



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μάρτης 2011

ΑΣΦΑΛΕΙΑ LASER.

Πιλοτική εφαρμογή σε χώρους εργασίας.



Αγγελογιαννάκης Βαγγέλης

A.M. : 09104077

Επιβλέπουσα:

Μακροπούλου Μυρσίνη

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*Αφιερώνεται
στους 66 νεκρούς εργάτες,
στα εργοδοτικά κάτεργα,
για το 2010.*

Περίληψη

Η χρήση συστημάτων laser στην βιομηχανία, και γενικότερα, έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκατίες, στη χώρα μας. Από όσο γνωρίζουμε, δεν υπάρχουν πολλές ελληνικές μελέτες πάνω στην ασφάλεια εργασίας των laser, από κάποιον επίσημο ελληνικό φορέα. Σκοπός της εργασίας μας είναι να καλύψουμε το κενό που υπάρχει, με βάση εθνικά και διεθνή πρότυπα καθώς και ξενόγλωσσες μελέτες. Ακόμα, είναι η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης μελέτης, στην ελληνική γλώσσα, εύχρηστης η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες από τους εργαζόμενους που εμπλέκονται με την τεχνολογία των laser (χειριστές μηχανημάτων, τεχνικούς ασφαλείας κτλ).

Η προσπάθειά μας αφορά την παρουσίαση της λειτουργίας νέων τεχνολογικών μηχανημάτων με χρήση δεσμών laser, των κινδύνων λειτουργίας τους, την επίδραση της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό, την υπάρχουσα κατάσταση στους χώρους εργασίας, ενώ τέλος θα προσπαθήσουμε να “τακτοποιήσουμε” τους διεθνείς και ευρωπαϊκούς κανόνες ασφαλείας, να στοιχειοθετήσουμε ένα πρότυπο ασφαλείας για βιομηχανικές χρήσεις laser.

Για της ανάγκες της εργασίας, πραγματοποιήσαμε επισκέψεις στον Ελληνικό Οργανισμό Τυποποίησης και στην βιβλιοθήκη του Ε.Μ.Π με σκοπό να συγκεντρώσουμε τα διεθνή πρότυπα ασφαλείας. Επίσης επισκεφθήκαμε χώρους εργασίας και εργαστήρια, όπου χρησιμοποιούνται μηχανήματα laser και πήραμε μετρήσεις από τις εργαστηριακές διατάξεις του Τομέα Φυσικής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε.

Το συμπέρασμά μας είναι ότι, σε γενικές γραμμές, η ασφαλής χρήση των laser είναι υποτιμημένη. Οι περισσότεροι κανονισμοί δεν ακολουθούνται στους χώρους εργασίας, ελλείψεις παρατηρήθηκαν ακόμα και σε χώρους επιστημονικής έρευνας.

Abstract

The use of laser systems in industry has increased significantly last decades in our country. As far as we know, there is no many Greek studies on Laser Safety, by any official Greek organization. Our objective is to fill this gap, based on national and international standards, as well as on foreign studies. Our purpose is to create a rulebook , easy to use, which can be used without any particular difficulties by workers involved with the technology of laser (machine operators, safety engineers , etc).

Our effort in the presentation of the operation of technological equipment using lasers, risk function, the effect of non-ionizing radiation on the human body, the status quo in the workplace, and finally we will try to "arrange" the international and European safety rules to constitute a safety standard for industrial laser uses.

For the purposes of this work, we visited the Greek Standardization Organization and the Library of NTUA in order to search and gather european and international safety standards. Also, we visited workplaces and laboratories, using laser equipment, and took measurements from the laboratory provisions of Physics Department of the School of Applied Physics and Mathematical Sciences.

Our conclusion is that, the safe use of laser is undervalued. Most rules are not followed in workplaces, deficiencies were observed even in areas of scientific research.

Περιεχόμενα.

Κεφάλαιο 1 – Ασφάλεια Εργασίας.....	3
1.1 Γενικά.....	3
1.2 Το παράδειγμα 2 κλάδων της παραγωγής.....	5
1.3 Η παρούσα προσπάθεια.....	6
Κεφάλαιο 2 – Αρχές λειτουργίας και ιδιότητες των lasers.....	10
2.1 Απορρόφηση, αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή.....	10
2.2. Αναστροφή πληθυσμών και ενίσχυση φωτός.....	11
2.3. Χαρακτηριστικά του LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας).....	13
2.4 Γκαουσιανές δέσμες.....	14
2.5 Παλμική λειτουργία – μεταγόμενο Q και εγκλείδωση ρυθμών.....	15
2.6 Laser που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία.....	18
2.6.1 Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂).....	18
2.6.2 Laser Nd:YAG.....	18
2.7 Αρχές λειτουργίας οργάνων μέτρησης.....	19
2.7.1 Θερμικοί ανιχνευτές – ενεργόμετρα.....	20
2.7.2. Φωτοδίοδος PIN.....	22
2.7.3. Photon drag detectors.....	24
Κεφάλαιο 3 – Εφαρμογές των laser στην βιομηχανία.....	25
3.1 Γενικά.....	25
3.2 Οι μηχανισμοί συγκόλλησης, κοπής, χάραξης και διάτρησης με laser.....	28
3.2.1 Συγκόλληση.	29
3.2.2. Κοπή και χάραξη.	31
3.2.3. Διάτρηση.....	33
3.3 Παραδείγματα μηχανημάτων laser.....	34
Κεφάλαιο 4 – Κίνδυνοι από τις χρήσεις των lasers.....	36
4.1 Κίνδυνοι από την δέσμη laser.....	36
4.1.1 Θερμική αλληλεπίδραση.	37
4.1.2 Φωτομηχανική αλληλεπίδραση.....	39
4.1.3 Φωτοχημική αλληλεπίδραση.....	40

4.1.4 Αποδόμηση βιολογικών ιστών από την ακτινοβολία laser.....	41
4.2 Δομή και απορρόφηση οφθαλμού.....	43
4.3 Δομή και απορρόφηση δέρματος.....	47
4.4 Επιπτώσεις της ακτινοβολίας στους ιστούς.....	50
4.2 Άλλοι κίνδυνοι.....	52
4.2.1 Ηλεκτροπληξία.....	52
4.2.2 Επικίνδυνα παραγόμενα αέρια.....	53
4.2.3 Ιοντίζουσα ακτινοβολία.....	53
4.2.4. Κίνδυνοι πυρκαγιάς.....	53
4.2.5. Επικίνδυνα αέρια.	54
4.3 Όρια έκθεσης – MPE.....	54
4.3.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τον υπολογισμό των MPE.....	55
4.3.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού δόσης ακτινοβολίας και MPE.....	58
4.3.3 Πίνακες MPE.....	60
4.4 Ταξινόμηση laser.....	62
Κεφάλαιο 5 – Μέτρα Ασφαλείας.....	64
5.1 Εισαγωγή.....	64
5.2 NOHD και ελεγχόμενη περιοχή laser.....	65
5.3 Τεχνικά Μέτρα Ασφάλειας.....	69
5.4 Μέτρα σε επίπεδο οργάνωσης της παραγωγής	72
5.5 Ατομική προστασία.....	75
5.6 Ειδικά γυαλιά προστασίας.....	76
5.6.1 Γενικά.....	76
5.6.2 Οπτική πυκνότητα.....	81
5.6.3 Κατώφλι ζημιάς.....	82
5.6.4 Διαπερατότητα στο ορατό.....	82
5.7 Εργασίες συντήρησης και επισκευής.	83
5.8 Τεχνικός Ασφάλειας Laser, εκπαίδευση και ανθρώπινος παράγοντας.....	84
5.8.1 Ο ρόλος του Τεχνικού Ασφάλειας Laser.	84
5.8.2 Εκπαίδευση εργαζομένων σε θέματα ασφάλειας.....	86
5.8.3 Ανθρώπινος παράγοντας – συνθήκες εργασίας.....	88
Κεφάλαιο 6 – Παρατηρήσεις και συμπεράσματα από χώρους εργασίας και	

εργαστήρια του Ε.Μ.Π.....	90
6.1 Επισκέψεις σε χώρους εργασίας.....	90
6.2 Επισκέψεις σε συστήματα κοπής και εργαστήρια εντός Ε.Μ.Π.....	93
6.3 Εργαστήρια του Τομέα Φυσικής της Σχολής Ε.Μ.Φ.Ε.....	96
6.4 Καρτέλα μετρήσεων.....	99
Παραρτήματα.....	114
Χρήσιμες σχέσεις.....	115
Παράρτημα 2 – Σήματα κινδύνου.....	123
Ευχαριστίες.....	130
Βιβλιογραφία.....	131

Κεφάλαιο 1 – Ασφάλεια Εργασίας

1.1 Γενικά.

Με τον όρο Ασφάλεια Εργασίας, εννοούμε όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας της ζωής, της υγείας και της σωματικής ακεραιότητας, των εργαζομένων στο εργασιακό περιβάλλον τους. Το ασφαλές και υγιεινό περιβάλλον εργασίας, όμως, δεν μπορεί να διασφαλιστεί στο ακέραιο, μέσα από τις καπιταλιστικές σχέσεις παραγωγής όπου κριτήριο είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους και κατ' επέκταση η μείωση του λεγόμενου “εργατικού κόστους”. Ποιο ειδικά, η κατάσταση στους εργασιακούς χώρους της χώρας μας, μπορεί να χαρακτηριστεί ανεπαρκής, ακόμα και σε σχέση με τα υπάρχοντα διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα.

