



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
- ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ -

“ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ LASER”

*Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος «Εφαρμογές των laser στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον»,
κατά το ακαδημαϊκό έτος 2003-2004.*

Ομάδα εργασίας: Κουρκουτάς Βασίλης, Κουταλώνης Μάνθος, Λιβιτσάνος Χρήστος,
Μανδρίδης Δημήτρης, Μπέικος Μιχάλης, Ορφανουδάκης Θάνος, Τσαρούχας Διονύσης,
Φραγκάκης Ιωάννης.

Συντονίστρια: Μακροπούλου Μυρσίνη, Επίκ. Καθηγήτρια, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.



ΑΘΗΝΑ 2005

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<i>Παράγραφος</i>	<i>Σελίδα</i>
1. ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ LASER	3
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ LASER	7
3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ LASER ΜΕ ΤΗΝ ΕΜΒΙΑ ΥΛΗ	11
4. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER	13
5. ΑΣΦΑΛΕΙΑ LASER: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ LASER	19
6. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ «ΑΣΦΑΛΟΥΣ» ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER	20
7. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER	26
8. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER – Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΩΝ	30
9. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ	37

1. ΟΙ ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ LASER

Οι εφαρμογές της ακτινοβολίας laser στην επιστήμη και την τεχνολογία σήμερα είναι τόσες πολλές, που είναι αδύνατο να απαριθμηθούν. Τα laser έχουν μεγάλη γκάμα εφαρμογών στην επιστήμη, στην τεχνολογία και στην καθημερινή ζωή και είναι πλέον απαραίτητα για το σύγχρονο τρόπο ζωής. Η καθημερινότητα όπως την ξέρουμε θα ήταν πολύ διαφορετική αν δεν είχε ανακαλυφθεί η ακτινοβολία laser και αν δεν είχαν αναπτυχθεί οι διάφοροι τύποι laser. Για παράδειγμα, δεν θα είχαμε τα φορητά μέσα αποθήκευσης πληροφορίας CD-ROM, DVD-ROM, MINIDISC, VideoDisc, κλπ. και θα είμαστε καθηλωμένοι στα μικρής χωρητικότητας μαγνητικά μέσα π.χ. στα Floppy Disks.

Το εύρος χρήσεων των laser είναι τεράστιο, όπως ενδεικτικά φαίνεται παρακάτω, στο συνοπτικό Πίνακα I. Παρά το μεγάλο φάσμα των εφαρμογών των laser, κάθε συγκεκριμένο σύστημα laser έχει περιορισμένο αριθμό εφαρμογών. Η κάθε εφαρμογή απαιτεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά από ένα laser. Αυτά σε φθίνουσα σειρά σημασίας είναι τα ακόλουθα:

- Μήκος κύματος ακτινοβολίας
- Ισχύς δέσμης
- Παλμική ή συνεχής λειτουργία
- Διάρκεια και μορφή παλμών

Στη συνέχεια, αναφέρουμε ενδεικτικά μερικές από τις εφαρμογές των laser.

❖ Εφαρμογές στη Φυσική και Χημεία

Η ανακάλυψη του laser και η ανάπτυξή του οφείλεται κυρίως στις γνώσεις που προσφέρει η Φυσική και η Χημεία. Ήταν επομένως φυσικό να επωφεληθούν πρώτες αυτές από τη χρήση του laser.

Στη Φυσική το laser άνοιξε νέα πεδία έρευνας αλλά και ανέπτυξε πεδία έρευνας που προϋπήρχαν της ανακάλυψής του. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσει κανείς την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας laser και ύλης ενώ στη δεύτερη κατηγορία τη μελέτη φαινομένων της μη γραμμικής οπτικής.

Μια άλλη περιοχή της Φυσικής που ευνοήθηκε από την ανακάλυψη του laser είναι η φασματοσκοπία. Είναι δυνατό σήμερα να λειτουργήσουν τα laser με ένα εύρος ζώνης μερικών δεκάδων kHz, στο ορατό ή υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα φασματοσκοπικών μελετών και μετρήσεων με διακριτική ικανότητα περίπου 6 φορές καλύτερη από αυτήν που θα μπορούσε να πετύχει κανείς με τη κλασική φασματοσκοπία συμβατικών φωτεινών πηγών.

Η Φυσική και η Χημεία ευνοήθηκαν ιδιαίτερα από τη δυνατότητα των laser να παράγουν παλμούς πολύ μικρής χρονικής διάρκειας. Αυτό γιατί έτσι έγινε δυνατή η χρονική μελέτη και ανάλυση της εξέλιξης διαφόρων φαινομένων σε χρόνους μέχρι και της τάξης κάτω του ps.

Τέλος, η πιο ενδιαφέρουσα εφαρμογή των laser στη Χημεία είναι η Φωτοχημεία. Μια τέτοια περίπτωση είναι αυτή της παραγωγής ισοτόπων και ιδιαίτερα των ισοτόπων ουρανίου και δευτερίου. Η βασική ιδέα κάθε τέτοιου πειράματος είναι η επιλεκτική διέγερση, με χρήση ακτινοβολίας laser, μόνο των ισοτόπων και ο εν συνεχεία διαχωρισμός τους, με χημικές μεθόδους, από τα ανεπιθύμητα ανάλογα τους που έχουν παραμείνει στη βασική κατάσταση. Στη περίπτωση του ουρανίου, το επιθυμητό ^{235}U συλλέγεται μετά από φωτοϊονισμό του με κατάλληλο φως σωστού μήκους κύματος και αφού πρώτα έχει ακτινοβοληθεί σε μια διηγερμένη κατάσταση. Η συλλογή του ιονισμένου ουρανίου γίνεται με χρήση κατάλληλου DC ηλεκτρικού πεδίου και το τελικό προϊόν έχει τη μορφή ατομικού ατμού.

❖ Εφαρμογές στη Βιολογία και Ιατρική

Τα laser χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε βιολογικές και ιατρικές εφαρμογές. Στις εφαρμογές αυτές το laser χρησιμοποιείται είτε ως διαγνωστικό εργαλείο είτε ως χειρουργικό εργαλείο είτε τέλος για να δημιουργήσει μία μη αντιστρεπτή μεταβολή των βιομορίων.

Στη βιολογία το laser χρησιμοποιείται περισσότερο ως διαγνωστικό εργαλείο. Οι τεχνικές laser που χρησιμοποιούνται περισσότερο εδώ είναι: φθορισμός του DNA που προκαλείται από παλμούς πολύ μικρής διάρκειας, μελέτη βιομορίων όπως της αιμοσφαιρίνης και της ροδοψίνης με σκέδαση Raman, συμπεριφορά βιομορίων σε διηγευμένες καταστάσεις, μελέτη ιστών μετά την επίδραση ακτινοβολίας laser σ' αυτούς κλπ. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο laser στη βιολογία είναι το laser ιόντων αργού (Ar^+), ενώ συχνά χρησιμοποιούνται και τα laser He-Ne και CO_2 .

Στην ιατρική βασικό laser είναι το laser CO_2 , και ακολουθούν τα lasers Nd:YAG, Ar^+ και He-Ne. Η ικανότητα της δέσμης laser να συγκεντρώνει πολύ ενέργεια σε μικρή επιφάνεια τα κάνει πολύ χρήσιμα σε περιπτώσεις καυτηριάσεων, στη θερμοπηξία του αίματος, στη καταστροφή καρκινικών ιστών και σε εγχειρήσεις όπου παλιά η μεγάλη απώλεια αίματος ήταν αναπόφευκτη.

Η πιο γνωστή εφαρμογή των laser στην ιατρική είναι η χρήση τους στην οφθαλμολογική χειρουργική και ειδικότερα στην περίπτωση της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδούς από το χοριοειδή χιτώνα. Η θεραπεία στην περίπτωση αυτή συνίσταται στη σύντηξη των δύο χιτώνων που έχουν αποκολληθεί με μία σειρά από μικρές τοπικές φωτοσυγκολλήσεις laser. Η χρήση των μονοχρωματικών παλμικών laser προσφέρει εδώ δύο πολύ μεγάλα πλεονεκτήματα: πολύ μικρή κηλίδα εστιασμένης δέσμης και ουσιαστική ακινησία του οφθαλμού όση ώρα διαρκεί ή έκθεσή του στη φωτεινή ακτινοβολία. Χρησιμοποιείται συνήθως παλμικό laser Ar^+ . Η πλέον διαδεδομένη όμως εφαρμογή των laser στην οφθαλμολογία είναι η διόρθωση της μυωπίας και άλλων διαθλαστικών προβλημάτων στον κερατοειδή.

Παλμικά laser με μεγάλη επαναληπτικότητα χρησιμοποιούνται επίσης από τους οδοντιάτρους σαν οδοντιατρικά τρυπάνια. Τα φανερά πλεονεκτήματά τους είναι η απουσία κάθε ταλάντωσης του δοντιού, η μικρή διάρκεια θέρμανσής του, η απουσία πόνου κατά τη διάρκεια της επέμβασης και η μη χρησιμοποίηση αναισθητικού. Χρήση laser γίνεται και στη δερματολογία είτε για καυτηριάσεις στην επιφάνεια του δέρματος είτε για να αφαιρεθούν ανεπιθύμητα τατουάζ.

Τα laser ανοίγουν νέους ορίζοντες στη γυναικολογική χειρουργική όπου χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα κολποσκόπια, στη χειρουργική του στόματος για την αφαίρεση κύστεων και όγκων μέσα από αυτό και τέλος στην ωτορινολαρυγγολογική χειρουργική.

❖ Κατεργασία Υλικών

Τα laser χρησιμοποιούνται σήμερα σε κοπή, συγκόλληση, λείανση, διάτρηση, τόννευση υλικών κλπ. Στη βιομηχανία τα laser δίνουν γρήγορα και οικονομικά αποτελέσματα με πολύ καλό έλεγχο στην επεξεργασία των προϊόντων. Όσον αφορά την επιλογή του laser, μπορεί να θεωρήσει κανείς ότι τα laser με μικρό μήκος κύματος εκπομπής μεταδίδουν θερμότητα σε μέταλλα ή διηλεκτρικά καλύτερα από ότι τα laser με μεγάλο μήκος κύματος και επομένως κάνουν μια συγκεκριμένη δουλειά πιο γρήγορα. Επίσης τα laser μικρού μήκους κύματος υπερτερούν γιατί μπορούν να κάνουν πιο λεπτές εργασίες, επειδή έχουν πιο μικρή διάμετρο εστιασμένης δέσμης. Αντίθετα όμως τα laser μικρού μήκους κύματος έχουν μικρότερη ηλεκτρική απόδοση.

❖ Οπτικές Επικοινωνίες

Οι επικοινωνίες με laser είναι μία ενδιαφέρουσα περίπτωση για πολλούς λόγους. Πρώτα είναι η μεγάλη κατευθυντικότητα της δέσμης laser, αν συγκριθεί με την αντίστοιχη των δεσμών που παράγουν οι μικροκυματικές κεραίες. Για παράδειγμα laser με δέσμη διαμέτρου 1mm ισοδυναμεί με μικροκυματική κεραία διαμέτρου 100m, ως προς τη κατευθυντικότητα.

Ένας άλλος λόγος που κάνει την ιδέα της οπτικής επικοινωνίας ελκυστική είναι η μεγάλη δυνατότητά της σε μεταφερόμενη ποσότητα πληροφορίας. Το ποσό πληροφορίας που μπορεί να σταλεί με ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ανάλογο του εύρους ζώνης του φέροντος κύματος. Έτσι, πηγαίνοντας από τη μικροκυματική περιοχή στην οπτική περιοχή, η συχνότητα του φέροντος αυξάνει κατά ένα παράγοντα 10^4 δημιουργώντας προϋποθέσεις πολύ μεγάλου εύρους ζώνης. Η χρήση laser στις επικοινωνίες χωρίς μέσο διάδοσης την οπτική ίνα έχει εφαρμογές στις δορυφορικές επικοινωνίες, καθώς και επικοινωνίες μικρών αποστάσεων, μεταξύ σταθμών που έχουν μεταξύ τους οπτική επαφή.

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

❖ Θερμοπυρηνική Σύντηξη

Σήμερα, με τις όλο και αυξανόμενες ανάγκες σε ενέργεια, δημιουργείται θέμα ανεύρεσης πηγών για εκμετάλλευση τους στο μέλλον. Την ιδέα της θερμοπυρηνικής σύντηξης με laser έδωσαν οι διαδικασίες που συμβαίνουν στον ήλιο, όπου έχουμε σύντηξη ελαφρών στοιχείων σε άλλα βαρύτερα με ταυτόχρονη μετατροπή της μάζας σε ενέργεια. Συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων παρόμοιες μ' αυτές του ηλίου μπορούν να δημιουργηθούν με χρήση ακτινοβολίας παλμικών laser υψηλής ισχύος όπου ένας στόχος από D_2O και T_2O βάλλεται από όλες τις πλευρές με δέσμες laser. Η συμπίεση του κέντρου του στόχου, που ακολουθεί τη γρήγορη εξάχνωση της επιφάνειάς του, δημιουργεί θερμοκρασίες της τάξης του $10^8 K$. Έτσι μπορεί να αρχίσει μία πυρηνική αντίδραση με απελευθέρωση ενέργειας ίση με $14 MeV$.

❖ Ολογραφία

Σήμερα η ολογραφία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία από τις πιο ενδιαφέρουσες περιοχές εφαρμογής των laser, όχι μόνο γιατί μπορεί να δώσει φωτογραφίες τριών διαστάσεων, αλλά πολύ περισσότερο γιατί μας δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας μιας οπτικής μνήμης ή τη δυνατότητα ελέγχου υλικών ή κατασκευών χωρίς την ανάγκη καταστροφής τους.

Το φως της δέσμης laser φωτίζει το αντικείμενο και, μετά από σκέδαση, προσβάλλει τη φωτογραφική πλάκα. Ένα άλλο μέρος της δέσμης του laser χρησιμοποιείται ως δέσμη αναφοράς και προσβάλλει την ίδια φωτογραφική πλάκα κατ' ευθείαν. Τα δύο φωτεινά αυτά κύματα συμβάλλουν και δημιουργούν μία πολύπλοκη εικόνα συμβολής που καταγράφεται στη φωτογραφική πλάκα. Το πόσο πολύπλοκη θα είναι αυτή η εικόνα συμβολής εξαρτάται από το πόσο πολύπλοκο είναι το αντικείμενο. Αν το αντικείμενο είναι μία επίπεδη πλάκα το ολόγραμμα θα αποτελείται από μία σειρά παράλληλων κροσσών. Αν το αντικείμενο είναι μία κηλίδα τότε το ολόγραμμα θα φαίνεται σαν μία σειρά από δακτυλίους.

Αν μετά τη φωτογραφική κατεργασία της πλάκας που έχει καταγράψει τους κροσσούς συμβολής, τη φωτίσουμε με ένα laser παρόμοιο με αυτό που δημιούργησε το ολόγραμμα, τότε φτάνουμε στην ανακατασκευή του αντικειμένου.

❖ Μετρήσεις Αποστάσεων με Laser

Τα laser έκαναν δυνατές μετρήσεις που ήταν πριν αδύνατες ή περιορισμένης ακρίβειας. Σε μετρήσεις μικρών αποστάσεων (μέχρι 10m), χρησιμοποιείται το laser και η τεχνική του συμβολόμετρου, με αποτέλεσμα η εκτίμηση της απόστασης να γίνεται με τη καταμέτρηση των

κροσσών συμβολής, που εύκολα μπορεί να κάνει ένας φωρατής ακτινοβολίας laser σε συνδυασμό με ένα ηλεκτρονικό σύστημα απαρίθμησης τέτοιων κροσσών.

Σε μετρήσεις μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιείται το laser είτε με τη μορφή του τηλέμετρου ηχούς παλμών, που συνεπάγεται μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ εκπομπής ενός παλμού υψηλής ισχύος και της λήψης του ιδίου παλμού μετά από ανάκλασή του στο στόχο που θέλουμε να μετρήσουμε, είτε με τη μορφή του τηλέμετρου διαμορφωμένης δέσμης, που συνεπάγεται εκτίμηση της μεταβολής της φάσης μίας διαμορφωμένης δέσμης laser μετά από ανάκλαση και επιστροφή της από τον μετρούμενο στόχο.

❖ Έλεγχος της Μόλυνσης του Περιβάλλοντος με laser

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συνεχώς η έρευνα και γενικά οι δραστηριότητες γύρω από τη μέτρηση και τον έλεγχο της μόλυνσης του περιβάλλοντος και ιδιαίτερα της ατμόσφαιρας με μεθόδους που περιλαμβάνουν και χρήση laser. Είναι προφανές ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες στην επιφάνεια της γης δημιουργούν σημαντικές μεταβολές στην ατμοσφαιρική σύνθεση και είναι τέτοιου μεγέθους που δύσκολα μπορούν να μετρηθούν.

Η απαίτηση προστασίας της ατμόσφαιρας δημιούργησε και την ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων ελέγχου ώστε να κρατηθεί η μόλυνσή της σε παραδεκτά επίπεδα. Η χρήση των laser δημιούργησε μια νέα κατάσταση αφού έδωσε περιθώρια για γρήγορη, χωρίς επαφή με τους ρυπαντές ανάλυση είτε στο επίπεδο του εδάφους είτε σε μεγάλο ύψος.

