλα lasers στη διαθλαστική χειρουργική

Άλλα laser που έχουν κριθεί κατάλληλα για τέτοιου είδους διαθλαστικές επεμβάσεις είναι το HF που προσφέρει ελάχιστη καταστροφή των ιστών λόγω θερμότητας κατά την επέμβαση και το Er:YAG, λόγω του μεγάλου ρυθμού φωτοαποδόμησης. Με το laser HF επιτυγχάνεται κυκλικός τρυπανισμός του κερατοειδούς χωρίς καμία μηχανική παραμόρφωση και διάνοιξη κυκλικών οπών μεγάλης διαμέτρου, ενώ με το laser Er:YAG (κρύσταλλος YAG και προσμίξεις Er₊₃) μήκους κύματος 2.94 μm η θερμική καταστροφή των γειτονικών ιστών, είναι ελάχιστη τόσο σε ελεύθερη λειτουργία, όσο και σε λειτουργία Q-switching (κεφ. 2). Το τελευταίο συμβάίνει διότι το laser Er: YAG έχει μεγάλο συντελεστή απορρόφησης στα 2.94 μm.

Άλλο ένα είδος laser που χρησιμοποιείται στη διαθλαστική χειρουργική είναι το laser Nd: YAG το οποίο είναι το πιο δημοφιλές laser στερεάς κατάστασης με πληθώρα εφαρμογών (π.χ. τηλεμετρία, επεξεργασία υλικών). Μπορεί να λειτουργήσει καλά τόσο σε συνεχόμενη όσο και σε παλμική λειτουργία. Πρόκειται για laser μεγάλης ισχύος και διεισδυτικότητας στους ιστούς και η χρήση του αντενδείκνυται σε λεπτούς κερατοειδείς.

Laser που χρησιμοποιούνται στις παθήσεις του βυθού

Τα lasers που χρησιμοποιούνται στις παθήσεις του αμφιβληστροειδή διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

Green light laser (532 nm)

Εφαρμόζεται σαν εστιακό και περιφερικό laser (εικ. 47) για την αντιμετώπιση παθήσεων όπως η διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια και οι φλεβικές αποφράξεις του αμφιβληστροειδή.

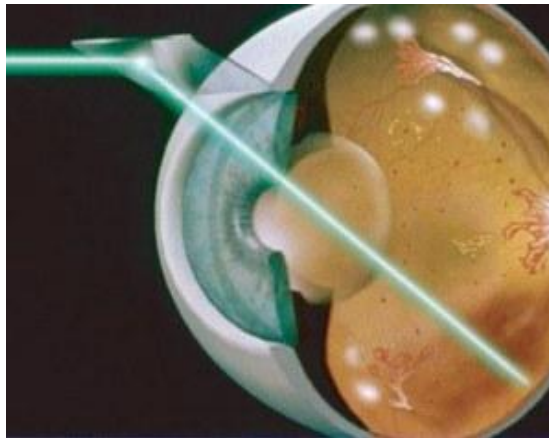
Yellow light laser (577 nm)

Εφαρμόζεται σαν εστιακό laser στις αγγειακές αλλοιώσεις της ωχράς αλλά και στο διαβητικό οίδημα της ωχράς. Χαρακτηριστικό του είναι ότι απορροφάται σε μεγάλο βαθμό από την αιμοσφαιρίνη.

Διοδικό laser (810 nm)

Εφαρμόζεται κυρίως σαν περιφερικό laser σε περιστατικά όπως η αμφιβληστροειδοπάθεια της προωρότητας σε νεογνά. Προσφέρει ελαφρά φωτοπηξία (με ελάχιστα τραύματα) μέσω παλμικής λειτουργίας. Είναι ιδιαίτερα απορροφητικό και σε συνδυασμό με τη χρωστική ουσία ινδοκυανίνη

χρησιμοποιείται σε ιδιαίτερα περιστατικά εστιακής φωτοπηξίας (π.χ. πολυποειδική χοριοειδοπάθεια). Τέλος, χρησιμοποιείται σε περιστατικά γλαυκώματος τελικού σταδίου.



Εικόνα 46: περιφερική φωτοπηξία αμφιβληστροειδή

Διαφορές laser βυθού με laser που εφαρμόζεται στην αντιμετώπιση διαθλαστικών ανωμαλιών (μυωπία)

Τόσο η πηγή, όσο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας (μήκος κύματος, απορροφητικότητα, επίδραση σε βιολογικούς ιστούς) διαφέρουν απολύτως. Στη laser φωτοπηξία του βυθού ιστός-στόχος είναι ο αμφιβληστροειδής και το ζητούμενο αποτέλεσμα συνήθως είναι κάποιου είδους θερμική «βλάβη» προκειμένου να σταματήσει η ανάπτυξη «νεοαγγείων» ή να «σφραγιστεί» μια ρωγμή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

1. Περσεφόνης, Π. (2010) Laser: φυσική και τεχνολογία. Αράκυνθος, Αθήνα.
2. Ζευγώλης, Δ. (2007) Εφαρμοσμένη Οπτική με θέματα Οπτικοηλεκτρονικής και laser. 2^η εκ, Τζιόλα, Αθήνα.
3. Young D. H. (1994) Πανεπιστημιακή Φυσική: τόμος β'. Παπαζήση, Αθήνα.
4. Αλεξανδρής, Ν. Α. (2004) Οπτοηλεκτρονική: θεωρία, εφαρμογές, πειράματα. Τζιόλα, Αθήνα.
5. American academy of Ophthalmology (1996) Οπτική, Διάθλαση και φακοί επαφής: τόμος 3. Π.Χ. Πασχαλίδης, Αθήνα.
6. Δαμανάκις, Α. (1999) Διάθλαση: βασικές αρχές και τεχνική. 2^η εκ, Ιατρικές εκδόσεις Λίτσας, Αθήνα.
7. (Snell and Lemp) Κλινική ανατομία του οφθαλμού. Π.Χ. Πασχαλίδης, Αθήνα.
8. (Ασημέλλης et al 2007) Οπτική και Υπερόραση. Σύγχρονη Γνώση, Αθήνα.
9. Kanski. J. J. (2004) Κλινική Οφθαλμολογία. Παρισιανού Α.Ε., Αθήνα.

Πάγκόσμιος ιστός

1. <http://esperia.iesl.forth.gr>
2. <http://leandros.physics.uoi.gr>
3. <http://www.physics4u.gr>
4. <http://www.poulakis-urology.com>
5. <http://www.ofthalmiatrosthess.gr>
6. <http://www.eyes.gr>
7. <http://panorasi.blogspot.com>
8. <http://www.eye-laser-surgery.gr>
9. <http://www.laservision.gr>
10. <http://www.ivo.gr>
11. <http://zeiss.de>
12. <http://www.rp-photonics.com>
13. <http://www.ilaser.gr>
14. <http://www.iatronet.gr>
15. <http://www.laser.gr>

16.<http://science.howstuffworks.com>

17.<http://www.eyeclinic.com.gr>

18.<http://www.otherside.gr>