Πρέπει, εδώ να αναφέρουμε την λειτουργία απαρχαιωμένων μέσων παραγωγής, την μηδενική τήρηση των όποιων κανόνων ασφαλείας υπάρχουν, από μεριάς εργοδοσίας, την έλλειψη ιατρών εργασίας και τεχνικών ασφαλείας στην πλειοψηφία των εργασιακών χώρων. Κανόνες ασφαλείας και υγιεινής τηρούνται μόνο από “καλές προθέσεις” ή όπου οι εργαζόμενοι πήραν την υπόθεση στα χέρια τους και διεκδίκησαν μέτρα ασφαλείας (βλ. ομοσπονδία οικοδόμων στους καύσωνες ή τα σωματεία της Ζώνης Περάματος μετά το τραγικό έγκλημα στις 24/7/2008)¹. Ακόμα μία μεγάλη ενόχληση που πρέπει να μας απασχολήσει είναι οι νέες τεχνολογίες που εισέρχονται την παραγωγή και δημιουργούν νέα πεδία ελέγχου, της επίδρασης της λειτουργίας τους, στον ανθρώπινο οργανισμό.²

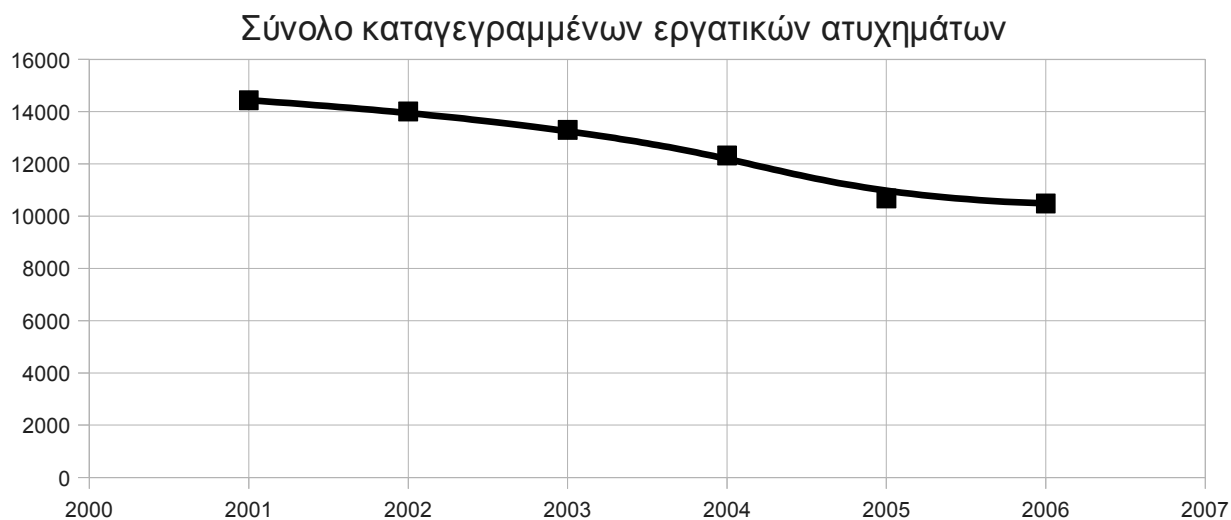
Τα στοιχεία μιλούν από μόνα τους. Ακολουθεί ο πίνακας των καταγεγραμμένων σοβαρών εργατικών ατυχημάτων για την περίοδο 2000-2006 και η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων του.³

1 “Ριζοσπάστης” 25/7/2008 αριθμός φύλλου 10133

2 Γραμματεία Υγιεινής και Ασφάλειας του Π.Α.ΜΕ. Πλαίσιο πάλης 06/06/2009.
Ιστοσελίδα του Ελληνικού Ινστιτούτου Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας - <http://www.elinyae.gr>
Ηλεκτρονική Βιβλιοθήκη Προτύπων του Ελληνικού Οργανισμού Τυποποίησης
<https://sales.elot.gr/online/search/main.do>

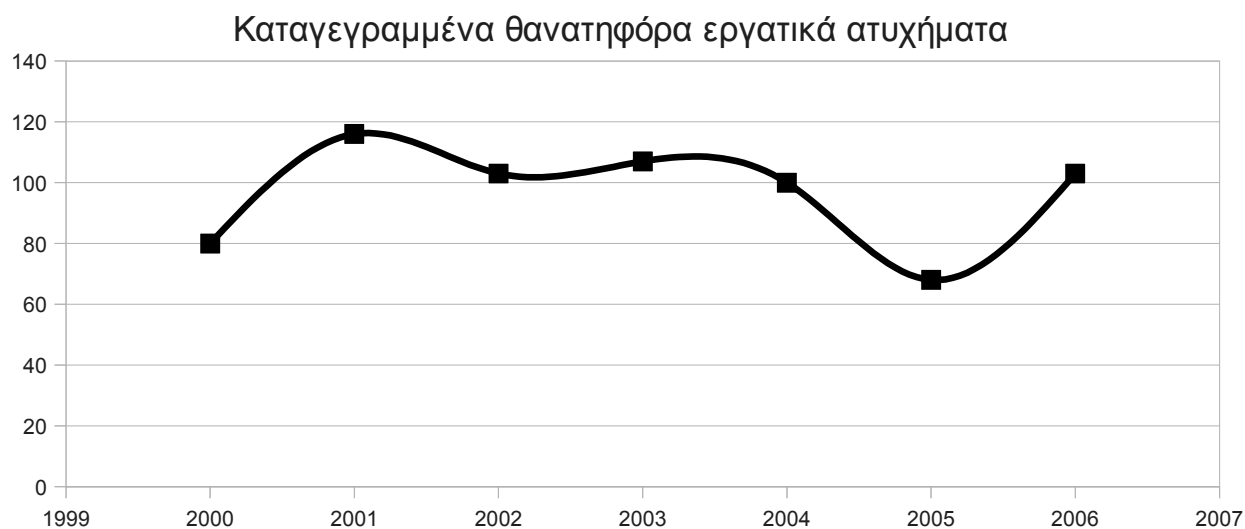
3 Πηγή: “Υγιεινή και Ασφάλεια της Εργασίας” τριμηνιαία έκδοση του ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε τεύχος Ιουλίου-Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2010.

Χρονιά	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Σύνολο	16179	14440	14004	13302	12325	10684	10489



Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα καταγεγραμμένα από το ΙΚΑ θανατηφόρα εργατικά ατυχήματα για την ίδια περίοδο, όπως και το αντίστοιχο διάγραμμα.⁴

Χρονιά	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006*
Θανατηφόρα	80	116	103	107	100	68	103



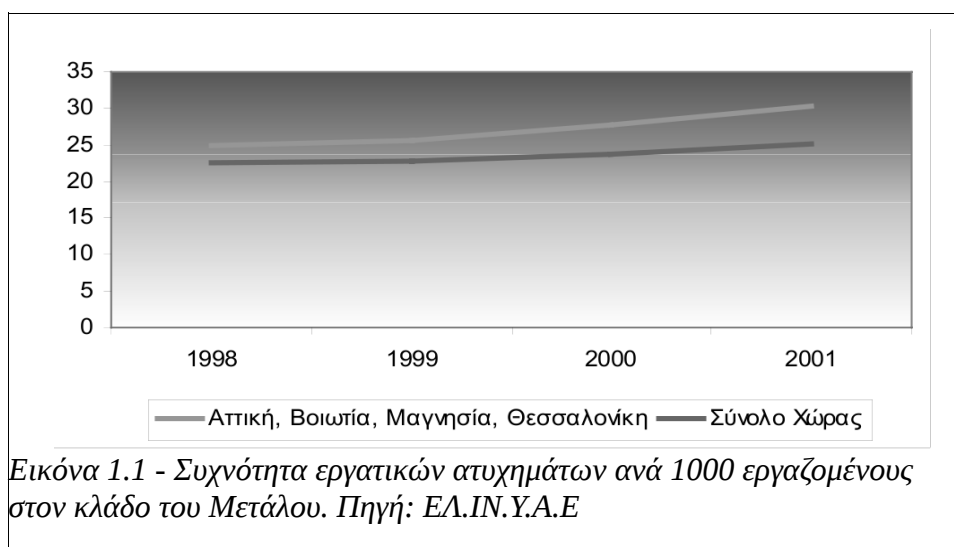
⁴ Πηγή: Έκθεση Πεπραγμένων του Σώματος Επιθεώρησης Εργασίας για το 2009

* Το ΙΚΑ έχει δώσει στη δημοσιότητα τα στοιχεία μέχρι το 2006

1.2 Το παράδειγμα 2 κλάδων της παραγωγής.

Ας δούμε, τώρα, δύο κλάδους της βιομηχανίας, το μέταλλο, ένα κλάδο με παράδοση στους επαγγελματικούς κινδύνους και τις τηλεπικοινωνίες, ένα κλάδο με ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και χρήση νέων τεχνολογιών.

Κατά την τετραετία 1998 ως 2001 καταγράφηκαν σε όλη τη χώρα από το ΙΚΑ 7.351 εργατικά ατυχήματα στον τομέα της βιομηχανίας μετάλλου, καταλαμβάνοντας μερίδιο 10% των συνολικών εργατικών ατυχημάτων που έλαβαν χώρα σ' αυτή την τετραετία (69.578 ατυχήματα). Στο κλάδο της μεταλλουργίας, οι κυριότερες επαγγελματικές νόσοι είναι η επαγγελματική βαρηκοΐα, οι επαγγελματικές δερματοπάθειες, τα νοσήματα από έκθεση σε αμίαντο, οι αποφρακτικές πνευμονοπάθειες, οι μυοσκελετικές παθήσεις, η πυριτίαση, ο καρκίνος του πνεύμονα, του λάρυγγα και το μεσοθηλίωμα από έκθεση σε αμίαντο, καθώς και καρκίνοι από έκθεση σε χρώμιο, αρσενικό, αρωματικές αμίνες, αλογονομένους υδρογονάνθρακες, βενζόλιο, ιοντίζουσα ακτινοβολία κλπ. Είναι τόσο φτωχά τα ελληνικά στοιχεία για τις Επαγγελματικές Νόσους, που ουσιαστικά δεν προσφέρονται για την εξαγωγή αντιπροσωπευτικού συμπεράσματος. Ο μοναδικός φορέας από τον οποίο αναγνωρίζονται και καταγράφονται τα επαγγελματικά νοσήματα στην Ελλάδα είναι το ΙΚΑ. Κατά το έτος 2001 (με 1.941.265 ασφαλισμένους) έγιναν 82 αιτήσεις αναγνώρισης επαγγελματικής νόσου και αναγνωρίστηκαν οι 67 από αυτές.⁵



5 “Εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου στο τομέα της βιομηχανίας μετάλλου - μεταλλικών προϊόντων” Μελέτη ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε. 2004

Σύμφωνα με μελέτη του ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε σε τηλεφωνικά κέντρα, φαίνεται το ψυχοκοινωνικό περιβάλλον να είναι αρκετά επιβαρημένο για τους εργαζόμενους, ειδικά όσον αφορά τους ρυθμούς εργασίας και τις ποσοτικές απαιτήσεις. Τα διαλείμματα που ορίζει ο νόμος (15 λεπτά κάθε 2 ώρες ή εναλλαγή εργασιών), για εργασία με οθόνες οπτικής απεικόνισης, δεν τηρούνται σε όλες τις επιχειρήσεις. Ο θόρυβος είναι στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων (87%) πάνω από τα επιτρεπτά όρια για εργασία με οθόνες οπτικής απεικόνισης. Επιπλέον εμφανίζεται ένα σημαντικό ποσοστό (27%) όπου η ένταση φωτισμού δεν είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια, με ιδιαίτερο πρόβλημα αντανάκλασεων σε ορισμένες θέσεις εργασίας. Τέλος ο αερισμός στα τηλεφωνικά κέντρα που μελετήθηκαν κρίνεται ανεπαρκής.

Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τις κεραίες κινητής τηλεφωνίας, αξίζει να σημειωθεί ότι για την ειδικότητα των εναερίων διαπιστώθηκε ότι οι δύο από τους τρεις νοιώθουν μερικές φορές ζέσταμα ή κάψιμο στο σώμα ή στα άκρα όταν δουλεύουν, σύμπτωμα που συνδέεται με υπερέκθεση σε ακτινοβολία. Ακόμα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ιδιωτικές εταιρίες κινητής τηλεφωνίας δεν επέτρεψαν στους ερευνητές του ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε να διενεργήσουν μετρήσεις σε κεραίες εγκατεστημένες σε μεγάλα πάρκα κεραιών παρά μόνο σε μικρά πάρκα ή σε μεμονωμένες κεραίες όπου και οι τιμές έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ήταν κάτω από τα όρια της επαγγελματικής έκθεσης.⁶

1.3 Η παρούσα προσπάθεια.

Η βελτίωση της Υγιεινής & Ασφάλειας στους χώρους δουλειάς σημαίνει βελτίωση των συνθηκών, μέτρα προστασίας, εκμηδένιση του επαγγελματικού κινδύνου, περιορισμός ατυχημάτων κι επαγγελματικών ασθενειών. Πρέπει να έχει ως στόχο την βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου, συνολικά.

Η έρευνα που αφορά την Ασφάλεια Εργασίας μπορεί να απασχολήσει, επιστημονικές ομάδες και ερευνητές από διάφορους κλάδους της Φυσικής, της Χημείας, της Βιολογίας, της Ιατρικής κ.α. Μπορεί να μελετηθεί ο εκσυγχρονισμός

6 “Εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου στο κλάδο των τηλεπικοινωνιών.” Μελέτη ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε 2004

των προτύπων ασφαλείας, η δημιουργία καινούργιων που να περιλαμβάνουν την τεχνολογική εξέλιξη των γραμμών παραγωγής και την χρήση νέων εφαρμογών όπως τα laser και η πυρηνική τεχνολογία. Να μας απασχολήσει ακόμα η εκδήλωση νέων επαγγελματικών ασθενειών (π.χ. ψυχολογικών).

Θα προσπαθήσουμε να αναλύσουμε μία από όλες αυτές τις πλευρές του ζητήματος αυτού. Αφορά την παρουσίαση της λειτουργίας νέων τεχνολογικών μηχανημάτων με χρήση δεσμών laser, των κινδύνων λειτουργίας τους, την επίδραση της μη ionτίζουσας ακτινοβολίας στον ανθρώπινο οργανισμό, την υπάρχουσα κατάσταση στους χώρους εργασίας, ενώ τέλος θα προσπαθήσουμε να “τακτοποιήσουμε” τους διεθνείς και ευρωπαϊκούς κανόνες ασφαλείας, να στοιχειοθετήσουμε ένα πρότυπο ασφαλείας για βιομηχανικές χρήσεις laser. Παρόλο που τα τελευταία χρόνια μηχανήματα που χρησιμοποιούν δέσμες laser χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή, από όσο γνωρίζουμε, δεν υπάρχει καμία τέτοια ελληνική μελέτη από κανένα επίσημο φορέα (ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, ΙΚΑ, ΓΣΕΕ κτλ) παρά μόνο τα διεθνή πρότυπα μεταφρασμένα ή μη από τον ΕΛ.Ο.Τ.

Σκοπός μας είναι να καλύψουμε το κενό που υπάρχει, με βάση προγενέστερες και ξενόγλωσσες μελέτες. Ακόμα, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης μελέτης, εύχρηστης η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες από τους εργαζόμενους που εμπλέκονται με την τεχνολογία των laser (χειριστές μηχανημάτων, τεχνικούς ασφαλείας κτλ).

Πραγματοποιήσαμε μία μικρή έκτασης έρευνα την βιβλιοθήκη προτύπων του ΕΛΟΤ. Επισκεφτήκαμε την βιβλιοθήκη δύο φορές, όπου καταγράψαμε όλα τα πρότυπα που είναι σχετικά με την ασφάλεια χρήσης των laser. Δυστυχώς, μπορέσαμε να ξεφυλλίσουμε μόνο κάποια από αυτά, και να κρατήσουμε σημειώσεις, καθώς η τιμή αγοράς ενός προτύπου ήταν απαγορευτική. Στη τρίτη και τελευταία επίσκεψή μας συνομιλήσαμε με υπάλληλο του ΕΛΟΤ, που μας βοήθησε στην περαιτέρω έρευνά μας στα πρότυπα ANSI και IEC. Στον πίνακα παραθέτουμε τα πρότυπα, που μπορούν να βρεθούν στην βιβλιοθήκη του ΕΛΟΤ, να σημειώσουμε όμως ότι για τα περισσότερα δεν διατίθεται ελληνική μετάφραση:

Κωδικός προτύπου	Ονομασία (σε ελληνική μετάφραση)
EN 12254	Πετάσματα για χώρους εργασίας με laser
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 I
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

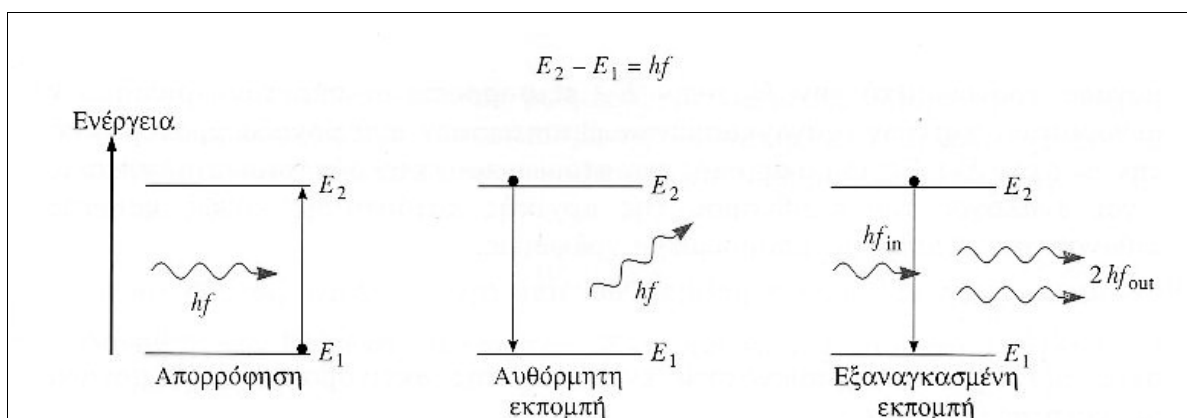
Ακόμα πρέπει να σημειώσουμε ότι μετά το Φθινόπωρο του 2010 μια προσπάθεια συγκέντρωσης των πινάκων των MPE⁷ γίνεται από το Προεδρικό διάταγμα υπ' αριθμόν 82 στο Φ.Ε.Κ 145 της 1ης Σεπτεμβρίου 2010, "Ελάχιστες προδιαγραφές υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (τεχνητή οπτική ακτινοβολία), σε συμμόρφωση με την οδηγία 2006/25/ΕΚ "

7 Βλ. κεφάλαιο 4

Κεφάλαιο 2 – Αρχές λειτουργίας και ιδιότητες των lasers

2.1 Απορρόφηση, αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή.

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία ενός laser, πρέπει πρώτα να αναφερθούμε στις διεργασίες που περιγράφουν την εκπομπή και την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα άτομα (Βλ. Εικόνα 2.1⁸). Ένα άτομο μπορεί να απορροφήσει ένα φωτόνιο ενέργειας hf (όπου h η σταθερά του Planck και f η συχνότητα του φωτονίου) και να υποστεί διέγερση από μία κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας E_1 σε μία κατάσταση υψηλότερης ενέργειας E_2 , όπου $E_2 - E_1 = hf$. Αν ορίσουμε την πιθανότητα απορρόφησης ανά μονάδα χρόνου και ανά άτομο ίση προς $B_{12}u(f)$, όπου B_{12} είναι ο συντελεστής απορρόφησης του Einstein και $u(f)$ η πυκνότητα της



Εικόνα 2.1 - Αναπαραστάσεις σε διαγράμματα ενεργειακών σταθμών των φαινομένων της απορρόφησης, της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης εκπομπής. Πηγή: Σύγχρονη Φυσική.

ακτινοβολίας. Άρα η πιθανότητα της απορρόφησης της ακτινοβολίας, υποτίθεται ότι είναι ανάλογη προς την πυκνότητα της. Όταν ένα άτομο διεγερθεί στην στάθμη 2, έχει μια ορισμένη πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου να υποστεί μια αυθόρμητη μετάπτωση πίσω στην στάθμη 1. Ο ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής μπορεί να χαρακτηριστεί από τον συντελεστή A_{12} = “πιθανότητα αυθόρμητης μετάπτωσης ανά μονάδα χρόνου, ανά άτομο” ή από τον χρόνο ζωής της στάθμης 2 που ορίζεται ως:

$$t_s = \frac{1s}{A_{12}} \quad (2.1)$$

8 R.A. Serway, C.J. Moses, C.A. Moyer, “Σύγχρονη Φυσική”, Π.Ε. Κρήτης, 2004

πέρα από την αυθόρμητη εκπομπή, η οποία είναι ανεξάρτητη από την πυκνότητα ακτινοβολίας, μπορεί να συμβεί ένα άλλο είδος εκπομπής το οποίο εξαρτάται από την πυκνότητα ακτινοβολίας. Εάν ένα φωτόνιο ενέργειας πάλι hf αλληλεπιδράσει με ένα άτομο όταν αυτό βρίσκεται στην στάθμη 2, το ηλεκτρικό πεδίο που σχετίζεται με αυτό το φωτόνιο μπορεί να επιφέρει μία ατομική εκπομπή, τέτοια ώστε το εκπεμπόμενο φωτόνιο να ταλαντώνεται σε φάση με το προσπίπτον και να κινείται στην ίδια κατεύθυνση. Δύο τέτοια φωτόνια λέμε ότι είναι σε συμφωνία. Το φαινόμενο αυτό λέγεται εξαναγκασμένη εκπομπή. Μπορούμε να θέσουμε τον ρυθμό εξαναγκασμένης εκπομπής ίσο με $B_{21}u(f)$, όπου B_{21} είναι ο συντελεστής του Einstein για την εξαναγκασμένη εκπομπή. Αποδεικνύεται ότι:

$$B_{12} = B_{21} \quad (2.2)$$

2.2. Αναστροφή πληθυσμών και ενίσχυση φωτός.