Κύρια τεχνική είναι η τεχνική LIDAR. Αποτελείται από ένα laser εκπομπής, ένα τηλεσκόπιο παραλληλισμένο με τον άξονα εκπομπής του laser και φωρατή, ο οποίος παρουσιάζει μέγιστη ικανότητα φώρασης στο μήκος κύματος εκπομπής του laser της συσκευής. Καθώς η δέσμη laser διαδίδεται μέσα στην ατμόσφαιρα, δέχεται την επίδραση μορίων, σωματιδίων κλπ και μέρος της σκεδάζεται προς την κατεύθυνση του φωρατή του LIDAR. Το σήμα τώρα του φωρατή καταγράφεται ως συνάρτηση του χρόνου, αναλύεται και δίνει πληροφορίες σχετικές με τη κατανομή και το είδος των κέντρων σκέδασης, δηλαδή των ρυπαντών που συνάντησε η ακτινοβολία laser στην πορεία της.

❖ Εφαρμογές στη Φωτογραφία

Μεταξύ των σημαντικών εφαρμογών του laser είναι η φωτογράφιση φαινομένων που εξελίσσονται πολύ γρήγορα. Με τη χρήση ενός παλμικού laser ρουβιδίου (ruby) μπορούμε να πάρουμε παλμούς laser διάρκειας 15-25ns που απέχουν μεταξύ τους μερικά ms. Έτσι, για παράδειγμα, έχουν φωτογραφηθεί σφαίρες που ταξιδεύουν με ταχύτητα 200m/s με χρήση και καταγραφή πάνω σε φιλμ της ανακλώμενης, από τη σφαίρα, δέσμης του laser.

Επιγραμματικά, οι χρήσεις που έχουν τα πλέον ευρέως γνωστά συστήματα laser φαίνονται στον Πίνακα I:

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι: Κυριότερες χρήσεις ορισμένων διατάξεων laser

Τύπος Laser	Μήκος κύματος (μm)	Κυριότερες χρήσεις
Ruby	0,694	Δορυφορική μέτρηση απόστασης, Ιατρικές χρήσεις, Διατηρητική
Neodymium-YAG	1,064	Διάφορες επεξεργασίες μετάλλων, Συγκόλληση, Χαρακτική, Ιατρική χρήση (χειρουργική, οφθαλμιατρική), Στρατιωτικές χρήσεις (Μέτρηση απόστασης), LIDAR
Carbon Dioxide (CO ₂)	10,6	Επεξεργασία μετάλλων, LIDAR, Χειρουργική χρήση, Radar, Σύντηξη
Nitrogen (N)	0,337	Έρευνα, φασματοσκοπία, Άντληση των Dye Laser
Argon Ion Gas	0,488 – 0,514 0,351 & 0,363	Χειρουργική Οφθαλμών, Οπτική χαρακτική, Laser Shows, Ιατρικές χρήσεις, Έρευνα
Helium Neon (HeNe)	0,632	Ευθυγραμμίσεις σε εργαστήρια, σε οικοδομικές εργασίες, Ολογραφία, VideoDisc
Helium Cadmium (HeCd)	0,422	Εκτυπωτές, Οθόνες, Έρευνα
GaAs	0,840	Επικοινωνίες, «Φάρου» υπερύθρου, CD-players, Laser Printers
Krypton Ion Gas	0,476 0,528 0,568 0,847	Διασκέδαση, Ολογραφία, Διαγνωστική, Οθόνες
Dye Lasers (Rhodamine 6G)	0,400-0,600	Φασματοσκοπία, Οφθαλμολογία, Ειδική Φωτογράφιση
Excimer – Xenon chloride (XeCl)	308 nm	Φωτολιθογραφία,
Krypton fluoride (KrFl)	248 nm	Κατεργασία επιφανειών,
Xenon fluoride (XeFl)	350 nm	Άντληση των Dye Laser,
Argon fluoride (ArFl)	193 nm	Έρευνα, Διαθλαστική χειρουργική

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ LASER

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

1. Ανάλογα με το τρόπο λειτουργίας:

- **Continuous Wave Lasers - CW (laser συνεχούς λειτουργίας):** Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με σταθερό ρυθμό ισχύος της δέσμης. Στα περισσότερα laser μεγάλης ισχύος υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της, ενώ στα laser αερίων μικρής ισχύος

(He-Ne) η ισχύς εξόδου είναι σταθερή εκ κατασκευής και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

- **Single Pulsed Lasers (laser μονού παλμού):** Τα laser συνήθως έχουν διάρκεια παλμού από μερικές εκατοντάδες microseconds ως μερικά milliseconds. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας αναφέρεται και ως κανονικός τρόπος, ή μακρής παλμός.
- **Single Pulsed Q-Switched (laser μετατροπής Q):** Είναι εκείνα τα συστήματα laser στα οποία μία καθυστέρηση εκτός της κοιλότητας επιτρέπει στο ενεργό μέσο να αποθηκεύσει το μέγιστο της ενέργειας. Έπειτα, ύστερα από συνθήκες βέλτιστου κέρδους (gain), η εκπομπή συμβαίνει σε μονό παλμό, της τάξης του 10^{-8} s. Η ισχύς των παλμών αυτών συνήθως φτάνει σε επίπεδα μεταξύ 10^6 και 10^8 W.
- **Παλμικά lasers:** Είναι αυτά τα συστήματα laser που λειτουργούν όπως τα μονού παλμού, με επανάληψη της διαδικασίας με σταθερό ή και μεταβλητό ρυθμό.
- **Mode Locked lasers (laser εγκλειδώσης ρυθμού):** Αυτά λειτουργούν ως αποτέλεσμα των συντονισμένων ρυθμών της οπτικής κοιλότητας, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης δέσμης. Όταν οι φάσεις των διαφορετικής συχνότητας ρυθμών συγχρονίζονται, τότε οι ρυθμοί συμβάλλουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα στενούς επαναλαμβανόμενους παλμούς. Τα laser αυτής της κατηγορίας παράγουν σειρές από παλμούς με διάρκειες από pico- (10^{-12}) ως femto- (10^{-15}) seconds.

2. Ανάλυση με το ενεργό μέσο:

- **Solid State Laser (laser στερεάς κατάστασης):** Είναι τα laser που χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο είτε ένα μονωτικό κρύσταλλο, ή γυαλί. Το υλικό που παράγει την ακτινοβολία laser, συνήθως ιόντα Cr^{3+} , Nd^{3+} , ή Ho^{3+} , είναι διασκορπισμένο σε κρυσταλλικό πλέγμα.
- **Semiconductor Laser (laser ημιαγωγών ή διοδικά):** Ημιαγωγικές διατάξεις, οι οποίες αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού σε επαφή. Τα laser αυτού του τύπου είναι πολύ μικρών διαστάσεων και ισχύος και μπορούν να τοποθετηθούν σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.
- **Gas Laser (laser αερίων):** Χρησιμοποιούν ως ενεργό μέσο ένα αέριο ή μείγμα αερίων μέσα σε σωλήνα.
- **Excimer Laser (laser διεγερμένων διμερών):** Μοριακά laser που εμπλέκουν μεταπτώσεις μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρονικών καταστάσεων. (Υποκατηγορία των laser αερίων).
- **Chemical Laser (χημικά laser):** Είναι τα laser εκείνα στα οποία η αναστροφή πληθυσμών παράγεται άμεσα μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Συνήθως τα χημικά laser περιλαμβάνουν στο μηχανισμό άντλησης μία αντίδραση μεταξύ αερίων στοιχείων ή ενώσεων. (Υποκατηγορία των Gas lasers).
- **Dye Laser (laser χρωστικών):** Είναι εκείνα που το ενεργό μέσο αποτελείται από διαλύματα σύνθετων οργανικών χρωστικών σε υγρά όπως η αιθυλική και η μεθυλική αλκοόλη ή το νερό. Κατάλληλη επιλογή της χρωστικής και της συγκέντρωσής της επιτρέπει την παραγωγή δέσμης laser σε μεγάλη περιοχή μηκών κύματος, μέσα και γύρω από το ορατό φάσμα.
- **Laser Χρωματικών Κέντρων:** Χρωματικά κέντρα σε κρυστάλλους αλογονούχων αλκαλίων χρησιμοποιούνται ως αποδοτικά, οπτικά αντλούμενα, laser με πλατιά επιλεκτικότητα στο κοντινό υπέρυθρο.
- **Laser ελευθέρων ηλεκτρονίων:** Τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα διαμέσου ενός περιοδικού μαγνητικού πεδίου και η διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής προέρχεται από την αλληλεπίδραση του H/M πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια. (κυρίως σε πειραματικό στάδιο).

Ακολουθεί ο Πίνακας II με παραδείγματα laser από τις παραπάνω κατηγορίες.

Πίνακας II: Είδη laser ανάλογα με το ενεργό υλικό τους

Τύπος	Laser	Μήκος Κύματος	Ισχύς Εξόδου
Αερίου	Helium Neon (He-Ne)	632,8 nm	CW μέχρι 100 mW
	Helium Cadmium (HeCd)	422 nm 325 nm	CW μέχρι 100 mW
	Argon Ion (Ar ⁺)	488 και 514 nm plus blue lines	CW μέχρι 20 W
	Krypton Ion (Kr ⁺)	647 nm 476 nm 528 nm	CW μέχρι 10 W
	Carbon Dioxide (CO ₂)	10,6 μm 9,6 μm	CW ή παλμικό, 50kW 200W CW
	Hydrogen Fluoride (HF)	2,70 μm	CW μέχρι 10kW Παλμικό μέχρι MW
	Nitrogen (N)	337,1 nm	Παλμικό μέχρι 1 MW
	Excimer – Xenon chloride (XeCl) Krypton fluoride (KrFl) Xen fluoride (XeFl) Argon fluoride (ArFl)	308 nm 248 nm 350 nm 193 nm	Παλμικό μέχρι 10 MW
Στερεάς κατάστασης	Ruby	694,3 nm	Παλμικό μέχρι 10 GW
	Neodymium/YAG (Nd:YAC)	1064 και 1319 nm	Παλμικό ή CW μέχρι TW, 100W μέσος όρος CW
	Neodymium/Glass (Nd:Glas)	1064 nm	Παλμικό μέχρι GW
	Erbium	1,504	
Ημιαγωγών	Διάφορα υλικά GaAlAs InGaAsP	750 - 900 nm 100-1600 nm	CW (κάποια παλμικά) μ 50mW
Χρωστικής	Χρωστικής – Πάνω από διαφορετικές χρωστικές laser ενεργούν ενεργά μέσα laser	300 -1800 nm 1100-1600 nm	Παλμικό μέχρι 100 MW
	Rhodamine 6G	570-650 nm	

3. Ανάλογα με την περιοχή μήκους κύματος εκπομπής

Οι περιοχές του μήκους κύματος εκπομπής των laser στο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι:

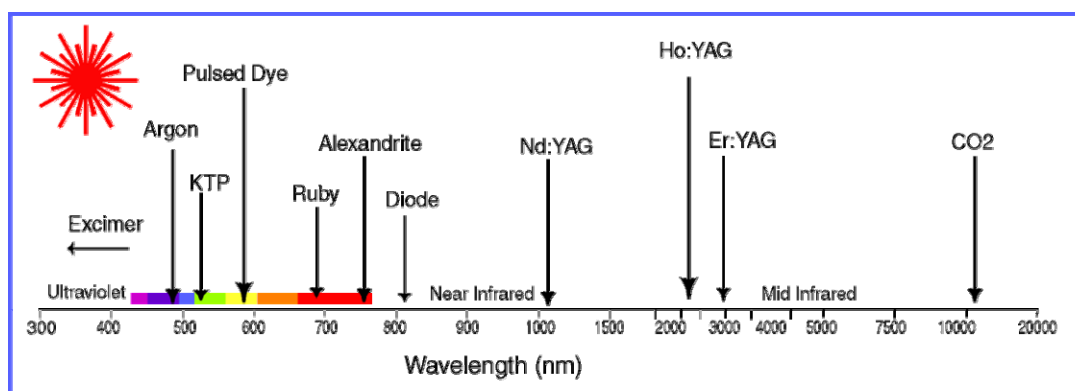
Όνομασία	Περιοχή μηκών κύματος
UV (Υπεριώδες)	0,200 – 0,400 μm
VIS (Ορατό)	0,400 – 0,700 μm
NIR (Εγγύς Υπέρυθρο)	0,700 – 1,400 μm
FIR (Μακρινό Υπέρυθρο)	1,400 – 30,0 μm

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα laser μπορεί να τοποθετηθούν με αύξοντα αριθμό μήκους κύματος της εκπεμπόμενης δέσμης, όπως φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα III, ενώ στο σχήμα 1 απεικονίζονται κυρίως τα ιατρικά laser σε σχέση με το φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ III: Ταξινόμηση πηγών laser ανάλογα με το μήκος κύματος εκπομπής

	Τύπος LASER	Μήκος Κύματος (μm)
UV	Argon Fluoride (Excimer-UV)	0,193
	Krypton Chloride (Excimer-UV)	0,222
	Krypton Fluoride (Excimer-UV)	0,248
	Xenon Chloride (Excimer-UV)	0,308
	Xenon Fluoride (Excimer-UV)	0,351
	Helium Cadmium (UV)	0,325
	Nitrogen (UV)	0,337
VIS	Helium Cadmium (violet)	0,441
	Krypton (blue)	0,476
	Argon (blue)	0,488
	Copper Vapor (green)	0,510
	Argon (green)	0,514
	Krypton (green)	0,528
	Frequency Doubled Nd:YAG (green)	0,532
	Helium Neon (green)	0,543
	Krypton (yellow)	0,568
	Copper Vapor (yellow)	0,570
	Helium Neon (yellow)	0,594
	Helium Neon (orange)	0,610

	Gold Vapor (red)	0,627
	Helium Neon (red)	0,633
	Krypton (red)	0,647
	Rhodamine 6G Dye (tunable)	0,570-0,650
	Ruby (Cr:Al ₂ O ₃) (red)	0,694
NIR	Gallium Arsenide (diode-NIR)	0,840
	Nd:YAG (NIR)	1,064
	Helium Neon (NIB)	1,15
	Nd:YAG (NIR) .	1,33
IR	Erbium (NIR)	1,504
	Hydrogen Fluoride (IR)	2,70
	Carbon Dioxide (FIR)	9,6 ή 10,6



Σχήμα 1. Τα πλέον γνωστά ιατρικά laser σε σχέση με το κυριότερο μήκος κύματος εκπομπής τους στο φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας.

3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ LASER ΜΕ ΤΗΝ ΕΜΒΙΑ ΥΛΗ

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από μια πηγή laser προσπίπτει σε έμβιο στόχο και απορροφάται από αυτόν, μετατρέπεται σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, π.χ. ενέργεια χημικών δεσμών, θερμότητα, μηχανική ενέργεια (κύματα πίεσης), ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου ή ακόμη και σε φωτεινή ενέργεια (φθορισμός – φωσφορισμός). Ανάλογα με το μηχανισμό αυτής της ενεργειακής μετατροπής, μπορούμε να χωρίσουμε τα φαινόμενα που δημιουργεί η ακτινοβολία laser πάνω στους ιστούς σε θερμικές και μη θερμικές διαδικασίες. Σε κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι δράσης:

- Θερμικές διαδικασίες ⇒ πήξη, ατμοποίηση
- Μη θερμικές διαδικασίες ⇒ φωτομηχανική δράση, φωτοχημική δράση

Πήξη, ατμοποίηση: Η φυσιολογική θερμοκρασία του σώματος είναι 37 °C. Αν οι μαλακοί ιστοί θερμανθούν πάνω από τους 60 °C αρχίζει η διαδικασία της πήξης. Η μόνη παρατηρούμενη μακροσκοπικά αλλαγή κατά τη διαδικασία της πήξης είναι μια λεύκανση της επιφάνειας που ακτινοβολείται. Αυτή η λεύκανση οφείλεται στην ανάκλαση όλων των ορατών

μηκών κύματος του φωτός και προκαλείται από βασικές αλλαγές στη δομή του ιστού, κάτι που οδηγεί σε αυξημένη σκέδαση και πολλαπλές διαθλάσεις και ανακλάσεις της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο μηχανισμός της πήξης επικεντρώνεται στο ότι ο μοριακός τύπος της πρωτεΐνης, που βρίσκεται σε κάθε μέρος του σώματός μας, γίνεται ασταθής και οι αλυσίδες του μορίου ξεδιπλώνουν, δημιουργώντας έτσι ένα είδος μεταβολής της φάσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του κολλαγόνου, των ινών δηλαδή από τις οποίες αποτελείται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό το βασικό πλέγμα των συνδετικών ιστών του σώματος, καθώς και των τοιχωμάτων των αιμοφόρων αγγείων. Το κολλαγόνο αποτελείται από μακρές, πολυπεπτιδικές πρωτεϊνικές αλυσίδες που συνδέονται σε ομάδες ανά τρεις, σχηματίζοντας μία δομή τριπλής έλικας. Όταν η θερμοκρασία του υλικού που περιέχει κολλαγόνο ξεπερνάει τους 60 °C, η δομή της τριπλής έλικας καταστρέφεται και οι έλικες παίρνουν τυχαίες θέσεις. Αυτή η αλλαγή συνοδεύεται από μια συστολή των ινών, την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε αν εξετάσουμε τη συστολή των τενόντων που έχουν εκτεθεί σε θέρμανση, των οποίων το κύριο ινώδες συστατικό είναι το κολλαγόνο.

Όταν ο ιστός θερμαίνεται στους 100 °C μπορεί να συμβεί μια πιο μεγάλη αλλαγή φάσης. Αν θεωρήσουμε ότι τα κύτταρα του σώματος βρίσκονται κάτω από κανονικές συνθήκες πίεσης 1atm, τότε το νερό των κυττάρων θα αρχίσει να βράζει σε αυτή τη θερμοκρασία. Η μεταβολή του νερού σε ατμό αυξάνει τον όγκο του κατά χίλιες φορές. Έτσι τα τοιχώματα των κυττάρων καταστρέφονται με αποτέλεσμα ο ατμός να διαφεύγει. Λέμε σε αυτή τη περίπτωση ότι ο ιστός ατμοποιείται. Λόγω της λανθάνουσας θερμότητας, που είναι μεγάλη για το νερό, κάθε εισερχόμενη θερμότητα, πέραν αυτής που απαιτείται για να ανεβάσει το νερό στους 100 °C, θα χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθούν ατμοί σε αυτή τη θερμοκρασία, με την προϋπόθεση ότι η ισχύς laser είναι αρκετά χαμηλή για να επιτρέψει τοπική ισορροπία. Όταν το νερό εξατμιστεί τελείως από το κύτταρο, η συνέχεια της ακτινοβολήσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού πολύ γρήγορα μέχρι την θερμοκρασία των 300 με 400 °C. Στο σημείο αυτό ο ιστός μαυρίζει, απανθρακώνεται και αρχίζει να παράγει ατμούς και καπνό. Πάνω από τους 500 °C, παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου, ο ιστός θα καεί και θα εξαχνωθεί.

Στη διαδικασία της ατμοποίησης το πιο σύνηθες είναι να χρησιμοποιείται laser CO_2 . Η απορρόφηση από τους ιστούς μιας δέσμης laser CO_2 είναι πολύ μεγάλη, περίπου 90% και φθάνει σε πάχος τα 100μm. Αν χρησιμοποιηθεί laser Nd-YAG, το οποίο διαπερνά το νερό πολύ περισσότερο από το laser CO_2 , τότε το μήκος απορρόφησης είναι 90 mm. Επομένως θα χρειαστούν αρκετά εκατοστά μαλακού ιστού για να σταματήσουν μια δέσμη Nd-YAG. Όμως ένα περιβάλλον πλούσιο σε αίμα, αυξάνει την απορρόφηση σε αυτό το μήκος κύματος.

Φωτομηχανική δράση: Η παραγωγή μη θερμικών φωτομηχανικών φαινομένων περιορίζεται στις δέσμες υψηλής ισχύος και μικρής διάρκειας παλμών, όπως αυτές που παράγονται από τα lasers διακοπόμενου Q Nd-YAG ή τα lasers Nd-YAG εγκλειδωμένων τρόπων ταλάντωσης. Σε πυκνότητες ισχύος ακτινοβολίας, της τάξης του $1,5 \cdot 10^{16} Wm^{-2}$, όπως αυτές που παράγονται εάν η έξοδος από μια τέτοια διάταξη εστιασθεί σε μια κηλίδα μικρής διαμέτρου (50μm), έχουμε μια οπτικά δημιουργούμενη έκρηξη και παραγωγή ενός στιγμιαίου και τοπικά ιονισμένου πλάσματος. Επειδή όμως τα δυναμικά ιονισμού αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια της ενέργειας των φωτονίων μήκους κύματος 1,06 μm, η δημιουργία πλάσματος πρέπει να περιλαμβάνει πολυφωτονικές διεργασίες. Ένα ηλεκτρόνιο που ελευθερώνεται από μία πολυφωτονική διαδικασία, μπορεί να κερδίσει ενέργεια στο πεδίο ακτινοβολίας με απορρόφηση κβάντων ενέργειας γειτονικών του ατόμου. Όταν το ηλεκτρόνιο έχει συσσωρεύσει αρκετή ενέργεια, είναι ικανό να ιονίσει ένα άτομο με σύγκρουση και έτσι τώρα είναι διαθέσιμα δύο ηλεκτρόνια μικρής ταχύτητας. Αυτή η επαναλαμβανόμενη διαδικασία οδηγεί τελικά σε μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων, η οποία γρήγορα δημιουργεί τη πυκνότητα πλάσματος. Αφού δημιουργηθεί το πλάσμα συνεχίζει να απορροφά ενέργεια από τη δέσμη ακτινοβολίας και αυτό εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί από την ελάττωση της διαδιδόμενης

ακτινοβολίας laser μετά το πλάσμα. Το υδροδυναμικό κρουστικό κύμα που ακολουθεί τη δημιουργία του πλάσματος μπορεί να σχίσει τον ιστό, δημιουργώντας τομές μεγάλης ακρίβειας.

Φωτοχημική δράση: Στο φωτοχημικό φαινόμενο βασίζεται η χρήση φωτός στη φωτοδυναμική ενεργοποίηση φαρμάκων. Έτσι, για παράδειγμα, το παράγωγο της αιματοπορφυρίνης (HPD) που απορροφάται επιλεκτικά από τους κακοήθεις ιστούς γίνεται κυτταροτοξικό, όταν ακτινοβοληθεί με κατάλληλη δέσμη φωτός. Ο μηχανισμός καταστροφής των νεοπλασμάτων λειτουργεί πιθανά μέσω της καταστροφής των αγγείων που τροφοδοτούν τον όγκο από το ενεργό HPD. Το HPD απορροφά πιο αποδοτικά στο μπλε άκρο του φάσματος, αλλά το κόκκινο φως διαχέεται πιο βαθιά μέσα στον ιστό και έτσι τελικά επιλέγεται μια δευτερεύουσα κορυφή απορρόφησης, στα 630nm, ως ενεργοποιό μήκος κύματος. Θεωρητικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάθε ισχυρή φωτεινή πηγή σε αυτό το μήκος κύματος. Όμως για λόγους ευκολίας στις περιπτώσεις εξωτερικών όγκων και για λόγους αναγκαιότητας στις περιπτώσεις των εσωτερικών όγκων, χρησιμοποιείται οπτική ίνα για να μεταφέρει τη θεραπευτική ακτινοβολία. Επομένως χρησιμοποιείται laser ως φωτεινή πηγή αφού η δική του δέσμη εισέρχεται πολύ πιο εύκολα και αποδοτικά στην οπτική ίνα.

4. ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΠΡΟΕΡΧΟΜΕΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER

Οι κίνδυνοι από τα laser μπορούν να χωριστούν γενικά σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που προέρχονται από την ακτινοβολία και σε αυτούς που δεν προέρχονται από αυτήν, όπως είναι οι ηλεκτρικοί και οι χημικοί κίνδυνοι. Εμείς εδώ θα ασχοληθούμε μόνο με την πρώτη κατηγορία. Θα αναφερθούμε στη συνέχεια σε:

- (α) βλάβες στα μάτια
- (β) βλάβες στο δέρμα
- (γ) όρια έκθεσης

Τα laser που χρησιμοποιούνται λανθασμένα μπορεί ενδεχομένως να γίνουν επικίνδυνα. Οι επιπτώσεις ποικίλουν από τα ελαφρά δερματικά εγκαύματα μέχρι μη αναστρέψιμους τραυματισμούς στο δέρμα και στα μάτια. Η βιολογική βλάβη που προκαλείται από τα laser παράγεται με τους ίδιους μηχανισμούς όπως και το επιθυμητό θεραπευτικό αποτέλεσμα, δηλαδή μέσα από φωτοθερμικές, φωτομηχανικές και φωτοχημικές διαδικασίες.

Οι θερμικές επιπτώσεις οφείλονται στην αύξηση της θερμοκρασίας που ακολουθεί την απορρόφηση της ενέργειας του laser. Η σοβαρότητα της βλάβης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας της έκθεσης στην ακτινοβολία, του μήκους κύματος της δέσμης, της ενέργειάς της και την περιοχή και το είδος του ιστού που εκτίθεται στη δέσμη.

Οι ακουστικές - μηχανικές επιπτώσεις απορρέουν από ένα έντονο μηχανικό κύμα το οποίο διέρχεται μέσα από τον ιστό, τελικά τον καταστρέφει.

Η έκθεση στη δέσμη μπορεί επίσης, να προκαλέσει φωτοχημικές επιδράσεις όταν φωτόνια αλληλεπιδρούν με κύτταρα των ιστών. Μια αλλαγή στη χημεία των κυττάρων μπορεί να καταλήξει σε καταστροφή ή αλλαγή του ιστού. Οι φωτοχημικές επιπτώσεις εξαρτώνται κυρίως από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στον παρακάτω πίνακα IV συνοψίζονται οι πιθανές βιολογικές επιπτώσεις της έκθεσης των ματιών και του δέρματος σε διάφορα μήκη κύματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ IV: Βιολογική δράση κατά την έκθεση των οφθαλμών και του δέρματος σε διάφορα μήκη κύματος της ακτινοβολίας laser

Φασματική περιοχή ακτινοβολίας	Φωτοβιολογική δράση Οφθαλμός	Φωτοβιολογική δράση Δέρμα
Υπεριώδες C (200 nm - 280 nm)	Φωτο-κερατίτιδα	Ερύθημα (sunburn) Καρκίνος δέρματος Επιταχυνόμενη γήρανση του δέρματος
Υπεριώδες B (280 nm - 315 nm)	Φωτο-κερατίτιδα	Αυξημένο «μαύρισμα»
Υπεριώδες A (315 nm - 400 nm)	Φωτοχημικός καταρράκτης	Μαύρισμα Έγκαυμα δέρματος
Ορατό (400 nm - 780 nm)	Φωτοχημική και θερμική βλάβη του αμφιβληστροειδούς	Μαύρισμα Αντιδράσεις φωτοευαισθησίας Έγκαυμα δέρματος
Υπέρυθρο A (780 nm - 1400 nm)	Καταρράκτης και έγκαυμα αμφιβληστροειδούς	Έγκαυμα δέρματος
Υπέρυθρο B (1,4 μm – 3,0 μm)	Έγκαυμα κερατοειδούς, αναλαμπές υδατοειδούς, καταρράκτης	Έγκαυμα δέρματος
Υπέρυθρο C (3,0 μm - 1000 μm)	Έγκαυμα κερατοειδούς (αποκλειστικά)	Έγκαυμα δέρματος

Η έκθεση στη δέσμη ενός laser δεν περιορίζεται μόνο στην απευθείας έκθεση. Ιδιαίτερα για laser με υψηλή ισχύ, η έκθεση σε δέσμες προερχόμενες από ανάκλαση μπορεί απλά να είναι τόσο επιζήμια όσο και η απευθείας έκθεση.

Ενδοδόσμια έκθεση σημαίνει ότι το μάτι ή επιδερμίδα εκτείθεται απευθείας σε ολόκληρη ή σε μέρος της δέσμης. Το μάτι ή επιδερμίδα τότε, εκτείθεται πιθανότατα σε όλη την ισχύ της ακτινοβολίας.

Οι **κατοπτρικές ανακλάσεις** από κατοπτρικές επιφάνειες μπορεί να είναι σχεδόν τόσο επιζήμιες, όσο η έκθεση σε απευθείας δέσμη, ιδιαίτερα αν η επιφάνεια είναι επίπεδη. Κυρτές κατοπτρικές επιφάνειες διευρύνουν τη δέσμη έτσι ώστε, ενώ το εκτειθέμενο μάτι ή δέρμα δεν απορροφά όλη την ισχύ της δέσμης, υπάρχει μεγαλύτερη περιοχή για πιθανή έκθεση.

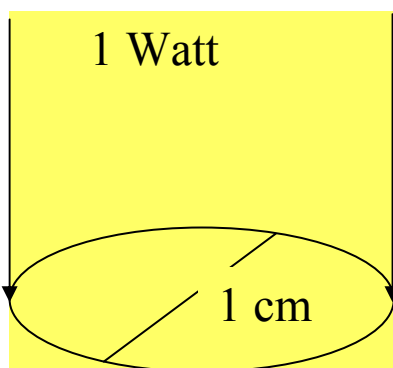
Μια σκεδάζουσα επιφάνεια είναι μια επιφάνεια η οποία ανακλά τη δέσμη του laser σε πολλές κατευθύνσεις. Οι κατοπτρικές επιφάνειες που δεν είναι εντελώς επίπεδες όπως τα κοσμήματα ή τα μεταλλικά εργαλεία, μπορεί να προκαλέσουν **διάχυτες ανακλάσεις** της δέσμης (σκέδαση της ακτινοβολίας). Αυτές οι ανακλάσεις δεν μεταφέρουν την πλήρη ισχύ ή ενέργεια της αρχικής δέσμης, αλλά μπορούν ακόμα να είναι επιζήμιες ιδιαίτερα για laser με υψηλή ισχύ. Τέτοιες ανακλάσεις από laser της τάξης 4 (θα εξηγήσουμε παρακάτω, στην παράγραφο 5, τι σημαίνει τάξη laser) είναι ικανές να ξεκινήσουν ανάφλεξη ή/και πυρκαγιά.

Το αν μια επιφάνεια ανακλά κατοπτρικά ή διάχυτα μια δέσμη εξαρτάται από το μήκος κύματος της δέσμης, σε συνδυασμό με τις οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας. Μια επιφάνεια η οποία είναι μη ιδανικός ανακλαστής για ένα laser του ορατού, μπορεί για παράδειγμα να είναι κατοπτρικός ανακλαστής για μια δέσμη στο υπέρυθρο.

(α) Βλάβες στο μάτι

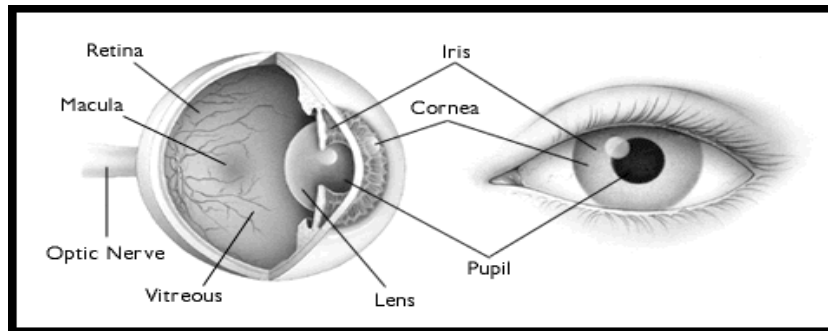
Ο κύριος και ίσως ο πλέον σημαντικός κίνδυνος από την ακτινοβολία laser είναι οι βλάβες από τη δέσμη όταν εισέρχεται στο μάτι. Το μάτι είναι το πιο ευαίσθητο όργανο του ανθρώπου στο φως. Όπως ακριβώς ένας μεγεθυντικός φακός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκεντρωθεί το φως του ήλιου και να καεί ένα κομμάτι από ξύλο, έτσι και οι φακοί στο ανθρώπινο μάτι συγκεντρώνουν τη δέσμη του laser σε μία μικροσκοπική κηλίδα που μπορεί να κάψει τον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού. Μια δέσμη με μικρή απόκλιση καθώς μπαίνει στο μάτι μπορεί να εστιαστεί σε μια κηλίδα διαμέτρου 10-20 μm . Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η πυκνότητα ενέργειας (που ορίζεται ως η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας) της δέσμης του laser αυξάνεται όσο το μέγεθος της κηλίδας μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια της δέσμης μπορεί να μεγαλώσει μέχρι και 100.000 φορές. Εάν η πυκνότητα ισχύος της δέσμης (για ορισμό δεσ σχήμα 2) όταν εισέρχεται στο μάτι είναι $1\text{mW}/\text{cm}^2$, η εστιασμένη ακτινοβολία στον αμφιβληστροειδή χιτώνα θα είναι $100\text{W}/\text{cm}^2$. Έτσι, ακόμα και ένα χαμηλής ισχύος laser της τάξης των mW μπορεί να προκαλέσει έγκαυμα αν εστιαστεί απευθείας πάνω στον αμφιβληστροειδή. Γι'αυτό ποτέ δεν πρέπει να στρέφουμε ένα laser στο μάτι κάποιου, άσχετα από το πόσο χαμηλή είναι η ισχύς του.

Φαίνεται λοιπόν ότι οι νόμοι της θερμοδυναμικής διαφοροποιούνται στην περίπτωση των laser. Για παράδειγμα, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής λέει ότι η θερμοκρασία μιας επιφάνειας που θερμαίνεται από μια δέσμη από θερμική πηγή ακτινοβολίας δεν μπορεί να ξεπεράσει τη θερμοκρασία της πηγής της δέσμης. Το laser είναι μια μη θερμική πηγή όμως και μπορεί να δημιουργήσει θερμοκρασίες κατά πολύ μεγαλύτερες από τη δική του. Ένα laser 30mW που χρησιμοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου είναι ικανό να παράγει αρκετή ενέργεια (όταν εστιασθεί) ώστε να κάψει ένα κομμάτι χαρτί.