Οι πληθυσμοί N_1 και N_2 των ενεργειακών σταθμών 1 και 2 αντίστοιχα ακολουθούν την κατανομή Boltzmann:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-hf}{kT}} \quad (2.3)$$

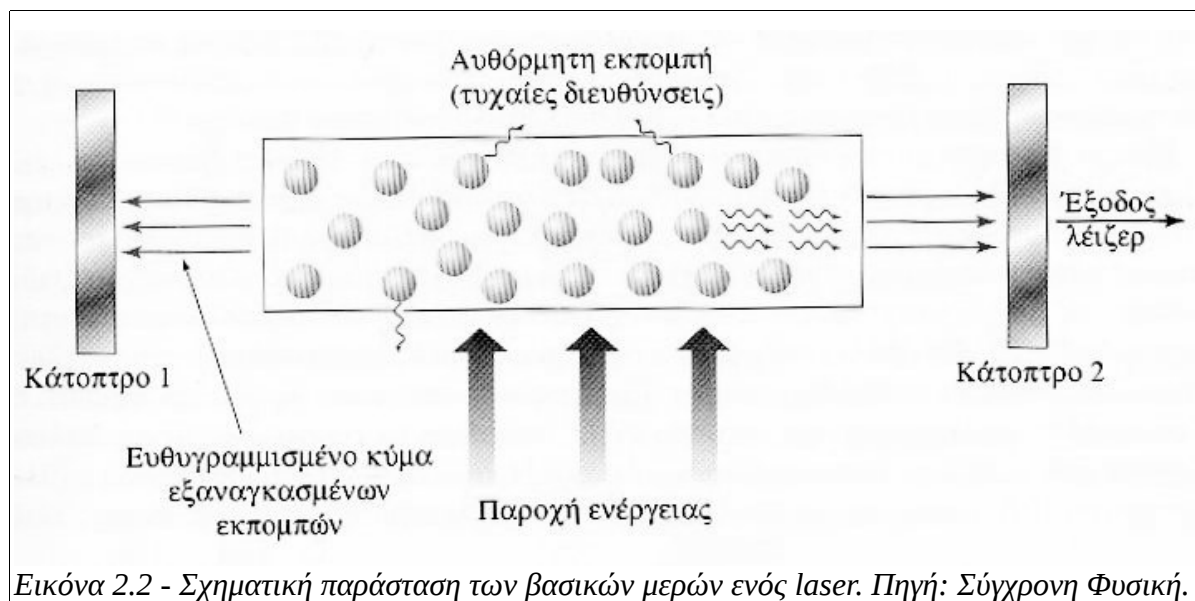
όταν προσπίπτει φως σε ένα σύστημα ατόμων υπό θερμική ισορροπία, υπάρχει συνήθως μία καθαρή απορρόφηση ενέργειας, επειδή, σύμφωνα με την κατανομή του Boltzmann, υπάρχουν περισσότερα άτομα στην θεμελιώδη στάθμη από ότι σε διεγερμένες (π.χ. Στην 2).

Αν αντιστρέψουμε την κατάσταση αυτή (με διάφορους τρόπους π.χ. υψηλή τάση, οπτική άντληση), δηλαδή, τα περισσότερα άτομα να βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση, τότε δημιουργείται η κατάσταση που λέμε αναστροφή πληθυσμών. Στην αναστροφή πληθυσμών μπορεί να προκύψει ενίσχυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Υπό κατάλληλες συνθήκες, ένα και μοναδικό φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει μία χιονοστιβάδα από φωτόνια, παραγόμενα με εξαναγκασμένη εκπομπή, τα οποία βρίσκονται όλα σε φάση, κινούνται στην ίδια κατεύθυνση και έχουν την ίδια συχνότητα.

Τοποθετούμε μια ράβδο ενός ενισχυτικού μέσου (ή ένα σωλήνα αερίου ή υγρού)

μεταξύ δύο κατόπτρων (του ενός εκ των δύο ημιπερατού) όπως στην εικόνα 2.2. Τα δύο κάτοπτρα είναι ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα της ράβδου. Το οπτικό μήκος της κοιλότητας που δημιουργείται είναι d , η ανακλαστικότητα του μερικώς διαπερατού κατόπτρου R και η απολαβή έντασης της ράβδου G .

Αρχικά το φως που εκπέμπεται προέρχεται μόνο από φθορισμό ή αυθόρμητη εκπομπή. Αυτή όμως δεν είναι κατευθυντική ακτινοβολία, αλλά ένα μέρος εκπέμπεται κατά μήκος του άξονα της κοιλότητας.



Ας θεωρήσουμε ένα φωτόνιο που εκπέμπεται παράλληλα. Αυτό υφίσταται πολλαπλές ανακλάσεις στα κάτοπτρα. Μετά από κάθε πλήρη κύκλο στην κοιλότητα, η ένταση του πακέτου φωτονίων που σχηματίζεται αυξάνεται κατά G^2 και μειώνεται κατά R . Αν $G^2R > 1$ τότε η ένταση του φωτός αυξάνεται χωρίς όριο. Μόνο κύματα που διαδίδονται παράλληλα στον άξονα της κοιλότητας ενισχύονται, ενώ τα υπόλοιπα διαφεύγουν ή λαμβάνονται από το υγρό ψύξης του συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή μιας ισχυρής και κατευθυντικής δέσμης φωτός. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του laser, P_0 , είναι το ποσοστό της φωτεινής ισχύος που εξέρχεται μέσω του μερικώς διαπερατού κατόπτρου και είναι προσεγγιστικά:

$$P_0 = \left(N_0 \frac{V}{2}\right) A_{21} h f_{21} \quad (2.4)$$

όπου N_0 είναι ο συνολικός αριθμός ατόμων, V ο όγκος του ενεργού υλικού, hf_{21} η ενέργεια φωτονίου.

Μια δεύτερη προϋπόθεση είναι απαραίτητη για την εκπομπή ακτινοβολίας laser. Εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων, το πακέτο φωτονίων επιστρέφει στο ενεργό υλικό αρκετές φορές πριν ολοκληρωθεί η εκπομπή. Αν το πακέτο φωτονίων που επιστρέφει στο ενεργό υλικό είναι εκτός φάσης με αυτό που εκπέμπεται, τότε τα δύο κύματα θα συμβάλλουν αναιρετικά και η εκπομπή θα τερματιστεί. Μπορούμε όμως να διακόψουμε την εκπομπή του υλικού εφαρμόζοντας ένα ηλεκτρικό πεδίο ακριβώς εκτός φάσης, σε σχέση με το πεδίο του υλικού. Συνεπώς τα μόνα κύματα που υπάρχουν στην κοιλότητα θα είναι αυτά που ικανοποιούν την συνθήκη ενισχυτικής συμβολής:

$$n\lambda = 2d \quad (2.5)$$

Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ανακλάσεων, μόνο μήκη κύματος κοντά στις τιμές $2d/n$ ενισχύονται στην κοιλότητα. Γενικά, υπάρχουν πολλά τέτοια μήκη κύματος εντός του φάσματος φθορισμού της πηγής, έτσι ώστε η τιμή του d να μην είναι καθόλου κρίσιμη.

2.3. Χαρακτηριστικά του LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας)

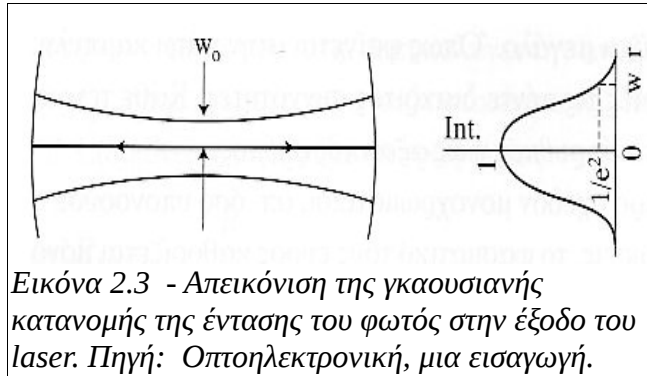
Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι παρόλο που υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι laser, όλοι τους έχουν ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που το κάνουν να ξεχωρίζει από τις συμβατικές πηγές φωτός. Αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά είναι:

1. Η μονοχρωματικότητα.(βλ. Σχέση 2.5), δηλαδή η εκπομπή φωτός σε στενό φάσμα μήκους κύματος, λόγω του συντονισμού της κοιλότητας του laser.
2. Η λαμπρότητα δηλαδή η μεγάλη πυκνότητα ισχύος της δέσμης, (βλ. Σχέση 2.4).
3. Η συμφωνία της δέσμης, λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής.
4. Η κατευθυντικότητα, δηλαδή η μικρή απόκλιση της δέσμης, λόγω της

διάταξης της κοιλότητας. (βλ. Ενότητα 2.4).

2.4 Γκαουσιανές δέσμες.

Τα περισσότερα lasers εκπέμπουν δέσμες με γκαουσιανή κατανομή της έντασης. Η εικόνα δείχνει την διάδοση μιας γκαουσιανής δέσμης (βλ. Εικόνα 2.3⁹). Τόσο μέσα όσο και έξω από την κοιλότητα, η δέσμη διατηρεί την γκαουσιανή της κατανομή.



Αυτό σημαίνει ότι σε απόσταση z από τη πηγή. Η κατανομή της έντασης δίνεται από την σχέση:

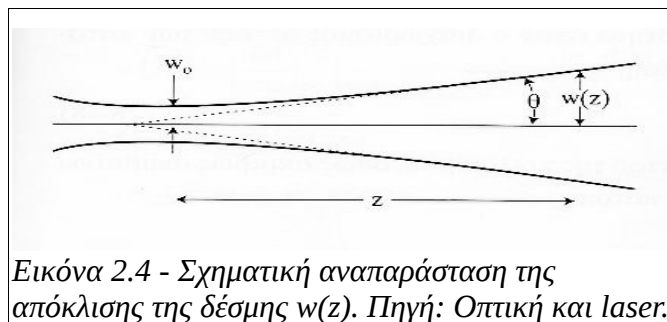
$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}}$$

(2.6)

όπου το $w(z)$ είναι το εύρος της δέσμης σε απόσταση z (βλ. εικόνα 2.4¹⁰):

$$w(z) = w_0 \left[1 + \frac{\lambda z^2}{\pi w_0^2} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

όπου w_0 το αρχικό εύρος. Για μεγάλες αποστάσεις z , ο όρος στην παρένθεση



γίνεται πολύ μεγαλύτερος της μονάδας.

Σε αυτή την περίπτωση, η γκαουσιανή δέσμη έχει απόκλιση υπό γωνία θ :

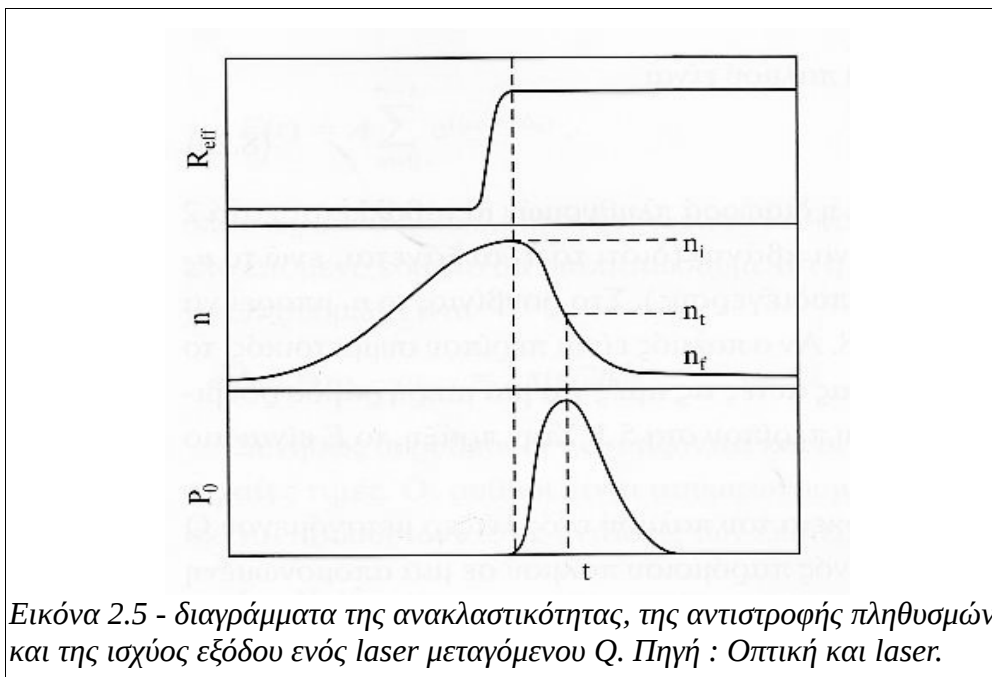
9 J. Wilson, J. Hawkes, “Οπτοηλεκτρονική, μία εισαγωγή”. Επιστημονική επιμέλεια Α.Α. Σεραφετινίδης, Π.Ε.Ε.Μ.Π, 2007

10 M. Young, “Οπτική και Lasers”, Π.Ε.Ε.Μ.Π, 2008

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (2.8)$$

2.5 Παλμική λειτουργία – μεταγόμενο Q και εγκλείδωση ρυθμών.

Η τεχνική μεταγόμενου Q επιτρέπει την δημιουργία παλμών laser μικρής χρονικής διάρκειας (της τάξης του ns) και μεγάλης ισχύος κορυφής (ακόμα και της τάξης του MW). Η αρχή της τεχνικής αυτής έχει ως εξής: τοποθετούμε ένα διάφραγμα μέσα στην κοιλότητα έτσι ώστε όταν αυτό είναι κλειστό να μην ταλαντώνεται, δηλαδή να μην υπάρχει δράση laser. Έτσι όμως η αναστροφή πληθυσμών μπορεί να φτάσει σε μεγάλα επίπεδα. Όταν το διάφραγμα ανοίγει απότομα, το laser θα έχει μία απολαβή πολύ μεγαλύτερη από τις απώλειες και η αποθηκευμένη ενέργεια θα απελευθερωθεί μέσω ενός υψηλής ισχύος παλμού.



Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι μεταγόμενου Q που θα παρουσιάσουμε συνοπτικά:

1. Ηλεκτο-οπτικά διαφράγματα: εδώ χρησιμοποιούμε έναν πολωτή και μία κυψελίδα Rockels. Η κυψελίδα είναι ένα σύστημα που όταν εφαρμόζουμε συνεχή τάση, μετατρέπεται σε διπλοθλαστικό. Αυτή η επαγόμενη διπλοθλαστικότητα είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης. Ο άξονας του πολωτή σχηματίζει γωνία 45° με τους άξονες διπλοθλαστικότητας. Το γραμμικά πολωμένο φως που περνά από τον πολωτή μετατρέπεται σε

κυκλικά πολωμένο από την κυψελίδα Rockels, ανακλάται στο κάτοπτρο, επαναμετατρέπεται σε γραμμικά πολωμένο από την κυψελίδα, με άξονες ορθογώνιους στους αρχικούς και μπλοκάρεται από τον πολωτή. Το διάφραγμα ανοίγει όταν μηδενίσουμε την τάση στην κυψελίδα Rockels.

2. Μηχανικά διαφράγματα. Το ένα από τα δύο κάτοπτρα περιστρέφεται γύρω από άξονα κάθετο στον άξονα της κοιλότητας. Χρειαζόμαστε μεγάλη συχνότητα περιστροφής, της τάξης των 30.000 rpm για κοιλότητα μήκους 50cm.
3. Διάφραγμα κορεσμού απορροφητή. Είναι η απλούστερη μέθοδος. Το διάφραγμα αποτελείται από μία κυψελίδα, η οποία περιέχει κατάλληλο υλικό που απορροφά στο μήκος κύματος του laser. Το υλικό αυτό όμως είναι και κορέσιμο, δηλαδή χαρακτηρίζεται από μία ένταση κορεσμού I_s πάνω από την οποία ο απορροφητής γίνεται σχεδόν διαφανής.
4. Ακουστο-οπτικά διαφράγματα. Τοποθετείται στην κοιλότητα ένα διάφραγμα από διαπερατό οπτικό υλικό, στο οποίο διαδίδεται ένα κύμα υπερήχων. Λόγω του κύματος υπερήχων, το υλικό λειτουργεί σαν περιοδικό φράγμα. Η μηχανική τάση που επάγεται από το υπερηχητικό κύμα έχει σαν αποτέλεσμα τοπικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης. Το φράγμα έχει περίοδο ίση με την περίοδο του κύματος και πλάτος ανάλογο με το πλάτος του κύματος.

Αν εξετάσουμε την έξοδο ενός laser με ένα φασματομέτρο υψηλής διακριτικής ικανότητας, θα διακρίνουμε ένα αριθμό διακριτών συχνοτήτων. Αυτό οφείλεται στους διακριτούς ρυθμούς ταλάντωσης που πραγματοποιούνται στην κοιλότητα του laser. (βλ. Σχέση 2.5)¹¹.

Με την μέθοδο εγκλείδωσης ρυθμών, καταφέρνουμε να αναγκάσουμε τους διάφορους ρυθμούς του laser να διατηρήσουν τις σταθερές φάσεις. Το αποτέλεσμα αυτού του “κλειδώματος” είναι μέσα από αναιρετικές και ενισχυτικές συμβολές των κυμάτων να δημιουργήσουμε μικρής χρονικής διάρκειας και μεγάλης ισχύος παλμούς. Οι παλμοί αυτοί εξέρχονται με χρονική απόσταση:

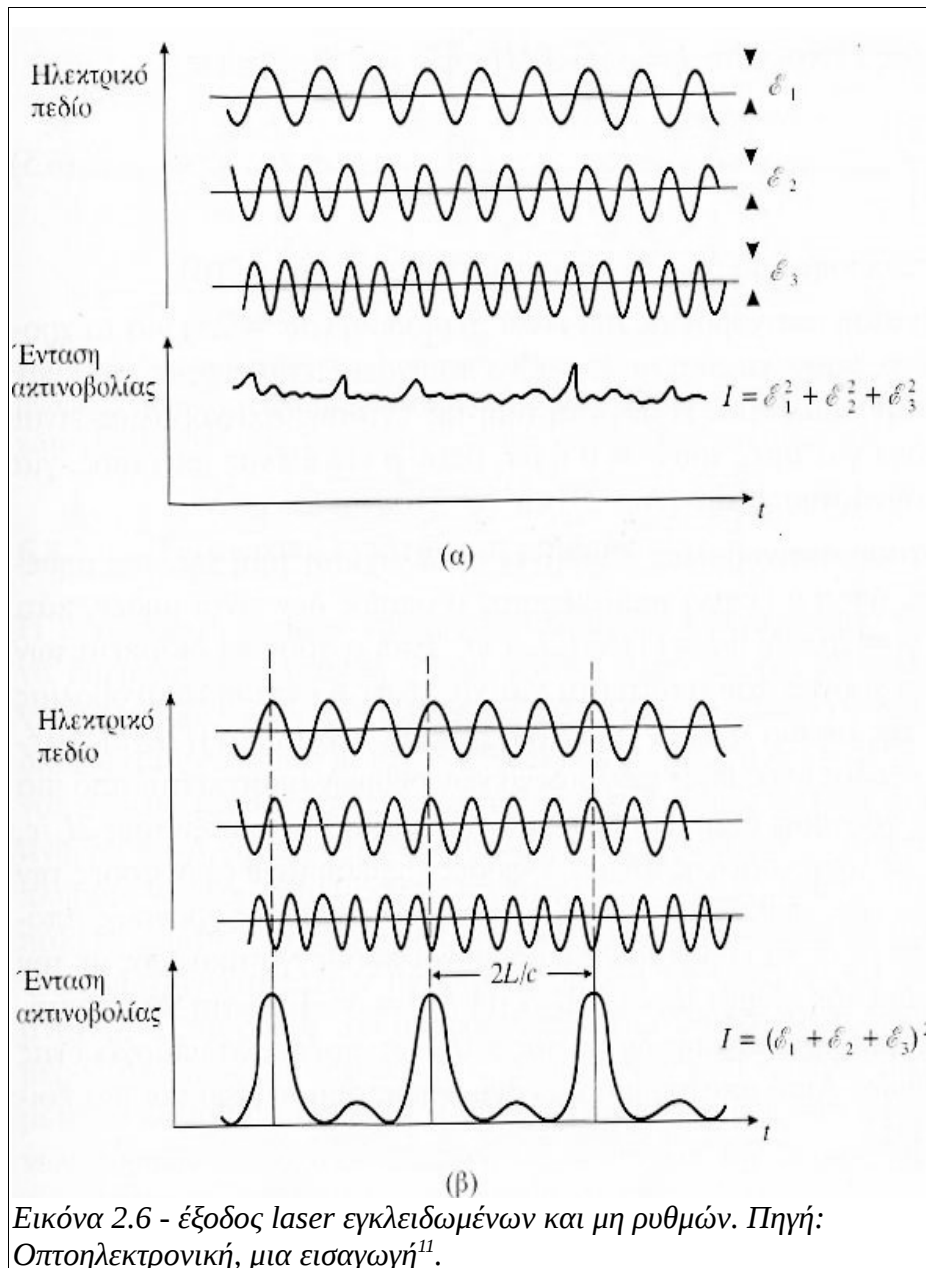
11 Για παραπάνω μελέτη βλέπε: J.Wilson, J.Hawkes, “Οπτοηλεκτρονική, μία εισαγωγή”. Επιστημονική επιμέλεια Α.Α. Σεραφετινίδης, Π.Ε.Ε.Μ.Π 2007 σελ. 209 - 215