Σχήμα 2. Η πυκνότητα ισχύος ορίζεται ως ο λόγος της φωτεινής ισχύος προς την διατομή της δέσμης και εκφράζεται στο σύστημα μονάδων SI με W m^{-2} .

Η βλάβη στο μάτι εξαρτάται και από το μήκος κύματος της δέσμης. Για να καταλάβουμε τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πρώτα τις λειτουργίες των βασικών μερών του ανθρώπινου ματιού. Στο σχήμα 3 μπορούμε να δούμε τα μέρη που το αποτελούν.



Σχήμα 3. Ανατομική εικόνα του ανθρώπινου οφθαλμού.

Ο κερατοειδής χιτώνας (cornea) είναι το διαφανές στρώμα ιστού που καλύπτει το μάτι. Μια βλάβη στο εξωτερικό τμήμα του κερατοειδή μπορεί να είναι απλά ενοχλητική ή και οδυνηρή, αλλά επουλώνεται συνήθως σύντομα. Βλάβη στα εσωτερικά του τμήματα μπορεί όμως να προκαλέσει μόνιμο τραυματισμό.

Ο κρυσταλλοειδής φακός (lens) εστιάζει το φως έτσι ώστε να σχηματιστούν εικόνες πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα (retina). Με το πέρασμα του χρόνου, ο κρυσταλλοειδής φακός γίνεται λιγότερο ελαστικός, κάνοντας έτσι την εστίαση σε κοντινά αντικείμενα πιο δύσκολη. Με την ηλικία γίνεται επίσης θολός και τελικά γίνεται αδιαφανής. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην πάθηση τη γνωστή ως καταρράκτη. Αυτό δημιουργείται σε όλους τους κρυσταλλοειδείς φακούς τελικά, σε κάποια ηλικία.

Το μέρος του ματιού που παρέχει την πιο έντονη όραση είναι η ωχρά κηλίδα στο κέντρο του αμφιβληστροειδή (fovea ή macula lutea). Είναι μια σχετικά μικρή περιοχή του αμφιβληστροειδή, περίπου 3-4% της επιφάνειάς του, που παρέχει την πιο λεπτομερή και έντονη όραση καθώς και την αντίληψη των χρωμάτων. Γιαντό και τα μάτια κινούνται όταν διαβάζουμε ή κοιτάμε κάτι. Η εικόνα πρέπει να είναι διαρκώς εστιασμένη πάνω στην ωχρά κηλίδα για λεπτομερή αντίληψη. Η διακύμανση του αμφιβληστροειδή μπορεί να διακρίνει το φως ή την κίνηση, αλλά όχι λεπτομερείς εικόνες (περιφερική όραση).

Αν ένα έγκαυμα από laser συμβεί στην ωχρά κηλίδα, η όραση μπορεί να χαθεί στη στιγμή. Αν το έγκαυμα συμβεί στην περιφερική περιοχή του αμφιβληστροειδή, μπορεί να έχει μικρή ή και μηδενική επίπτωση στην όραση. Επαναλαμβανόμενα όμως εγκαύματα στον αμφιβληστροειδή μπορεί να οδηγήσουν ακόμα και στην τύφλωση.

Ευτυχώς, το μάτι έχει ένα μηχανισμό αυτοάμυνας, το ανοιγοκλείσιμο των βλεφάρων ή την αποστροφή του κεφαλιού προς άλλη κατεύθυνση. Όταν φτάσει στο μάτι έντονο φως, αυτό τείνει να κλείσει πολύ γρήγορα ή να απομακρυνθεί από την πηγή του φωτός μέσα σε ένα τέταρτο του δευτερολέπτου. Κάτι τέτοιο μπορεί να προστατέψει το μάτι όσον αφορά την ακτινοβολία από laser χαμηλής ισχύος, αλλά δεν μπορεί να βοηθήσει στην περίπτωση των laser μεγάλης ισχύος. Σε αυτά, η βλάβη μπορεί να προκληθεί σε χρόνο μικρότερο από το ένα τέταρτο του δευτερολέπτου.

Τα συμπτώματα ενός εγκαύματος το μάτι περιλαμβάνουν συνήθως πονοκέφαλο λίγο μετά από την έκθεση στην ακτινοβολία, υπερβολικό δάκρυσμα και ξαφνική εμφάνιση στροβιλιζόμενων κύκλων. Αυτοί προκαλούνται από νεκρά κύτταρα ιστών τα οποία αποσυνδέονται από τον αμφιβληστροειδή και τον χοριοειδή χιτώνα και επιπλέουν στο υαλώδες υγρό. Το έγκαυμα στον κερατοειδή προκαλεί ένα αίσθημα σαν ύπαρξη άμμου στο μάτι.

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό του τραύματος στο μάτι από ακτινοβολία laser.

- Το μέγεθος της κόρης του ματιού (pupil)- Η σμίκρυνση της διαμέτρου της κόρης του ματιού μειώνει το ποσό της συνολικής ενέργειας που μεταφέρεται στην επιφάνεια του αμφιβληστροειδή. Το μέγεθος της κόρης κυμαίνεται - σε διάμετρο - από 2mm σε έντονο φωτισμό, μέχρι τα 8mm σε σκοτάδι.

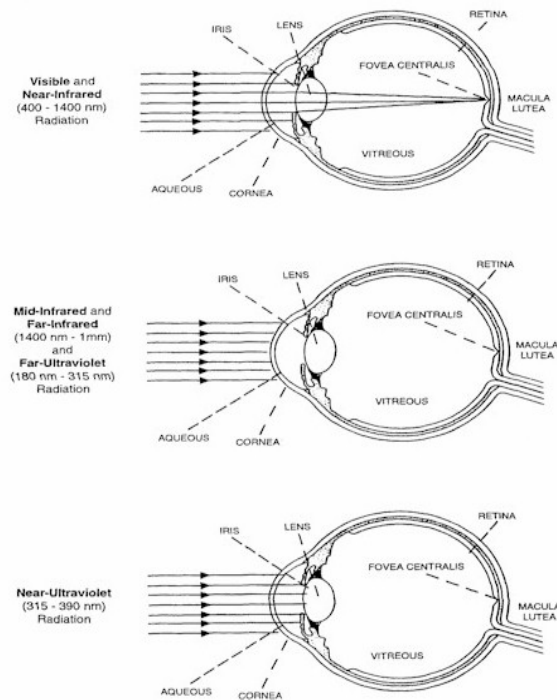
- Ο βαθμός του χρωματισμού- Περισσότερος χρωματισμός (μεγαλύτερη συγκέντρωση μελανίνης) οδηγεί σε μεγαλύτερη απορρόφηση θερμότητας.
- Το μέγεθος της αμφιβληστροειδικής εικόνας- Όσο μεγαλύτερο το μέγεθος, τόσο μεγαλύτερη και η βλάβη, γιατί πρέπει να επιτευχθεί θερμοκρασιακή ισορροπία ώστε να προκληθεί βλάβη. Ο ρυθμός ανάπτυξης της ισορροπίας καθορίζεται από το μέγεθος της εικόνας.
- Η διάρκεια του παλμού- Όσο μικρότερος ο χρόνος (ns σε σχέση με ms), τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα για τραυματισμό.
- Ο ρυθμός επαναληπτικότητας των παλμών- Όσο γρηγορότερος ο ρυθμός, τόσο μικρότερη η πιθανότητα για απώλεια της θερμότητας και θερμική αποκατάσταση των ιστών.
- Μήκος κύματος- Καθορίζει το που εναποτίθεται η ενέργεια και σε τι ποσοστό διαπερνάει τα οπτικά μέσα.

Ας σημειωθεί ότι η περιοχή μηκών κύματος του ορατού σύμφωνα με την διεθνή επιτροπή CIE ορίζεται από τα 380 nm στα 780 nm (και η UV-A μέχρι τα 380 nm, ενώ αντίστοιχα η IR-A ξεκινά από τα 780 nm). Στην ασφάλεια από τα laser, η "ορατή" περιοχή μηκών κύματος, με την έννοια ότι ένα λαμπρό ορατό ερέθισμα θα προκαλέσει προστατευτικά ανκλαστικά (π.χ. κλείσιμο του ματιού), ορίζεται ως η περιοχή μηκών κύματος μεταξύ 400 nm και 700 nm.

Η συντομογραφημένη σημείωση της CIE για τις περιοχές μηκών κύματος στο UV και IR συνδέεται στενά με το βάθος απορρόφησης της ακτινοβολία στους ιστούς (absorption depth, x_d), το οποίο περιγράφεται από το συντελεστή απορρόφησης (absorption coefficient, α). Εδώ εφαρμόζεται ο εκθετικός νόμος απορρόφησης, ο νόμος Beer Lambert ($I=I_0 e^{-\alpha x}$), και επομένως το αντίστροφο του συντελεστή απορρόφησης είναι μια αντιπροσωπευτική τιμή του βάθους στο οποίο η ακτινοβολία, I , πέφτει στο $1/e$ της τιμής της, I_0 , στην επιφάνεια.

Στο σχήμα 4 μπορούμε να δούμε τα μέρη του ματιού που εναποτίθεται η ενέργεια της δέσμης ανάλογα με το μήκος κύματός της.

OCULAR ABSORPTION SITE vs WAVELENGTH

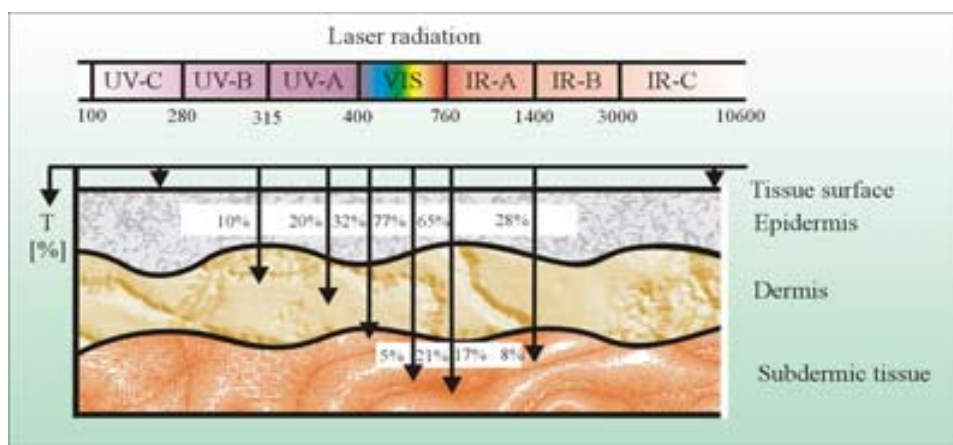


Σχήμα 4. Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα οφθαλμικά μέσα, σε σχέση με το μήκος κύματος.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4, τα laser στο ορατό και κοντά στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος έχουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα να τραυματίσουν τον αμφιβληστροειδή χιτώνα, καθώς ο κερατοειδής και ο κρυσταλλοειδής φακός είναι διαπερατοί σε αυτά τα μήκη κύματος και ο φακός μπορεί να εστιάσει την ενέργεια της δέσμης πάνω στον αμφιβληστροειδή. Η μέγιστη απορρόφηση ενέργειας στον αμφιβληστροειδή συμβαίνει στην περιοχή 400-550nm. Τα laser Ar^+ και η δεύτερη αρμονική του Nd-YAG εκπέμπουν σε αυτή την περιοχή, κάτι το οποίο τα καθιστά πολύ επικίνδυνα για βλάβη στον αμφιβληστροειδή. Μήκη κύματος μικρότερα από 550nm μπορεί να προκαλέσουν φωτοχημικό τραυματισμό παρόμοιο με το έγκαυμα του ήλιου. Οι φωτοχημικές επιπτώσεις είναι αθροιστικές και προκαλούνται από διαρκείς εκθέσεις (πάνω από 10s) σε διασκορπισμένη δέσμη.

(β) Βλάβες στο δέρμα

Τα laser μπορεί να βλάψουν το δέρμα διαμέσου φωτοχημικών φαινομένων ή θερμικών εγκαυμάτων. Ανάλογα με το μήκος κύματος, η φωτεινή δέσμη μπορεί να διαπεράσει και να διεισδύσει στην επιδερμίδα ή στο μεσοδερμικό στρώμα. Η επιδερμίδα είναι το εξωτερικό έμβιο στρώμα του δέρματος. Το μακρύ και το μέσο υπεριώδες (UV) απορροφούνται από την επιδερμίδα. Ένα έγκαυμα όπως αυτά από τον ήλιο μπορεί να προκληθεί από μικρή έκθεση σε δέσμη laser. Η έκθεση στο υπεριώδες σχετίζεται επίσης με έναν αυξανόμενο κίνδυνο για δημιουργία καρκίνου του δέρματος και πρόωρη γήρανσή του. Η βλάβη στο δέρμα εξαρτάται και από το χρώμα του και τον τύπο του δέρματος. Στο σχήμα 5 φαίνεται το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας laser στα διάφορα στρώματα του δέρματος, σε σχέση με το μήκος κύματος από το βαθύ υπεριώδες έως το μακρο-υπέρυθρο.



Σχήμα 5. Διαπερατότητα του δέρματος, σε σχέση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας laser.

Τα θερμικά εγκαύματα στο δέρμα από πηγές υπεριώδους είναι σπάνια. Συνήθως απαιτούν έκθεση σε δέσμες υψηλής ενέργειας για εκτεταμένη χρονική διάρκεια. Το laser CO_2 και άλλα laser του υπέρυθρου τμήματος του φάσματος σχετίζονται περισσότερο με θερμικά εγκαύματα, μιας και αυτή η περιοχή του μήκους κύματος μπορεί να διεισδύσει βαθιά στους ιστούς του δέρματος. Το προκύπτον έγκαυμα μπορεί να είναι πρώτου, δεύτερου ή και τρίτου βαθμού. Γενικά τα θερμικά εγκαύματα είναι πιο σημαντικά στα laser συνεχούς λειτουργίας.

Κάποιοι άνθρωποι είναι περισσότερο ευαίσθητοι στο φως ή μπορεί να παίρνουν φάρμακα τα οποία προκαλούν φωτοευαισθησία. Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στις επιπτώσεις αυτών των φαρμάκων, στα οποία περιλαμβάνονται κάποια αντιβιοτικά και μυκητοκτόνα, όταν τα χρησιμοποιούν άτομα που εργάζονται κοντά σε laser.

5. ΑΣΦΑΛΕΙΑ LASER: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ LASER

Με σκοπό να εξασφαλιστεί μια κοινή βάση για τις απαιτήσεις και τα πρότυπα ασφαλείας στα βιοϊατρικά laser, έχει γίνει προσπάθεια ώστε όλα τα laser (ιατρικά, βιομηχανικά κ.ά) να μπορούν να ταξινομηθούν σε κάποια ορισμένη κατηγορία ή κλάση ή τάξη. Για να ταξινομηθεί ένα laser πρέπει να είναι γνωστά το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει, η ισχύς του και η διάρκεια της έκθεσης στην ακτινοβολία. Σημασία έχει το μέγιστο επίπεδο ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμψει το laser κατά τη διάρκεια χρήσης του κάτω από την πλήρη ικανότητά του και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μετά την κατασκευή του. Κάθε τάξη έχει ένα σύνολο από μέτρα ασφαλούς χρήσης, τα οποία οι κατασκευαστές και οι χρήστες πρέπει να τηρούν αυστηρά. Σε κάθε laser ή αντίστοιχο σύστημα πρέπει να επισυνάπτονται σχετικές ετικέτες που αναφέρουν την τάξη και κάποια στοιχεία επικινδυνότητας για τη συγκεκριμένη συσκευή. Η κατανόηση της διαδικασίας ταξινόμησης των laser αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση σχετικά με την ασφάλειά τους. Αυτές οι τάξεις αναφέρονται στα διάφορα πρότυπα ασφαλείας των διαφόρων χωρών (π.χ. τα πρότυπα ANSI Z136.1, το IEC κ.ά.). Η ταξινόμηση των βιομηχανικών laser παρέχεται επίσης από τον κατασκευαστή.

Παρακάτω αναλύουμε εκτενέστερα την κάθε μία από τις τάξεις στις οποίες ταξινομούνται σήμερα οι πηγές των laser.

(α) Τάξη I

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

(β) Τάξη II

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

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

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

(δ) Τάξη IIIa

Στην τάξη αυτή, τα laser είναι γενικά ακίνδυνα όταν τα κοιτάξουμε στιγμιαία με γυμνό μάτι, αλλά θέτουν μεγάλο κίνδυνο για τα μάτια όταν κοιταχθούν μέσα από οπτικά όργανα όπως μικροσκόπια και κυάλια. Ισχύουν περίπου τα ίδια με τα της τάξης II αλλά τα laser της τάξης IIIa είναι συνεχούς λειτουργίας, έχουν μέγιστη ισχύ εξόδου 5mW και ακτινοβολία μικρότερη από

25Wm^{-2} , ενώ εκπέμπουν και αυτά στο ορατό. Πάνω από τα $4\mu\text{m}$ συμπεριφέρονται όπως η τάξη I και χρησιμοποιούνται κυρίως σε χειρουργικές διατάξεις και σε στυλοδείκτες (pointer pens).

(ε) Τάξη IIIβ

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

(στ) Τάξη IV

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

(ζ) Τάξη 1M (IEC μόνο)

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

(η) Τάξη 2M (IEC μόνο)

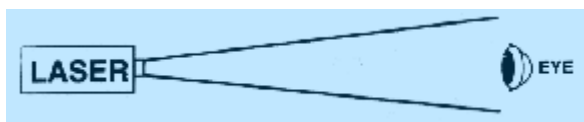
Η τάξη αυτή περιορίζεται σε laser με μήκος κύματος $302\text{nm}-4\mu\text{m}$ τα οποία είναι ασφαλή στην επαφή με το γυμνό μάτι για $0,25\text{s}$. Δεν είναι ασφαλή κάτω από ορισμένες συνθήκες όρασης με οπτικά βοηθήματα.

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

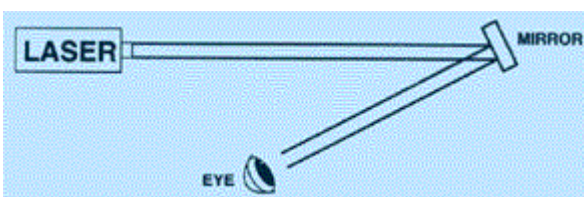
6. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ «ΑΣΦΑΛΟΥΣ» ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER

Για τον καθορισμό των ορίων που, στατιστικά, μπορούν να θεωρηθούν όρια «ασφαλούς» έκθεσης στην ακτινοβολία laser, θα πρέπει να ορίσουμε κάποια μετρήσιμα μεγέθη στα οποία θα αναφερόμαστε στη συνέχεια, ανάλογα με τον τρόπο έκθεσης στην δέσμη laser των οργάνων που κυρίως βλάπτονται από αυτήν (δέρμα και οφθαλμοί). Θα ανφερθούμε πρώτα λοιπόν στους τρόπους παρατήρησης της δέσμης και στον ορισμό της ζώνης επικινδυνότητας.

Τα laser μπορούν να παρατηρηθούν με διάφορους τρόπους. Τα σχήματα 6 έως και 9 μας δείχνουν τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορεί να δει κανείς την ακτινοβολία των ποικίλων διατάξεων laser και επομένως τους διαφορετικούς τύπους έκθεσης στην ακτινοβολία για τον καθένα ξεχωριστά. Τα σχήματα αυτά έχουν ταξινομηθεί από την πιο επικίνδυνη στην λιγότερο επικίνδυνη έκθεση, ανάλογα με τις συνθήκες.



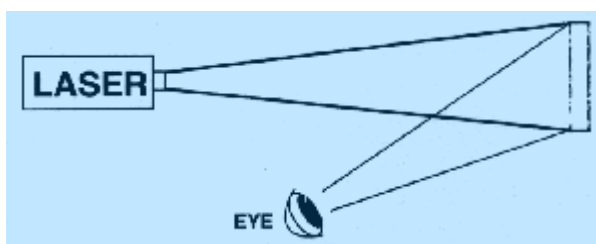
Σχήμα 6: Όψη άμεσης ακτίνας. Αυτός ο τύπος είναι και ο πιο επικίνδυνος



Σχήμα 7: Όψη μιας κατοπτρικά ανακλώμενης (δευτερεύουσας) ακτίνας από μια επίπεδη επιφάνεια ανάκλασης. Η ιδιότητα μιας επιφάνειας να μοιάζει με καθρέπτη ποικίλει με το μήκος κύματος, έτσι η επιφάνεια μπορεί να συμπεριφέρεται ως καθρέπτης σε κάποια μήκη κύματος άλλα όχι σε κάποια άλλα.



Σχήμα 8: Όψη μιας κατοπτρικά ανακλώμενης (δευτερεύουσας) ακτίνας από μια καμπυλωτή επιφάνεια ανάκλασης (λιγότερο επικίνδυνη από αυτή μιας επίπεδης πηγής ανάκλασης). Οι κυρτές κατοπτρικές επιφάνειες διευρύνουν τη δέσμη έτσι ώστε, ενώ το εκτιθέμενο μάτι ή δέρμα δεν απορροφά όλη την ισχύ της δέσμης, υπάρχει μεγαλύτερη περιοχή για πιθανή έκθεση.



Σχήμα 9: Όψη μιας κανονικά διαχεόμενης ανάκλασης. Αυτές οι δέσμες συνήθως δεν είναι επικίνδυνες εκτός από υψηλής ισχύος laser τάξης 4 και ποικίλλουν με την εγγύτητα της διαχεόμενης πηγής ανάκλασης.

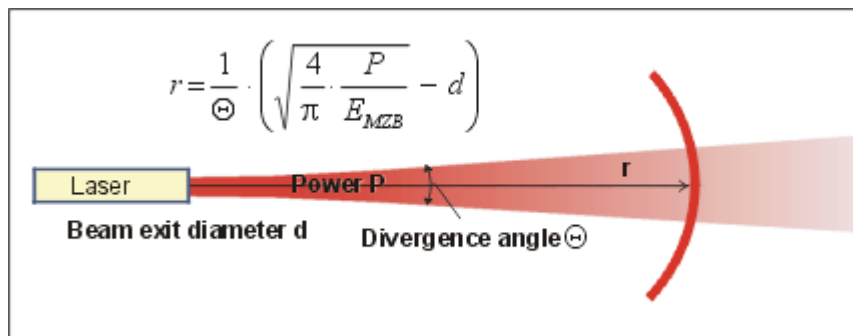
Τα χαρακτηριστικά μιας συσκευής laser όπως η ισχύς εξόδου, η διάμετρος της δέσμης, το μήκος του παλμού, το μήκος κύματος, η κατανομή της δέσμης, η απόκλιση της ακτίνας και η διάρκεια έκθεσης καθορίζουν την επικινδυνότητα για πρόκληση βλαβών στους χρήστες. Η δυνατότητα πρόκλησης βλαβών κατά τη χρήση ενός laser καθορίζεται από την ταξινόμηση της

συσκευής στις κατηγορίες – τάξεις I έως IV και, επομένως, τα μέτρα ελέγχου καθορίζονται από την τάξη του laser.

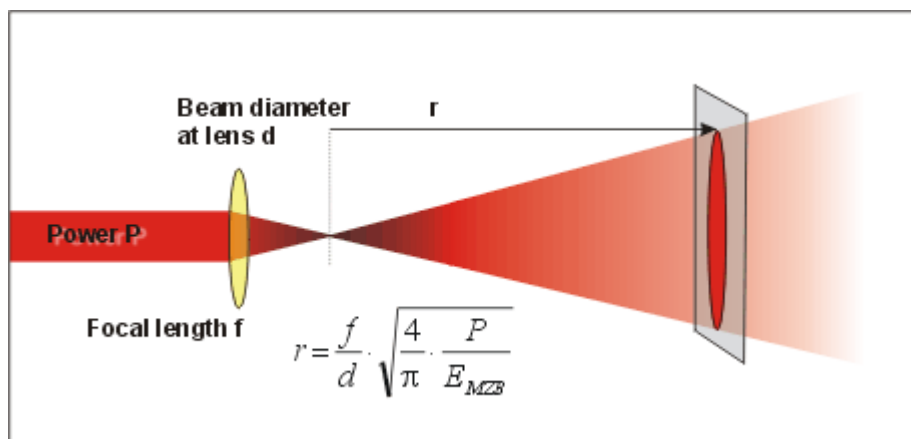
Όποιος χρησιμοποιεί τα laser θα πρέπει να ακολουθεί τις κατευθυντήριες οδηγίες στον τομέα της ασφάλειας έτσι ώστε να προστατέψει τόσο τον εαυτό του αλλά και τους άλλους που βρίσκονται στην περιοχή. Τόσο οι επιτηρητές οι επιφορτισμένοι με τα θέματα ασφαλείας όσο και οι χειριστές - χρήστες των διατάξεων laser πρέπει να είναι πάρα πολύ καλά προετοιμασμένοι όταν είναι να δουλέψουν με laser ιδιαίτερα με διατάξεις τάξης II, III και IV.

Έννοιες όπως η *μέγιστη επιτρεπτή έκθεση* (Maximum Permissible Exposure, MPE), το *προσιτό επίπεδο εκπομπής* (Accessible Emission Limit, AEL) και η *ονομαστική ζώνη κινδύνου* (Nominal Hazard Zone, NHZ) είναι σημαντικές και πρέπει να τις καταλάβει και να τις χρησιμοποιήσει σωστά ο χειριστής. Θα αναφερθούμε σε κάθε μια έννοια περιληπτικά.

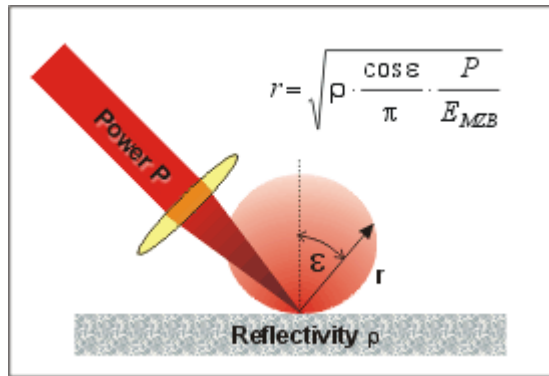
Ονομαστική ζώνη κινδύνου (Nominal Hazard Zone, NHZ): Ο όρος «Ονομαστική Ζώνη Κινδύνου» (NHZ) είναι πάρα πολύ σημαντικός σε κάθε τι που αφορά την ασφάλεια κατά τη χρήση των laser. Ορίζεται ως η ζώνη μέσα στην οποία η ακτινοβολία του laser μπορεί να είναι επικίνδυνη για το μάτι ή για το σώμα. Το μέγεθος αυτής της ζώνης εξαρτάται από τον τρόπο που η ακτινοβολία των laser φτάνει τον παρατηρητή: είτε μέσω της απευθείας έκθεσης στη δέσμη (το NHZ μπορεί να είναι αρκετά εκατοντάδες μέτρα) είτε με κάποιο τύπο ανάκλασης της δέσμης (το NHZ μπορεί να είναι δέκατα του μέτρου). Στη συνέχεια δίνονται ορισμένα παραδείγματα υπολογισμού της ονομαστικής ζώνης κινδύνου για τα μάτια (Nominal Ocular Hazard Zone, NOHZ) για διάφορους τύπους διάδοσης μιας δέσμης.



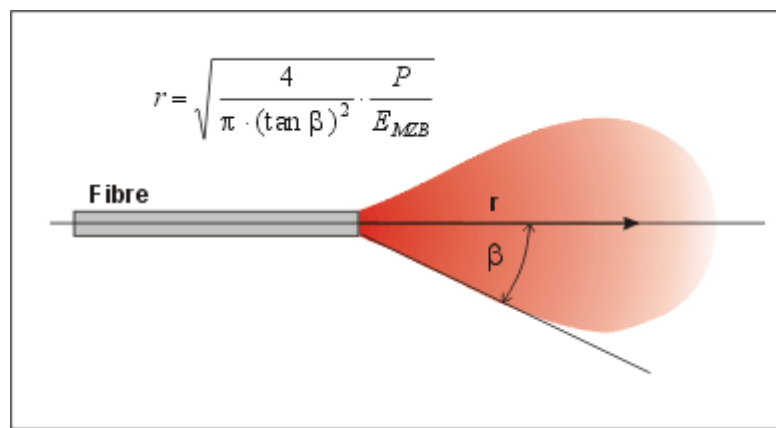
Περίπτωση 1. Υπολογισμός της NOHD για μια αποκλίνουσα δέσμη, στην προσέγγιση μακρινού πεδίου. Η γωνία Θ είναι το άνοιγμα της δέσμης του μακρινού πεδίου και τα υπόλοιπα μεγέθη φαίνονται στο σχήμα.



Περίπτωση 2. Υπολογισμός της NOHD για μια δέσμη που εστιάζεται με φακό εστιακής απόστασης f.



Περίπτωση 3. Υπολογισμός της NOHD για μια δέσμη που ανακλάται διάχυτα από μια σκεδάζουσα επιφάνεια.



Περίπτωση 4. Υπολογισμός της NOHD για μια δέσμη που εξέρχεται από οπτική ίνα ημιγωνίας απόκλισης β

Οι παραπάνω περιπτώσεις θεωρήθηκαν για τον υπολογισμό των τιμών NOHD στην εφαρμογή ενός cw Nd:YAG laser ($\lambda=1064$ nm) με ολική ισχύ δέσμης 1kW. Η τιμή MPE για διάρκεια έκθεσης 10s και σημειακή πηγή είναι 50W/m^2 . Όπως φαίνεται στο πινακάκι παρακάτω, η τιμή NOHD εξαρτάται σημαντικά από τη γεωμετρία της δέσμης.

Περίπτωση 1, αποκλίνουσα δέσμη	$d = 5$ mm, $\beta = 2$ mrad	$r = 2523$ m
Περίπτωση 2, εστιασμένη δέσμη	$d = 5$ mm, $f = 2.5$ cm	$r = 25$ m
Περίπτωση 3, διάχυτη ανάκλαση	$\rho = 0.9$, $\epsilon = 0$	$r = 2.4$ m
Περίπτωση 4, οπτική ίνα	$\beta = 20^\circ$	$r = 13.9$ m

Ο πίνακας V περιγράφει τις αποστάσεις του NHZ βασισμένες σε διαφορετικές παραμέτρους έκθεσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ V. Όρια της ζώνης επικινδυνότητας (NHZ), ανάλογα με ορισμένες παραμέτρους έκθεσης σε δέσμη laser.

Μήκος Κύματος Laser (nm)	Μέθοδος	Χρόνος Έκθεσης	Ισχύς Εξόδου	Ζώνη Κινδύνου, (m)	Διάμετρος Δέσμης
488	CW	0.25 s	5 W	505	
532	CW	0.25 s	500 mW	455	1.0 cm
337	CW	600 s	500 mW	567	
337	CW	600 s	1.0 W	797	
1,064	CW	10 s	1 W	233	
1,064	CW	10 s	100 W	790	
850	CW	10 s	1 W	368	
10,600	CW	10 s	500 W	399	
10,600	CW	10 s	1 W	5.3	
275	Pulse	10 ns 10 Hz	30 mJ/pulse	5.5	1.0 cm
532	Pulse	10 ns 10 Hz	30 mJ/pulse	462	
1,064	Pulse	10 ns 10 Hz	30 mJ/pulse	277	
10,600	Pulse	10 ns 10 Hz	30 mJ/pulse	5.2	
2100	Pulse	10 ns 10 Hz	30 mJ/pulse	5.2	

Μέγιστη Επιτρεπτή Έκθεση (Maximum Permissible Exposure, MPE): Η μέγιστη επιτρεπτή έκθεση, MPE, είναι το μέγιστο επίπεδο της ακτινοβολίας ενός laser στο οποίο ένα άτομο μπορεί να εκτεθεί χωρίς επικίνδυνες συνέπειες ή βιολογικές μεταβολές στο μάτι ή στο δέρμα. Η MPE καθορίζεται από το μήκος κύματος του laser, την ακτινοβολούμενη ενέργεια και τη διάρκεια της έκθεσης. Σε διάφορες βιβλιογραφικές πηγές υπάρχουν πίνακες υπολογισμού τιμών MPE, ανάλογα με τις παραμέτρους της δέσμης laser.

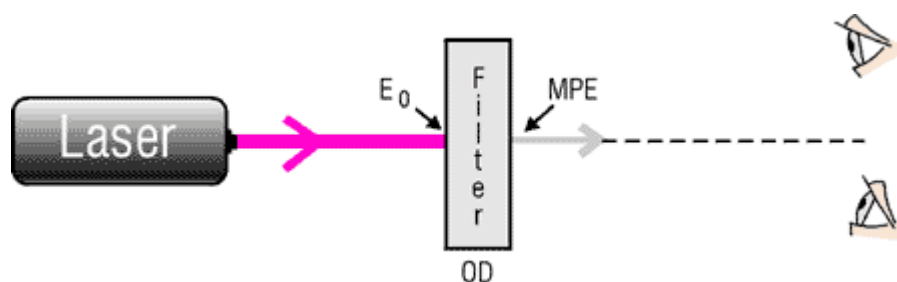
Η μέγιστη επιτρεπτή έκθεση, MPE, είναι μια απαραίτητη παράμετρος για τον καθορισμό της κατάλληλης οπτικής πυκνότητας των υλικών των γυαλιών προστασίας από την ακτινοβολία, καθώς και για τον καθορισμό της ονομαστικής ζώνης κινδύνου, NHZ.