$$t = \frac{2d}{c} \quad (2.9)$$

και χρονική διάρκεια:

$$t_{pulse} = \frac{1}{N} \frac{2d}{c} \quad (2.10)$$

όπου N ο αριθμός των ρυθμών ταλάντωσης του laser, c η ταχύτητα του φωτός και d το μήκος της κοιλότητας του laser.



2.6 Laser που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία.

2.6.1 Laser διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Το μήκος κύματος εκπομπής αυτών των laser είναι 10,6 μm, στην περιοχή του μακρινού υπέρυθρου. Σε συνεχή λειτουργία το laser CO₂ αποδίδει δέσμη ισχύος μερικών Watt έως και 25kW ή και μεγαλύτερη. Αποτελεί το πιο διαδεδομένο laser στη βιομηχανία. Ακόμα αποδίδει περισσότερη ενέργεια από άλλα είδη σε παλμική λειτουργία, γεγονός που του προσδίδει ένα ακόμα πλεονέκτημα. Το ενεργό μέσο του laser CO₂ είναι ένα μείγμα CO₂ (6% κατ'όγκο), Ne (12% κατ'όγκο) και He (82% κατ'όγκο). Όπως συμβαίνει στα περισσότερα laser αερίων, η άντληση πραγματοποιείται με ηλεκτρική εκκένωση. Αυτή η εκκένωση διεγείρει τα μόρια του N₂ που θα μεταφέρουν την ενέργειά τους στα άτομα του CO₂. Αυτού του είδους το laser μπορεί να λειτουργήσει και παλμικά, διακόπτοντας τη δέσμη, διανέμοντας τη διαθέσιμη ενέργεια με μια συχνότητα της τάξης του 1kHz.

2.6.2 Laser Nd:YAG.

Το μήκος κύματος εκπομπής των Laser Nd:YAG είναι 1,06μm, δηλαδή εκπέμπει στο κοντινό υπέρυθρο. Δίνει όμως και άλλα μήκη κύματος (αρμονικές) στα 532 nm, 355 nm, 266 nm. Το Νεοδύμιο (Nd) είναι ένα τρισθενές λανθανίδιο (σπάνια γαία). Το ιόν Nd⁺³ χρησιμοποιείται ως πρόσμιξη σε κρυστάλλους, από τους οποίους ο γνωστότερος είναι κρύσταλλος Υτρίου Αλουμινίου (Y₃Al₅O₁₂) απ' τα αρχικά του οποίου βγαίνει το YAG (Yttrium Aluminium Garnet). Η ατομική συγκέντρωση του Nd είναι γενικά μεταξύ 0,6 και 1,2%. Η ενεργειακή απόδοση αυτού του laser, που φτάνει το 3%, είναι η υψηλότερη όλων των laser στερεάς κατάστασης.

Τα laser Nd:YAG μπορούν να λειτουργήσουν τόσο συνεχώς όσο και παλμικά. Στη συνεχή λειτουργία, τα laser Nd:YAG αποδίδουν ισχύ μεταξύ 1 και 20 W στο βασικό ρυθμό ταλάντωσης και από 10 έως και 1200 W όταν υπάρχουν και εγκάρσιοι ρυθμοί ταλάντωσης. Στην παλμική λειτουργία αποδίδουν, στον Q-switched ρυθμό, παλμούς πολύ υψηλής ισχύος (~GW), των οποίων η χρονική διάρκεια είναι μερικών ns.

2.7 Αρχές λειτουργίας οργάνων μέτρησης.¹²

Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούμε συνοπτικά στις αρχές λειτουργίας των οργάνων μέτρησης της ενέργειας παλμού που εκπέμπεται από συστήματα laser. Στο κεφάλαιο 6 περιγράφονται τα συμπεράσματά μας και από μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε στα εργαστήρια της σχολής και θα παρουσιάσουμε τις βασικές αρχές των οργάνων που χρησιμοποιήσαμε. Αυτά είναι θερμικά ενεργόμετρα και η φωτοδίοδος PIN.

Σε γενικές γραμμές οι οπτικοί ανιχνευτές μπορούν να χωριστούν σε θερμικούς και φωτονικούς. Στους θερμικούς ανιχνευτές η απορρόφηση του φωτός αυξάνει την θερμοκρασία της συσκευής και αυτό με τη σειρά του έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή μιας παραμέτρου που εξαρτάται από την θερμοκρασία, στο δικό μας παράδειγμα την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η έξοδος του ανιχνευτή είναι ανάλογη του ποσού της ενέργειας που απορροφά ανά μονάδα χρόνου. Εάν ο συντελεστής απορρόφησης είναι ίδιος για όλα τα μήκη κύματος, η έξοδος είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος του φωτός. Οι φωτονικοί ανιχνευτές βασίζονται σε κβαντικά φαινόμενα όπως το φωτοηλεκτρικό. Διαδεδομένες φωτονικές διατάξεις αποτελούνται από διατάξεις ημιαγωγίων υλικών. Η έξοδος του ανιχνευτή ελέγχεται από την απορρόφηση των φωτονίων, τα οποία “καταμετρούνται” με διάφορες μεθόδους και όχι τόσο από την ενέργειά τους. Όλες οι φωτονικές διατάξεις απαιτούν μία ελάχιστη ενέργεια φωτονίου για να μπορέσουν να ενεργοποιηθούν. Δηλαδή έχουν ένα μέγιστο “μήκος κύματος αποκοπής” πάνω από το οποίο δεν μπορούν να λειτουργήσουν.

Η αποκρισιμότητα R ενός ανιχνευτή ορίζεται ως ο λόγος της εξόδου προς την είσοδο του ανιχνευτή. Τυπική μονάδα μέτρησης είναι το Volt ανά Watt (V/W). πολλές φορές χρησιμοποιούνται και οι μονάδες Ampere ανά Watt (A/W) και Lumen ανά Watt (l/W) όταν μετράμε ορατή ακτινοβολία. Η αποκρισιμότητα μεταβάλλεται με το μήκος κύματος και για κάθε όργανο συνήθως δίνεται ως μία καμπύλη του R με το μήκος κύματος.

Μία άλλη σημαντική παράμετρος ενός ανιχνευτή είναι η ευαισθησία του. Η

12 Α.Α.Σεραφετινίδης. “Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική”, Π.Ε.Ε.Μ.Π, Αθήνα 1990.

ικανότητα να μετρά ασθενή σήματα, δηλαδή. Η παράμετρος αυτή έχει να κάνει με την ύπαρξη θορύβου, δηλαδή έξοδο που δεν έχει σχέση με το σήμα αλλά με άλλους παράγοντες. Ο λόγος της έντασης εξόδου που οφείλεται στο σήμα ως προς τον θόρυβο πρέπει σε γενικές γραμμές να είναι μικρότερος του 1 για να έχουμε αποδεκτά αποτελέσματα. Μία ένδειξη του μεγέθους του ελάχιστου ανιχνεύσιμου σήματος (ή της ευαισθησίας) δίνεται από την ισοδύναμη ισχύ θορύβου (Noise Equivalent Power - NEP). Αυτή ορίζεται ως η ισχύς μιας ημιτονικά διαμορφωμένης μονοχρωματικής ακτινοβολίας που θα είχε το ίδιο αποτέλεσμα στο σήμα εξόδου, σε έναν ανιχνευτή ελεύθερο οποιουδήποτε θορύβου. Οι προδιαγραφές για την NEP πρέπει να δίνονται μαζί με τα χαρακτηριστικά του εύρους ζώνης (Δf) που ανιχνεύει η συσκευή, της θερμοκρασίας λειτουργίας και της επιφάνειας ανίχνευσης της συσκευής (A).