Οπτική Πυκνότητα (Optical Density, OD): Η οπτική πυκνότητα, OD, χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της κατάλληλης προστασίας του ματιού με ειδικά γυαλιά. Η οπτική πυκνότητα είναι ένα μέτρο της εξασθένησης που υφίσταται η ακτινοβολία περνώντας μέσα από ένα φίλτρο και δίνεται από μια λογαριθμική συνάρτηση με τον παρακάτω τύπο:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{E_0}{MPE} \right)$$

όπου ο λόγος μέσα στην αγκύλη είναι το αντίστροφο της εξασθένησης (ή η απορροφητικότητα) και η τιμή E_0 της εξόδου του laser είναι η προβλεπόμενη χειρότερη περίπτωση συνθηκών έκθεσης (σε J/cm^2 ή W/cm^2) και η MPE εκφράζεται στις ίδιες μονάδες με το E_0 . Πρακτικά, ως απορρόφηση θεωρούμε το λόγο της προσπίπτουσας ισχύος laser προς τη διερχόμενη, όπου, προφανώς, για

ικανοποιητική προστασία θέλουμε η διερχόμενη φωτεινή ένταση να είναι μικρότερη ή ίση της MPE.



Οι τιμές της OD για διάφορα laser, υπολογισμένες κατάλληλα για διάφορους χρόνους έκθεσης, παρατίθενται παρακάτω, στον Πίνακα VI. Ας προσέξουμε ότι αυτές οι τιμές είναι μόνο για την χειρότερη περίπτωση της όψης της ακτίνας. Οι τιμές της οπτικής πυκνότητας εξαρτώνται γενικά από τις παραμέτρους του laser και την απόσταση παρατήρησης, αλλά και από το αν η παρατήρηση της δέσμης γίνεται άμεσα ή έπειτα από κατοπτρική ή διάχυτη ανάκλαση.

Για να δώσουμε ένα παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι χρησιμοποιούμε ένα laser αργού για δερματολογικές εφαρμογές, με μέγιστη ισχύ εξόδου 3W. Θα πρέπει να υποθέσουμε ως χρόνο ανακλαστικού ανοιγοκλεισίματος των βλεφάρων 0.25s, στον οποίον η πρωταρχική δέσμη πρέπει να μειωθεί σε τιμή κάτω από την MPE, που είναι 1mW, οπότε τα φίλτρα ή τα γυαλιά προστασίας πρέπει να εξασθενήσουν τη δέσμη κατά ένα παράγοντα 3000 και άρα η απαιτούμενη οπτική πυκνότητα είναι $\log_{10}3000$ ή $OD = 3.5$.

Ο πίνακας VI δίνει περιληπτικά κάποιες τιμές για την οπτική πυκνότητα που χρειάζεται σε φίλτρα και γυαλιά προστασίας από συγκεκριμένα laser, βασισμένες στη χειρότερη περίπτωση τρόπου και διάρκειας έκθεσης στην ακτινοβολία.

ΠΙΝΑΚΑΣ VI: Οπτικές πυκνότητες για φίλτρα και προστασία των ματιών για διάφορους τύπους laser και χρόνους έκθεσης.

Τύπος laser	Μήκος Κύματος (μm)	OD 0.25 s	OD 10 s	OD για 600 s	OD για 30000 s
XeCl 50 W	0.308	---	6.2	8.0	9.7
XeFl 50 W	0.351	---	4.8	6.6	8.3
Argon 1.0 W	0.514	3.0	3.4	5.2	6.4
Krypton 1.0 W	0.530	3.0	3.4	5.2	6.4
Krypton 1.0 W	0.568	3.0	3.4	4.9	6.1
HeNe 0.005 W	0.633	0.7	1.1	1.7	2.9

Krypton	0.647	3.0	3.4	3.9	5.0
1.0 W					
GaAs	0.840	---	1.8	2.3	3.7
50 mW					
Nd:YAG	1.064	---	4.7	5.2	5.2
100 W					
Nd:YAG	1.064	---	4.5	5.0	5.4
(Q-switch)					
Nd:YAG	1.33	---	4.4	4.9	4.9
50 W					
CO₂	10.6	---	6.2	8.0	9.7
1000 W					

7. ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΖΟΜΕΝΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER

Τα laser έχουν συμβάλει σε σημαντικό βαθμό τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και στην επίλυση καθημερινών μας προβλημάτων. Παρ' όλα αυτά δε μπορούμε να τα χαρακτηρίσουμε αθώα αφού ένας μεγάλος αριθμός ατυχημάτων σχετίζεται με τη χρήση τους. Γεγονός είναι ότι η μη ασφαλής χρήση των πηγών laser μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες σωματικές βλάβες στον άνθρωπο και ειδικότερα στο δέρμα και στα μάτια. Τα ατυχήματα αυτά μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Στα ατυχήματα που συνδέονται με τη δέσμη του laser
- Στα ατυχήματα που δε συνδέονται με τη δέσμη του laser

Ατυχήματα που συνδέονται με τη δέσμη του laser

Τα σχετιζόμενα με τη δέσμη του laser ατυχήματα επηρεάζουν κυρίως τα μάτια και το δέρμα. Η έκθεση στην δέσμη του laser μπορεί να είναι είτε απευθείας είτε από κατοπτρική ή διάχυτη ανάκλαση.

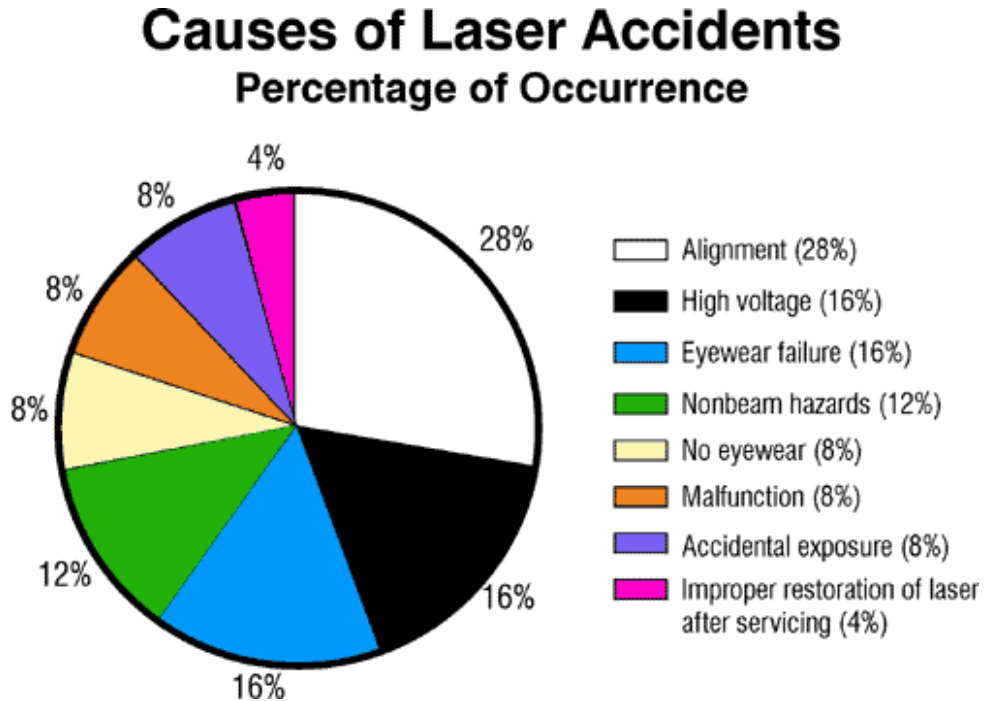
Η πιο κοινή αιτία ατυχημάτων που σχετίζονται με τη δέσμη του laser είναι τα σφάλματα κατά τη προσπάθεια ευθυγράμμισης της διάταξης. Ακόμη πολλές φορές οι χειριστές τέτοιων διατάξεων δε χρησιμοποιούν τον απαραίτητο εξοπλισμό, όπως ειδικά γυαλιά.

Μερικές από τις πιο κοινές αιτίες των ατυχημάτων laser είναι :

- Μη χρησιμοποίηση προστατευτικών γυαλιών στο χώρο λειτουργίας του laser
- Χρήση ακατάλληλων προστατευτικών γυαλιών για το συγκεκριμένο σε λειτουργία laser
- Δυσλειτουργία εξοπλισμού
- Εισαγωγή ανακλαστικών υλικών στις πορείες δεσμών laser
- Έλλειψη προσχεδιασμού
- Τυχαία ενεργοποίηση την παροχής ηλεκτρικού ρεύματος

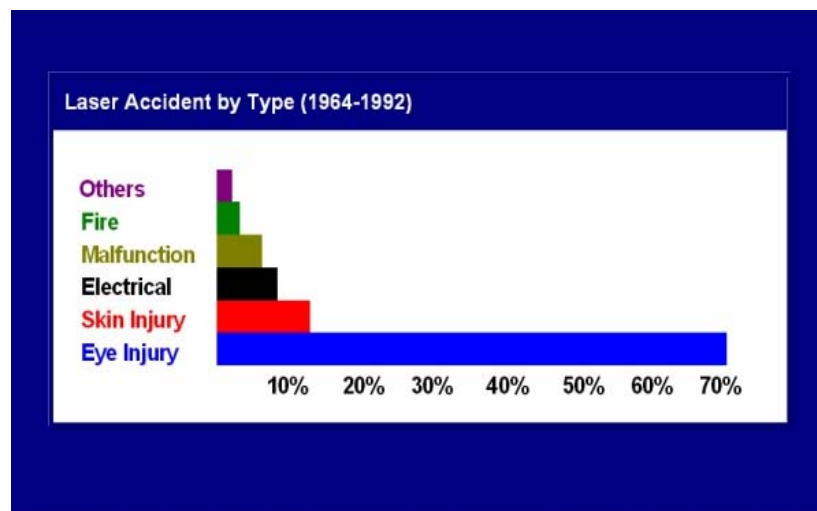
- Έκθεση ματιών κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης
- Χειριστές χωρίς γνώση του εξοπλισμού laser
- Μη ορθή αποκατάσταση του εξοπλισμού μετά από την υπηρεσία συντήρησης

Τα πιθανότερα αίτια ατυχήματος παρουσιάζονται παρακάτω, στο σχήμα 10:



Σχήμα 10. Οι πιθανές αιτίες ατυχήματος κατά τη χρήση laser σε ποσοστό εμφάνισης

Το πιο σύνηθες ατύχημα, όταν εργαζόμαστε με laser, είναι να εισέλθει στο μάτι η ακτίνα. Αυτό φαίνεται και πιο παραστατικά στο παρακάτω πίνακα του σχήματος 11.



Σχήμα 11. Ποσοστό εμφάνισης διαφόρων ατυχημάτων από τη χρήση διατάξεων laser

Παραθέτουμε στη συνέχεια εικόνες από ατυχήματα σε μάτια, όπως ανακοινώθηκαν σε επιστημονικό περιοδικό το 2000.

Laser Eye Injuries by Yaniv Barkana, and Michael Belkin,

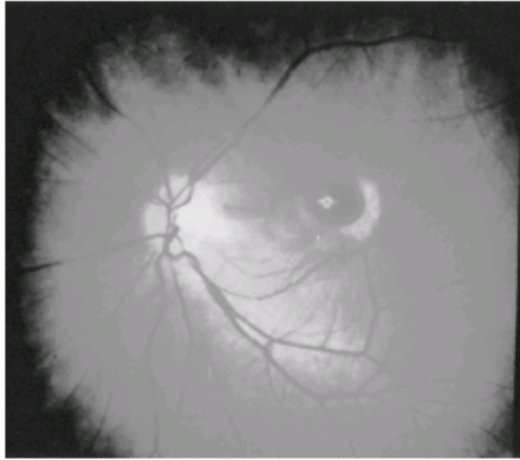
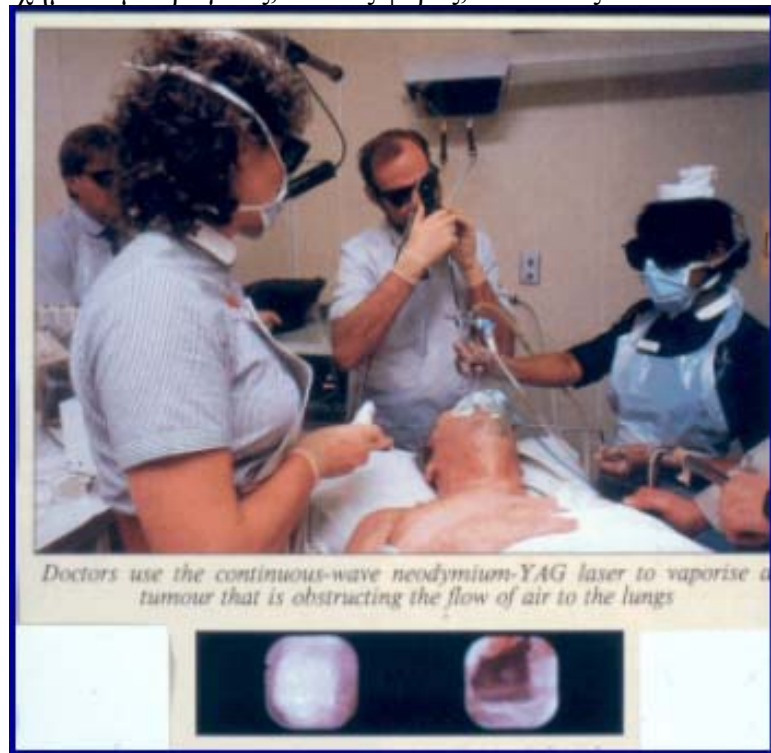


Fig. 3. An eye exposed to a Q-switched double Nd:YAG laser (532 nm at 14 mJ, 7 ns). Vision was lost immediately and never recovered beyond 6/120. Photograph was taken 2 months after injury, showing macular scar and the damage extending much further than the foveal lesion, presumably about 50 μm in diameter.

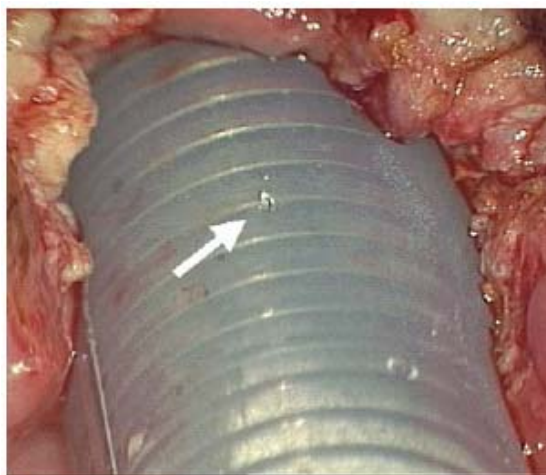


Fig. 4. An eye with four accidental 5-mJ exposures to Nd:YAG laser, 1 year after the injury. Scarring and contraction around the scars are evident (courtesy of the Medical Research Detachment, Walter Reed Army Institute of Research, San Antonio, Texas).

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται επίσης σε χειρουργικές επεμβάσεις με laser κοντά σε σωλήνες παροχής οξυγόνου ή αναισθησιολογικών αερίων, διότι υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ανάφλεξης στην τραχεία του ασθενούς. Παρά τις προφυλάξεις και τα ειδικά μέτρα που λαμβάνονται, ακόμα και σήμερα συμβαίνουν ατυχήματα με τραγικές, πολλές φορές, συνέπειες.



Σχήμα 12. Θέματα ασφάλειας από την ακτινοβολία laser - κίνδυνοι ανάφλεξης στην τραχεία.



*Σχήμα 13. Στην εικόνα φαίνεται ένας ενδοτραχειακός σωλήνας που χτυπήθηκε κατά λάθος από δέσμη CO₂ laser κατά τη χειρουργική αφαίρεση καρκινικού όγκου στο λάρυγγα. Η υγρή γάζα που κάλυπτε και προστάτευε το σωλήνα είχε αφαιρεθεί κατά λάθος. [Η εικόνα από δημοσίευση στο *Lasers in Surgery and Medicine* 32:384–390 (2003), ή στην ιστοσελίδα www.interscience.wiley.com.]*

Ατυχήματα που δε συνδέονται άμεσα με τη δέσμη του laser

Η χρήση των laser μπορεί να προκαλέσει, όπως έχουμε προαναφέρει, ατυχήματα που δε σχετίζονται με τη δέσμη του laser. Οι κυριότερες κατηγορίες κινδύνων είναι οι εξής:

- ηλεκτρικοί
- χημικοί
- πυρκαγιάς
- παράπλευρης ακτινοβολίας
- συμπιεσμένων αερίων

Μπορεί π.χ. να έχουμε ηλεκτρικό ατύχημα. Τέτοιο ατύχημα μπορεί να προκύψει κατά την επαφή με μη μονωμένα σημεία της διάταξης στα οποία γίνεται υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος. Για παράδειγμα κατά την εγκατάσταση της διάταξης του laser και τη συντήρησή της συχνά αφαιρούνται τα προστατευτικά καλύμματα της συσκευής, έτσι ώστε να έχουμε πρόσβαση στα ενεργά μέρη της. Το αποτέλεσμα ατυχούς επαφής με το ρεύμα μπορεί να κυμαίνεται από ένα ελαφρύ τσούξιμο, ρίγος έως το θάνατο. Γι' αυτό θα πρέπει να υπάρχει ένα επιπλέον προστατευτικό σύστημα, ώστε να προστατευόμαστε σε μεγαλύτερο βαθμό από κατά λάθος επαφή με ηλεκτρικά ενεργούς αγωγούς. Ένας ακόμη κίνδυνος είναι ότι αποθέματα υψηλής ηλεκτρικής τάσης και πυκνωτές βρίσκονται κοντά σε αντλίες ψύξης, γραμμές, φίλτρα κλπ. Σε περίπτωση διαρροής η κατάσταση είναι πολύ δύσκολη. Έχει καταγραφεί ένας σημαντικός αριθμός θανάτων από ηλεκτροπληξία, περιλαμβάνοντας άτομα πολύ καλά καταρτισμένα και εκπαιδευμένα τα οποία όμως σε πολλές περιπτώσεις εργάζονταν μόνα τους. Το τροφοδοτικό αποτελεί τον κυρίαρχο κίνδυνο εξαιτίας των υψηλών τάσεων, της υψηλής ενέργειας, των μεγάλων πηγών και των πυκνωτών.

Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούμε αδιαφανή προστατευτικά, όπως κουρτίνες, για να περιορίσουμε τη δέσμη laser από το να εξέλθει του χώρου εργασίας. Ενώ τα προστατευτικά μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να προσφέρουν μια ευρεία προστασία, συνήθως δε μπορούν να αντέξουν υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας πάνω από μερικά δευτερόλεπτα χωρίς ζημιά, με αποτέλεσμα να είναι πιθανό να αναφλεγούν. Γι' αυτό οι χρήστες εμπορικά διαθέσιμων προστατευτικών laser πρέπει να παίρνουν τις κατάλληλες οδηγίες πυρασφάλειας από τους κατασκευαστές.

Πολλά από τα υλικά που συνδέονται με την τεχνολογία λέιζερ μπορεί να αποτελέσουν χημικό κίνδυνο. Μολυσματικοί παράγοντες μπορεί να παραχθούν από την αλληλεπίδραση

μεταξύ της ακτίνας του λέιζερ και του στόχου. Σε διάφορες εφαρμογές των laser, η αλληλεπίδραση της δέσμης με το στόχο παράγει σε ορισμένες περιπτώσεις ένα νέφος προϊόντων αποδόμησης –ρυπαντών, που μπορεί να είναι από αέρια μετάλλων και σκόνη έως αερολύματα που μπορεί να περιέχουν βιολογικά μόρια ή ιστικά υπολείμματα. Επίσης ορισμένα οπτικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται για παράθυρα και φακούς υπερύθρου, είναι μια από τις πηγές των ρυπαντών. Επί παραδείγματι τα calcium telluride και zinc telluride καίγονται με τη παρουσία οξυγόνου όταν η ακτινοβολήση ξεπεράσει κάποια όρια. Ακόμη η έκθεση στο τελλούριο και στο οξείδιο του καδμίου πρέπει να ελέγχεται και να μην ξεπερνά κάποια όρια. Επίσης οι χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για να καθαριστούν τα οπτικά των laser, είναι διαβρωτικές, τοξικές ή εύφλεκτες και πρέπει να αποθηκεύονται σωστά. Τέλος μερικά laser απαιτούν επικίνδυνες ή τοξικές ουσίες για να λειτουργήσουν (π.χ. laser χρωστικών, excimer laser).

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρησιμοποίηση των laser, δεν είναι μια απλή και ακίνδυνη διαδικασία που μπορεί να κάνει ο οποιοσδήποτε. Θα πρέπει να αφήνεται σε εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο δε θα πρέπει να λησμονεί να λαμβάνει όλα τα προβλεπόμενα μέτρα για την ασφάλεια του.

8. ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER – Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΩΝ

Στις περισσότερες χώρες, σίγουρα στις αναπτυγμένες χώρες, έχει θεσμοθετηθεί η ειδικότητα του Φυσικού της Ιατρικής στο χώρο των μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών και ειδικότερα στο χώρο των εφαρμογών των laser, βιοϊατρικών και μη. Σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες προβλέπεται ο Σύμβουλος Προστασίας από τα Laser, ο οποίος συνεργάζεται με τις επιτροπές Ακτινοπροστασίας για τη θέσπιση και τήρηση των κανόνων ασφαλείας σε νοσοκομειακούς χώρους εφαρμογής Laser. Σε επιμέρους χώρους βιοϊατρικών εφαρμογών των Laser (π.χ. οφθαλμολογικό ιατρείο, γυναικολογικό, νευροχειρουργικό κ.ά.) ορίζεται ο Επιβλέπων για την Προστασία από τα Laser, ο οποίος πρέπει να επιτηρεί τη σωστή εφαρμογή των μέτρων προστασίας (γυαλιά, υγροί επίδεσμοι, φωτεινά σήματα κ.λ.π.)

α) Μέτρα Ελέγχου σε χώρους εφαρμογής των Laser

Υπάρχει μια σειρά πρακτικών κανόνων και μέτρων προστασίας που πρέπει να τηρούνται στους χώρους και στο περιβάλλον όπου χρησιμοποιείται η τεχνολογία laser. Ο χώρος εφαρμογών της τεχνολογίας laser πρέπει να είναι ελεγχόμενος και να υπάρχει ένας υπεύθυνος –συνήθως φυσικός με ειδικές σπουδές- επιφορτισμένος για την θέσπιση, εξειδίκευση και τήρηση των κανονισμών ασφαλείας και των μέτρων ελέγχου αυτών.

Για τον καθορισμό των μέτρων ελέγχου που πρέπει να εφαρμοστούν πρέπει να συνυπολογίζει ο φυσικός, ο υπεύθυνος για την ασφάλεια από τα laser, όχι μόνον την τάξη και την περιοχή εφαρμογής του laser αλλά και κάποια επιπλέον στοιχεία, όπως π.χ.:

- το πλήθος και την τάξη ενός εκάστου laser
- την τοποθεσία του laser στο περιβάλλον εργασίας
- την παρουσία απληροφόρητου, μη ειδικευμένου προσωπικού
- τη μονιμότητα ή όχι της πορείας διάδοσης της δέσμης laser
- την παρουσία αντικειμένων που συμπεριφέρονται είτε ως κατοπτρικές ή ως διάχυτα ανακλαστικές επιφάνειες στην πορεία της δέσμης
- τη χρήση οπτικών διατάξεων όπως είναι οι φακοί, τα μικροσκόπια και άλλα

Τα μέτρα ελέγχου διακρίνονται σε δύο τύπους:

- διοικητικός έλεγχος (κυρίως διαδικασίες),
- μηχανολογικός έλεγχος (π.χ. διαφράγματα για διακοπή της δέσμης).

Η ελεγχόμενη περιοχή πρέπει:

- να έχει περιορισμένη πρόσβαση σε άσχετα με την εφαρμογή πρόσωπα
- να έχει διακόπτες δέσμης για να απενεργοποιεί δυναμικά ισχυρές δέσμες laser
- να είναι σχεδιασμένη για να μειώνει διαχεόμενες και κατοπτρικές ανακλάσεις
- να εξασφαλίζει προστασία για τα μάτια για όλο το προσωπικό
- να μην έχει τη δέσμη του laser στο επίπεδο των οφθαλμών
- να μην βρίσκονται στην πορεία της δέσμης εύφλεκτα αντικείμενα
- να έχει τρόπους μείωσης της έκθεσης σε επίπεδα κάτω από το MPE και
- να εξασφαλίζει την αποθήκευση ή απενεργοποίηση του laser, όταν αυτό δεν χρησιμοποιείται
- να επιτρέπει μόνο σε εξουσιοδοτημένα και εκπαιδευμένα άτομα να κάνουν συντήρηση ή επισκευή των laser.

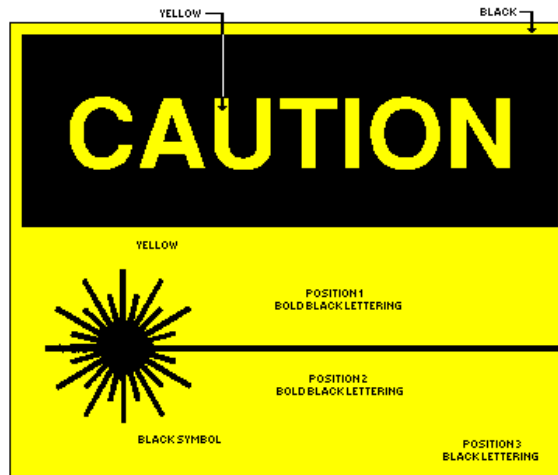
Αυτά τα μέτρα σχετίζονται άμεσα με το σύστημα και το εργαστήριο του laser. Είναι δαπανηρά αλλά θεωρούνται πολύ αξιόπιστα. Παραθέτουμε περιληπτικά ορισμένα μέτρα προστασίας σε χώρους εφαρμογής laser.

1. Ένα **προστατευτικό κάλυμμα** απαιτείται σε πολλές κατηγορίες laser. Αυτό το κάλυμμα θα πρέπει να είναι σταθερά ασφαλισμένο με συνδέσεις (**interlocks**), οι οποίες δε πρέπει να αναιρούνται κατά τη κανονική λειτουργία του laser. Σε μερικές περιπτώσεις, οι τοίχοι του δωματίου μπορούν απλά να θεωρηθούν ως προστατευτικά καλύμματα.
2. **Κύριος έλεγχος διακοπών**. Όλα τα laser της κατηγορία IV καθώς και κάποια άλλα συστήματα laser απαιτούν έναν κύριο έλεγχο διακοπών. Ο διακόπτης μπορεί να ενεργοποιηθεί με ένα κλειδί ή έναν κωδικό πρόσβασης. Μόνο οι εξουσιοδοτημένοι χειριστές αυτών των συστημάτων μπορούν να έχουν πρόσβαση στο κλειδί ή τον κωδικό. Η χρήση κύριου ελέγχου διακοπών συστήνεται, χωρίς να επιβάλλεται, στα laser κατηγορίας III B.
3. Απαραίτητοι κρίνονται οι **εξασθενητές δέσμης laser** (beam attenuators) και οι **φωτοφράχτες** (beam shutters) για την υποβάθμιση της δέσμης laser κατηγορίας IV. Συστήνονται επίσης και στις κατηγορίες IIIA και IIIB.
4. Σε ειδικές περιπτώσεις απαιτείται **καθυστερητής εκπομπής** (delayed emission device), ο οποίος δίνει τη δυνατότητα στο προσωπικό να προλάβει να απομακρυνθεί.
5. **Προειδοποιητικά φώτα** και **δείκτες εκπομπής** δείχνουν την κατάσταση του συστήματος laser (π.χ. σε λειτουργία ή εκτός λειτουργίας). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και **ηχητικοί συναγερμοί** για αυτό το σκοπό. Για την κατηγορία IV η προειδοποίηση ή ο συναγερμός πρέπει να διαρκεί περισσότερη ώρα έτσι ώστε να δίνουν μεγάλο χρονικό περιθώριο για να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα και να αποφευχθεί η έκθεση στην ακτίνα laser.
6. Εάν το laser έχει τη δυνατότητα της λειτουργίας εξ αποστάσεως, τότε **οπτικά εργαλεία/παράθυρα με φίλτρα** επιτρέπουν την ασφαλή εποπτεία της διαδικασίας και ειδικότερα της μείωσης της ισχύος της δέσμης. (Ειδικά εαν τα laser ανήκουν στις κατηγορίες IIIB και IV).
7. Κατά την ευθυγράμμιση του συστήματος laser, ένας ασφαλής τρόπος είναι η χρήση **βοηθημάτων ευθυγράμμισης**, όπως βοηθητικά laser χαμηλής ισχύος, μάσκες και στόχοι.
8. Απομάκρυνση όλων των αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στο σύστημα του laser προς αποφυγή **ανεπιθύμητων ανακλάσεων**.

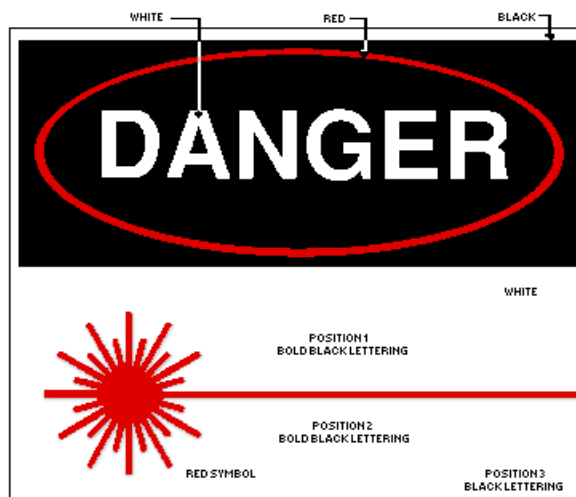
Συνοψίζοντας θα λέγαμε ότι τα παραπάνω μέτρα αποτελούν τα θεμέλια για την αποτελεσματική μείωση των κινδύνων κατά τη χρήση ενός συστήματος laser. Σε κάποιες, όμως, περιπτώσεις και διαδικασίες αυτά τα μέτρα δεν είναι επαρκή για την ασφάλεια από τη χρήση laser. Έτσι κρίνεται απαραίτητη η λήψη ορισμένων διαδικαστικών μέτρων για την εξασφάλιση της απαιτούμενης προστασίας όλων των ανθρώπων που εμπλέκονται στις εφαρμογές των laser.

Τα διαδικαστικά μέτρα ελέγχου σχεδιάζονται για να συμπληρώσουν τα μηχανολογικά μέτρα και για να βεβαιώσουν ότι το προσωπικό laser, οι χρήστες και οι ασθενείς προστατεύονται πλήρως από τους πιθανούς κινδύνους laser. Η εστίαση αυτών των ελέγχων είναι να παρασχεθεί η επαρκής εκπαίδευση, η κατάρτιση και οι διαδικασίες σχετικά με τη λειτουργία και τη συντήρηση του laser. Αναφέρουμε στη συνέχεια ορισμένα διοικητικά μέτρα ελέγχου, όπως:

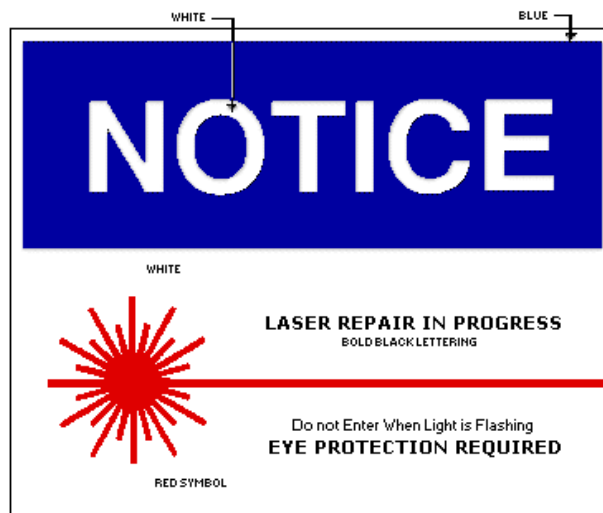
1. Απαραίτητος κρίνεται ο **Υπεύθυνος Ασφαλείας του laser (Laser Safety Officer)** σε laser κατηγορίας IIIA και άνω. Θα πρέπει να προβλέπει τυχόν κινδύνους και τον τρόπο αντιμετώπισής τους, που μπορούν να προκύψουν από το σύστημα του laser. Τα καθήκοντα ποικίλουν ανάλογα το είδος του laser και τη χρήση του αλλά οφείλει να είναι ειδικά εκπαιδευμένος, έτσι ώστε να αντεπεξέρχεται σε οποιαδήποτε κατάσταση βρεθεί αντιμέτωπος.
2. Σε κάθε χώρο θα πρέπει να συντάσσονται **Τυποποιημένες Διαδικασίες Λειτουργίας (Standard Operating Procedures)** και **Γραπτές Οδηγίες Ασφαλείας (Written Safety Instructions)**. Είναι οι κανόνες και οι διαδικασίες ασφαλούς εργασίας που πρέπει να γραφτούν βασισμένες στις θεσμοθετημένες με νόμους ή κανονισμούς απαιτήσεις ασφαλείας. Το κλειδί για την ανάπτυξη αποτελεσματικών Τυποποιημένων Διαδικασιών Λειτουργίας είναι η συμμετοχή εκείνων των ατόμων που ενεργοποιούν, λειτουργούν και συντηρούν τον εξοπλισμό κάτω από την καθοδήγηση του Υπεύθυνου Ασφαλείας Laser. Ο περισσότερος εξοπλισμός laser έρχεται με τις οδηγίες για την ασφαλή λειτουργία του από τους κατασκευαστές, εντούτοις μερικές φορές οι οδηγίες δεν ταιριάζουν καλά σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω των ειδικών συνθηκών χρήσης και χρειάζεται κατάλληλη προσαρμογή.
3. **Διαδικασίες Ευθυγράμμισης**. Πολλά ατυχήματα στα μάτια εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης laser. Οι διαδικασίες ευθυγράμμισης απαιτούν εξαιρετική προσοχή, ενώ θα πρέπει να εξασφαλίζουν ότι η έκθεση των οφθαλμών στην άμεση δέσμη ή σε διάχυτη δεν υπερβαίνει τη Μέγιστη Επιτρεπόμενη Έκθεση (Maximum Permissible Exposure ή MPE).
4. **Περιορισμός στους θεατές/επισκέπτες**. Τα πρόσωπα που δε χρειάζονται κατά τη λειτουργία ενός laser θα πρέπει να κρατηθούν μακριά. Για εκείνους που θα εισέλθουν σε μια περιοχή laser απαραίτητα είναι τα ειδικά προστατευτικά γυαλιά.
5. Θα πρέπει να απαιτείται πριν τη λειτουργία ενός συστήματος laser **ειδική έγκριση**. Η αίτηση για την συγκεκριμένη εφαρμογή οφείλει να γίνεται προτού αρχίσει η λειτουργία. Επίσης καλό θα ήταν να αναφέρονται όλα τα ονόματα του προσωπικού στην αίτηση αυτή, το οποίο θα πρέπει να γνωρίζει τις κατάλληλες διαδικασίες ελέγχου για το σύστημα laser και να έχει τη σωστή **εκπαίδευση και κατάρτιση** για το σύστημα laser.
6. Η **σήμανση των προστατευτικών συσκευών** είναι απαραίτητη, όπως των προστατευτικών γυαλιών, στα οποία πρέπει να αναγράφεται για ποια laser είναι σχεδιασμένα.
7. **Ετικέτες εξοπλισμού και κατηγορίας των laser**. Χώροι που έχουν laser κατηγορίας II ή IIIA πρέπει να έχουν το παρακάτω σήμα:



ενώ σε αυτές που βρίσκονται laser κατηγορίας IIIB και IV θα πρέπει να υπάρχει το παρακάτω σήμα:



Ακόμη όταν γίνονται επιδιορθώσεις στο χώρο του laser θα πρέπει να υπάρχει το παρακάτω κατάλληλο σήμα:



Προστατευτικά γυαλιά (Protective eyewear)

Απαιτούνται όπου και όποτε κάποιος μπορεί να δει τη δέσμη laser. Πρέπει να έχουν την κατάλληλη οπτική πυκνότητα και τις ανακλαστικές ιδιότητες ανάλογα με τα μήκη κύματος των ακτίνων των laser και την έντασή τους. Συγχρόνως, η ανάγκη για την προστασία των ματιών από τα laser πρέπει να ισορροπηθεί από την ανάγκη για την επαρκή ορατότητα. Τα γυαλιά πρέπει να επιθεωρούνται περιοδικά για την εξασφάλιση της καλής τους κατάστασης. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μερικά χαρακτηριστικά γυαλιά ασφάλειας laser.



ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ

ΛΑΘΕΜΕΝΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ LASER

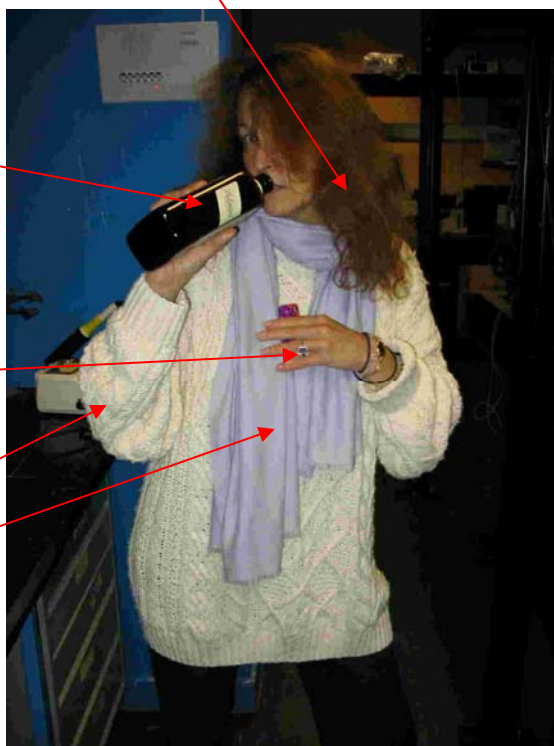
❖ Χρήσιμες οδηγίες

Μην αφήνετε λυτά τα μακριά μαλλιά

Μη τρώτε ή πίνετε μέσα στο εργαστήριο
Ειδικότερα αποφύγετε το αλκοόλ!

Αφαιρέστε ρολόγια και κοσμήματα (ακόμη και δαχτυλίδια γάμου!)

Αποφύγετε φαρδιά ρούχα και φουλάρια, μαντήλια (πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη θερμοκρασία στο εργαστήριο.)



Λ Α Θ Η !!!

Μάτια στο ύψος της δέσμης (έλλειψη προστατευτικών γυαλιών)

Καλώδιο που κρέμεται
Ρούχο στο δρόμο της
δέσμης

Λυτά μαλλιά

Χαλαρά καλύμματα

Έλλειψη οθόνης

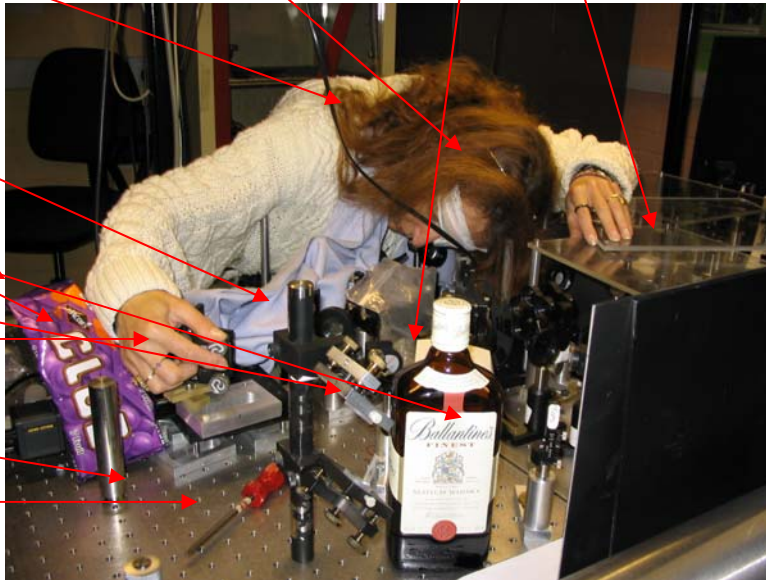
Φαγητό και ποτό

Ανοιχτό περισκόπιο

Κοσμήματα

Μη ασφαλισμένο
στήριγμα

Εργαλεία στο τραπέζι



β) Πρότυπα ασφαλείας

Όπως είναι λογικό πρότυπα ασφαλείας για τη χρήση των laser και όλων των άλλων συσκευών ή εξαρτημάτων που σχετίζονται με αυτά υπάρχουν από τότε που η χρήση τους άρχισε να εξαπλώνεται, λόγω του διευρυμένου πεδίου εφαρμογών τους. Μια μικρή έρευνα μπορεί να αποκαλύψει μια πληθώρα προτύπων που σχετίζονται έμμεσα ή άμεσα με την ασφάλεια των laser. Πιο συγκεκριμένα πρότυπα για την ασφάλεια των laser που χρησιμοποιούνται ευρέως έχουν δημοσιεύσει:

- το Εθνικό Αμερικανικό Ινστιτούτο Προτύπων (**American National Standards Institute**). Τα πρότυπα αυτά έχουν τον κωδικό ANSI και συγκεκριμένα κάποια χαρακτηριστικά πρότυπα ANSI σχετικά με την ασφάλεια των laser είναι τα:

Κωδικός προτύπου	Θέμα
ANSI Z136.1	Ασφαλής χρήση των laser
ANSI Z136.2	Ασφαλής χρήση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων οπτικών που χρησιμοποιούν διόδους laser και πηγές LED
ANSI Z136.3	Ασφαλής χρήση των laser σε εγκαταστάσεις υγείας
ANSI Z136.5	Ασφαλής χρήση των laser σε εκπαιδευτικά ιδρύματα
ANSI Z136.6	Ασφαλής χρήση των laser στο ύπαιθρο

- Το Βρετανικό Ινστιτούτο προτύπων (**British Standards Institute**). Όπως είναι κατανοητό τα πρότυπα αυτά έχουν τον κωδικό BSI και κυριότερος εκπρόσωπος αυτών που αφορούν την ασφάλεια των laser είναι το BSI 4803.
- Η Διεθνής Ευρωπαϊκή Σύμβαση (**International European Convention**) με κωδικό IEC. Στην Ελλάδα δεν έχουν δημιουργηθεί εθνικά πρότυπα, αλλά, όταν απαιτηθεί, «υιοθετούνται» κάποια από τα διεθνώς γνωστά και αποδεκτά πρότυπα, π.χ. εκείνα που έχουν πιο μεγάλη εφαρμογή είναι αυτά της IEC. Αυτό δεν γίνεται αυθαίρετα, απλά ο **Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης**

(ΕΛ.Ο.Τ) έχει υιοθετήσει πολλά από τα πρότυπα των παραπάνω χωρών και πιο πολύ τα πρότυπα της IEC. Μια μικρή περιήγηση στην ιστοσελίδα του (www.elot.gr) παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τα πρότυπα που διαθέτει καθώς και για τις πιστοποιήσεις που προσφέρει στις ενδιαφερόμενες εταιρείες. Έτσι, κάποια χαρακτηριστικά πρότυπα που αναφέρονται σε laser αλλά και σε εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε εργασίες laser και βρέθηκαν μέσω της ιστοσελίδας του ΕΛΟΤ είναι τα παρακάτω:

Κωδικός προτύπου	Θέμα
EN 12254	Πετάσματα για χώρους εργασίας με laser-Απαιτήσεις ασφαλείας και δοκιμές
EN 12584	Ατέλειες σε κοπή με οξυυδρική φλόγα, με ακτίνες laser και με πλάσμα -Ορολογία
EN 207	Ατομική προστασία ματιών-Φίλτρα και μέσα προστασίας ματιών ακτινοβολία laser (γυαλιά για laser)
EN 208	Ατομική προστασία ματιών-Μέσα προστασίας ματιών για ρυθμιστικές εργασίες σε laser και συστήματα laser (γυαλιά για ρυθμιστικές εργασίες σε laser)
EN 31252	Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser-Διάταξη laser- Ελάχιστες απαιτήσεις για τεκμηρίωση
EN 31253	Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Διάταξη laser – Μηχανικές διεπαφές
EN 60601-2-22	Ιατρικές ηλεκτρικές συσκευές- Μέρος 2: Ειδικές απαιτήσεις για την ασφάλεια συσκευών διαγνωστικής και θεραπευτικής με laser
EN 60825-1	Ασφάλεια προϊόντων laser-Μέρος 1: Ταξινόμηση εξοπλισμού, απαιτήσεις οδηγός χρήστη
EN 61040	Ανιχνευτές, όργανα και διατάξεις για τη μέτρηση της ισχύος και της ενέργειας ακτίνων laser
ISO 11145	Οπτική και οπτικά εργαλεία-Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Λεξιλόγιο και σύμβολα
ISO 11146	Laser και εξοπλισμός σχετικός με laser – Μέθοδοι δοκιμής για παραμέτρους ακτίνων laser – Πλάτη ακτίνων, γωνία απόκλισης συντελεστής διάδοσης των ακτίνων
ISO 11149	Οπτική και οπτικά εργαλεία – Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Σύνδεσμοι οπτικής ίνας για μη τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές laser
ISO 11151	Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Πρότυπα οπτικά εξαρτήματα – Μέρος 2: Εξαρτήματα για την υπέρυθρη φασματική περιοχή
ISO 11254	Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Προσδιορισμός του κατωφλιού βλάβης των οπτικών επιφανειών λόγω laser – Μέρος 2: Δοκιμή επί S επί 1
ISO 11551	Οπτική και οπτικά εργαλεία – Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Μέθοδος δοκιμής για το βαθμό απορρόφησης οπτικών εξαρτημάτων για laser
ISO 11554	Οπτική και οπτικά εργαλεία – Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Μέθοδοι δοκιμής για ισχύ δέσμης ακτίνων, ενέργεια και χρονικά χαρακτηριστικά
ISO 11670	Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Μέθοδοι δοκιμής για παραμέτρους ακτίνων laser –Ευστάθεια θέσης laser
ISO 11810	Οπτική και οπτικά εργαλεία – Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Μέθοδος για την αντίσταση στο laser των χειρουργικών σκεπασμάτων ή/και των προστατευτικών καλυμμάτων ασθενών

ISO 11990	Οπτική και οπτικά εργαλεία – Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Προσδιορισμός της αντίστασης σε laser του κορμού του τραχειακού σωλήνα
ISO 12005	Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Μέθοδοι δοκιμής για παραμέτρους ακτίνων laser - Πόλωση
ISO 13694	Οπτική και οπτικά εργαλεία – Laser και εξοπλισμός σχετικός με τα laser – Μέθοδοι δοκιμής για κατανομή πυκνότητας ισχύος δέσμης ακτίνων (ενέργεια)
ISO 13919	Συγκολλήσεις – Συγκολλημένοι σύνδεσμοι με δέσμη ηλεκτρονίων και laser – Καθοδήγηση για τα επίπεδα ποιότητας των ατελειών – Μέρος 1: Χάλυβας
ISO 15616	Δοκιμές αποδοχής για μηχανές ακτίνων laser – CO2 για συγκόλληση και κοπή υψηλής ποιότητας – Μέρος 3: Διακρίβωση οργάνων μέτρησης της ροής και της πίεσης αερίου
ISO 9956	Προδιαγραφή και έγκριση διαδικασιών συγκόλλησης για μεταλλικά υλικά – Μέρος 11: Προδιαγραφή διαδικασίας συγκόλλησης για συγκόλληση με δέσμη laser

Κάποια από τα παραπάνω πρότυπα είναι μεταφρασμένα στα ελληνικά από αντίστοιχα πρότυπα σε αγγλική γλώσσα (όπως για παράδειγμα το EN 60825-1 που προέρχεται από το αντίστοιχο IEC 825-1 και είναι μεταφρασμένο λόγω της μεγάλης σημασίας του) αλλά η πλειονότητα είναι κατευθείαν σε αγγλική γλώσσα. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως από την επιγραμματική παρουσίαση των βασικών προτύπων διαφαίνεται ότι ο κάθε ενδιαφερόμενος, κατασκευαστής ή χρήστης της τεχνολογίας laser, θα πρέπει να αναζητήσει το ή τα πρότυπο(α) που χρειάζεται και να γνωρίζει το περιεχόμενό τους. Επιπλέον, υπάρχουν πρότυπα, όπως το πρότυπο EN 60601-1 που δεν ανήκει άμεσα στα πρότυπα για την ασφάλεια των laser και των σχετικών εξαρτημάτων, αλλά αναφέρεται γενικά στην ασφάλεια ιατρικών συσκευών και είναι απαραίτητη η μελέτη του λόγω των πολλών παραπομπών προς αυτό σε πολλά από τα εξειδικευμένα πρότυπα που αναφέρθηκαν.

9. ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

1. “Ιατρικά lasers: Επιστήμη και κλινική εφαρμογή”, G. Carruth and A. McKenzie, μετάφραση, σύγχρονη ενημέρωση και επιμέλεια Α.Α. Σεραφετινίδης και Μ.Ι. Μακροπούλου, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1994.
2. “Biophysics of the photoablation process”, G. Muller, K. Dorschel, H. Kar, *Lasers in Medical Science*, V.6, p. 241, 1991.
3. “Role of tissue optics and pulse duration on tissue effects during high-power laser irradiation”, S.L. Jaques, *Applied Optics*, V.32, p. 2447, 1993.
4. “The Control of Fire Hazard During Cutaneous Laser Therapy”, R. Dave and P.J. Mahaffey, *Lasers in Medical Science*, V. 17, p.6, 2002.
5. <http://web.princeton.edu/sites/ehs/laserguide/index.htm>
6. <http://www.ehrs.upenn.edu/programs/laser/table1.html>
7. <http://www.uwaterloo.ca/>
8. http://info.tuwien.ac.at/islt/safety/section1/1_4.htm
9. <http://www.ctl.com.pl/art/art4.html>
10. <http://www.vh.org/index.html>
11. “Safety first”, Thomas MacMullin, SPIE’s *oemagazine*, p.29, June 2004
12. http://www.purdue.edu/ooop/policies/pages/facilities_lands/d_2.html

13. "Laser Safety Training Module", Prepared by the Laser Safety Committee, Southern Illinois University School of Medicine, Springfield, Illinois, 1st Edition, 2004
14. "Operator error is the key factor contributing to medical laser accidents", Harry Moseley, *Lasers in Medical Science* V.19, p.105, 2004
15. "Value of Endotracheal Tube Safety in Laryngeal Laser Surgery", A.M. Sesterhenn, Anja-A. Du" nne, D. Braulke, B.M. Lippert, B.J. Folz, and J.A. Werner, *Lasers in Surgery and Medicine* V.32, p.384, 2003
16. http://www.rli.com/accident/case_studies/
17. <http://www.adm.uwaterloo.ca/infohs/lasermanual/documents/section11.html>
18. Laser Safety, Strathclyde University, Dept. of Physics, Oct. 2003