Μία πιο χρήσιμη παράμετρος είναι η μοναδιαία ,NEP, που ορίζεται ως:

$$NEP' = \frac{NEP}{\sqrt{A\Delta f}} \quad (2.11)$$

στην πραγματικότητα όμως χρησιμοποιούμε την ειδική ανιχνευτική ικανότητα (D') που ορίζεται ως το αντίστροφο της NEP':

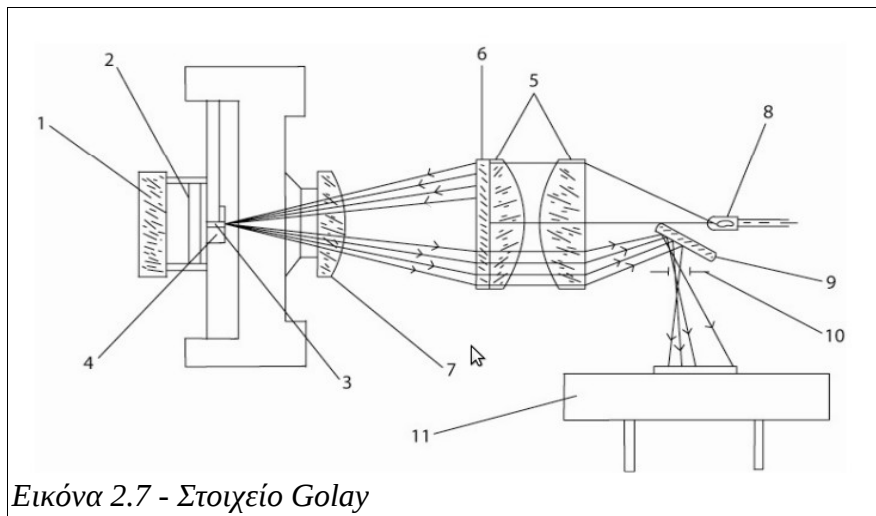
$$D' = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{NEP} \quad (2.12)$$

Η τιμή της D' για ένα συγκεκριμένο ανιχνευτή θα εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του σήματος. Οι καμπύλες που παρουσιάζουν την μεταβολή της D' σε σχέση με το μήκος κύματος δίνονται στην βιβλιογραφία και στα εγχειρίδια κάθε ανιχνευτή.

2.7.1 Θερμικοί ανιχνευτές – ενεργόμετρα.

Ο πιο διαδεδομένος από τους θερμικούς ανιχνευτές είναι το στοιχείο Golay. Αυτός ανήκει στην κατηγορία των αεριούχων ανιχνευτών. Σε αυτή την διάταξη όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7, η ακτινοβολία απορροφάται σε ένα θάλαμο αερίου (2) η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της πίεσης στο θάλαμο με αποτέλεσμα την αλλαγή της κυρτότητας ενός ελαστικού κατόπτρου (3). Η φωτεινή δέσμη που ξεκινάει από την πηγή (8) και περνάει μέσα από τα οπτικά μέσα

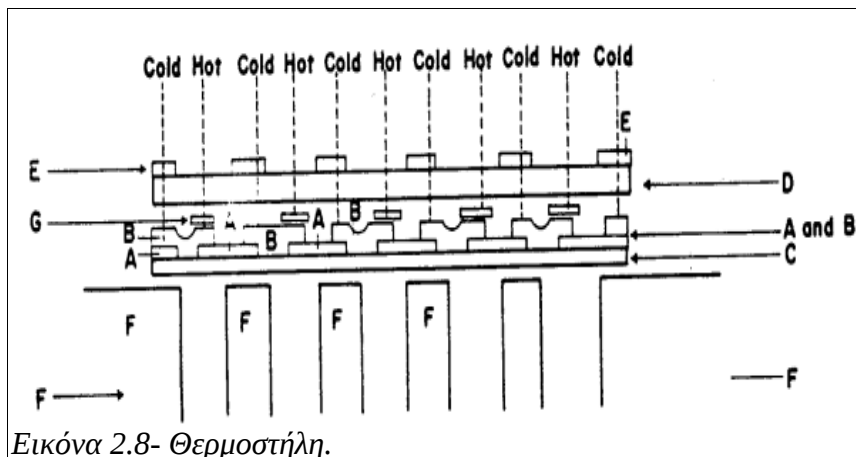
(5,6,7,9) ανακλάται και προσπίπτει στο φωτοστοιχείο (11). Μικρές αλλαγές στην κυρτότητα του κατόπτρου δημιουργούν μία έξοδο. Σήμερα στοιχεία Golay μπορούν



Εικόνα 2.7 - Στοιχείο Golay

να ανιχνεύσουν ακτινοβολία ισχύος μέχρι και 10^{-11} W.

Άλλοι ανιχνευτές, που ονομάζονται θερμοηλεκτρικοί, χρησιμοποιούν την αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους, όπου η θέρμανση μίας επαφής δύο διαφορετικών μετάλλων, σε σχέση με την άλλη, προκαλεί ροή ρεύματος μέσα στο κύκλωμα, η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο επαφών. Η μία επαφή χρησιμοποιείται για να ανιχνεύει την αύξηση της θερμοκρασίας (hot) ενώ η άλλη διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου (cold). Οι μεταβολές μετριοούνται με ένα



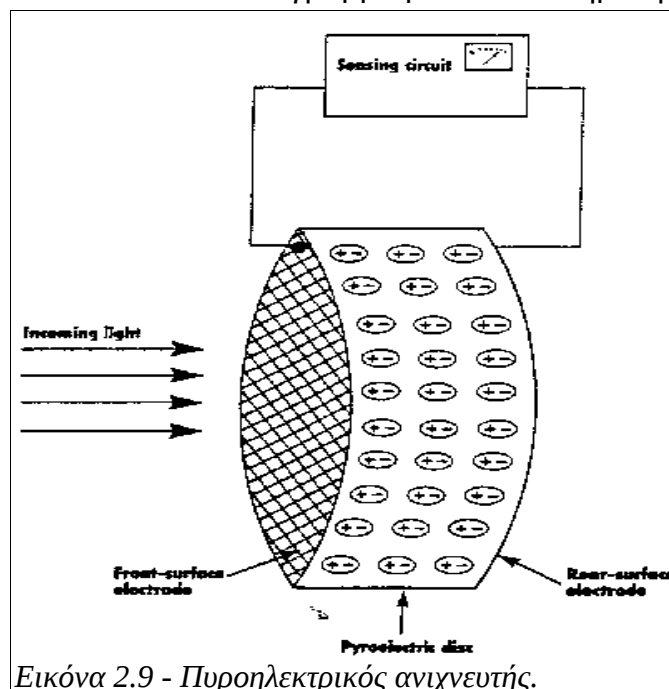
Εικόνα 2.8- Θερμοστήλη.

γαλβανόμετρο. Στην εικόνα 2.8 παρουσιάζεται μια συστοιχία θερμοηλεκτρικών ανιχνευτών, μία θερμοστήλη. Για αποδοτική λειτουργία απαιτούνται υλικά με μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα και μικρή θερμική. Αυτές οι δύο απαιτήσεις είναι ανταγωνιστικές για αυτό απαιτείται κάποιος συμβιβασμός.

Τα βολόμετρα, μια άλλη κατηγορία ανιχνευτών, χρησιμοποιούν την αλλαγή στην

ηλεκτρική αντίσταση, σε συνάρτηση με την θερμοκρασία για να ανιχνεύσουν την ακτινοβολία. Το σήμα προκύπτει από τις μεταβολές στην αντίσταση και άρα στην ένταση του ρεύματος ενός κυκλώματος τροφοδοτούμενου με σταθερή τάση. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος ανίχνευσης των αλλαγών στο κύκλωμα, γίνεται με την γέφυρα Wheatstone και ένα γαλβανόμετρο. Οι όποιες αλλαγές θερμοκρασίας που οφείλονται στη ροή του ρεύματος πρέπει να παίρνονται υπόψη.

Οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές αποτελούν τελευταία εξέλιξη και δίνουν καλούς χρόνους απόκρισης, είναι ανθεκτικοί αλλά υστερούν σε ευαισθησία. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία απορροφάται από ένα σιδηροηλεκτρικό υλικό το οποίο περιέχει μόρια με μόνιμη ηλεκτρική διπολική ροπή. Κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία τα δίπολα είναι ευθυγραμμισμένα και δημιουργούν μια καθαρή



ηλεκτρική πόλωση σε ένα άξονα. Πάνω στις επιφάνειες του στοιχείου έχουν εξαχνωθεί διάφανα ηλεκτρόδια. Όταν το υλικό θερμανθεί, η διαταραχή των διπόλων μειώνει την καθαρότητα της πόλωσης και επομένως μεταβάλλεται η ποσότητα του επιφανειακού φορτίου στα ηλεκτρόδια, προκαλώντας ροή ρεύματος.

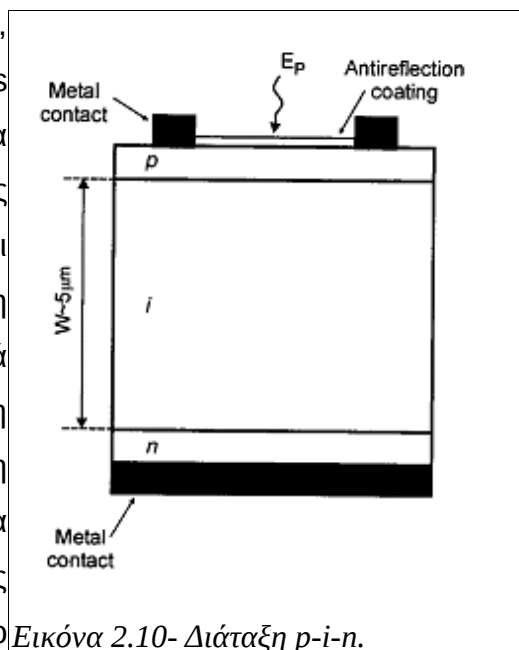
2.7.2. Φωτοδίοδος PIN.

Οι φωτοδιόδοι αποτελούν φωτονικές διατάξεις. Μια απλή δομή ημιαγωγίμων στοιχείων¹³ που μας δίνει μια καλή απόκριση στα μεγάλα μήκη κύματος είναι η δομή

13 Για παραπάνω μελέτη στις ημιαγωγίμες διατάξεις βλ. S.O. Kasap, "Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και

p-i-n που φαίνεται και στην εικόνα 2.10.

Η περιοχή i έχει υψηλή ειδική αντίσταση, ώστε να χρειάζονται μόνο λίγα volts αντίστροφης τάσης πόλωσης για να προκαλέσουν την επέκταση της ζώνης απογύμνωσης σε όλη την περιοχή n και έτσι παρέχουν μεγάλο ευαίσθητο όγκο. Στην πράξη η τάση πόλωσης διατηρείται σε μια σημαντικά υψηλότερη τάση, από την ελάχιστη τιμή, και η περιοχή i παραμένει τελείως απογυμνωμένη από φορείς ακόμα και για υψηλά επίπεδα φωτεινής ενέργειας. Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης είναι τότε πρακτικά ανεξάρτητο



Εικόνα 2.10- Διάταξη p-i-n.

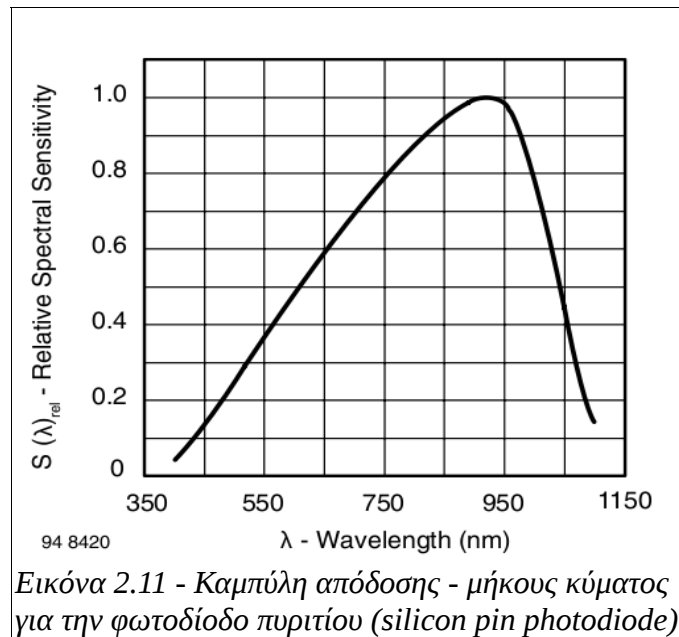
από την εφαρμοζόμενη τάση και έτσι είναι καλά διαχωρισμένο.

Για την αποτελεσματικότερη ανίχνευση των φωτονίων απαιτείται να απορροφούνται όσο το δυνατόν περισσότερα φωτόνια στην ενδογενή περιοχή. Αν το πάχος των περιοχών p και i είναι w_p και w_i αντίστοιχα και υποθέτοντας μια επιφανειακή ανακλαστικότητα R, τότε το ποσοστό F_i της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται στο στρώμα i είναι:

$$F_i = (1 - R)(e^{-\alpha w_p} - e^{-\alpha(w_p + w_i)}) \quad (2.13)$$

όπου α ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης του υλικού.

Εάν $w_i = 2\alpha^{-1}$, τότε περίπου το 86% της ακτινοβολίας που εισέρχεται στη διάταξη θα απορροφηθεί. Βεβαίως και θα υπάρξουν απώλειες ανάκλασης στην επιφάνεια. Αυτές μπορούν να μειωθούν με ενσωμάτωση αντανάκλαστικών επιφανειών. Οι φωτοδίοδοι πυριτίου μπορούν να πετύχουν αποδόσεις στο 80% στην περιοχή μήκους κύματος 800-900 nm. Εμείς χρησιμοποιήσαμε φωτοδίοδο PIN πυριτίου όπου η απόδοσή της ανάλογα με το μήκος κύματος φαίνεται στο σχήμα 2.11,



2.7.3. Photon drag detectors

Οι ανιχνευτές photon drag λειτουργούν στο υπέρυθρο, είναι γρήγοροι και αρκετά ευαίσθητοι, έτσι ώστε να μπορούν να καταγράψουν την χρονική εξέλιξη υψηλής ισχύος παλμών υπέρυθρου. Η λειτουργία τους βασίζεται στην εναλλαγή ορμής μεταξύ των φωτονίων του laser και των φορέων ενός ημιαγωγού.



Εικόνα 2.12 - Photon drag detector γερμανίου.

Οι photon drag ανιχνευτές ενώ δεν παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία (της τάξης του 10mV/kW), έχουν μεγάλα πλεονεκτήματα διότι λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου, δεν χρειάζονται εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και είναι πολύ γρήγοροι. Ο μόνος παράγοντας που περιορίζει την ταχύτητα αντίδρασής τους είναι ο χρόνος που χρειάζεται ο παλμός να διατρέξει το ενεργό μήκος του ημιαγωγού που είναι της τάξης του 0,1 ns.

Οι καταλληλότεροι για την ακτινοβολία laser CO₂ στά 10,6 μm είναι οι ανιχνευτές με ημιαγωγό υλικό γερμάνιο (Ge).

Κεφάλαιο 3 – Εφαρμογές των laser στην βιομηχανία.

3.1 Γενικά.

Τα laser χρησιμοποιούνται ευρέως πλέον για να υποστηρίξουν ένα μεγάλο αριθμό διαδικασιών επεξεργασίας υλικών όπως κοπή, διάτρηση, συγκόλληση και χάραξη μεγάλης ποικιλίας υλικών. Αυτή περιλαμβάνει σκληρά υλικά, για παράδειγμα διαμάντι, κεραμικά, μέταλλα, ξύλα, μαλακά και συμπιεσμένα υλικά. Στην ελληνική βιομηχανία και βιοτεχνία συναντάμε πιο συχνά μηχανήματα επεξεργασίας μετάλλων, ξύλου και plexiglass. Τα laser όχι μόνο έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, αλλά επίσης επιτρέπουν εργασίες (υψηλής ακρίβειας π.χ.) που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τις συμβατικές μεθόδους.

Τα πλεονεκτήματα αυτά, περιλαμβάνουν τα εξής:

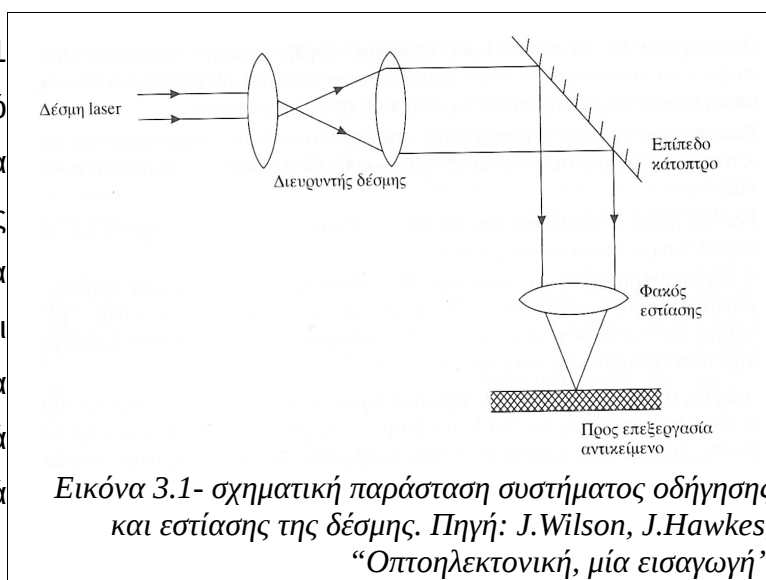
- I. Η ακτινοβολία laser είναι μία πολύ “καθαρή” μορφή ενέργειας, καθόσον δεν έρχονται σε επαφή ακάθαρτες προσμίξεις με το προς επεξεργασία αντικείμενο. Στην πράξη, η ατμόσφαιρα στο χώρο επεξεργασίας μπορεί να ελέγχεται ώστε να είναι κατάλληλη για μία συγκεκριμένη εργασία. Επιπλέον η ακτινοβολία κατευθύνεται μέσα από ένα παράθυρο σε ένα θάλαμο κενού προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη, χωρίς ανεπιθύμητα σωματίδια, επεξεργασία.
- II. Οι δέσμες laser, λόγω της υψηλής χωρικής συμφωνίας τους, μπορούν να εστιάσουν σε πολύ μικρή επιφάνεια. Έτσι αναπτύσσεται έντονη τοπική θέρμανση του προς επεξεργασία υλικού, με περιορισμένη επίδραση στις γύρω περιοχές.
- III. Είναι σχετικά εύκολος ο έλεγχος της έντασης ακτινοβολίας της δέσμης και ως εκ τούτου ο έλεγχος της ενέργειας που προσπίπτει στο σημείο εστίασης.
- IV. Η δέσμη μπορεί με ευκολία να κατευθυνθεί σε σχετικά δυσπρόσιτα σημεία και να οδηγηθεί γύρω από απότομες γωνίες.
- V. Το περισσότερο μέρος της ενέργειας της δέσμης εναποτίθεται πολύ κοντά

στην επιφάνεια του προς κατεργασία αντικειμένου, επιτρέποντας έτσι να γίνει κατεργασία σε μικρό βάθος χωρίς να επηρεαστεί απαραίτητα το σύνολο του όγκου του.

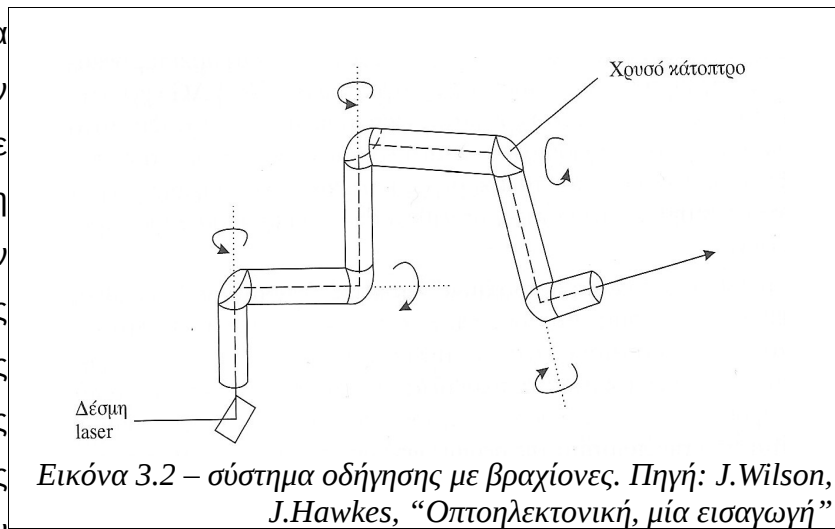
Τα δύο laser που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για επεξεργασία υλικών είναι τα CO₂ και Nd:YAG, των οποίων τις αρχές λειτουργίας είδαμε παραπάνω. Συγκρίνοντας τα δύο αυτά laser, τα πρώτα είναι πιο ευέλικτα και διατίθενται με μεγάλη ποικιλία ισχύος εξόδου, έως και αρκετές δεκάδες kW. Σε κάποιες εφαρμογές τα Nd:YAG laser έχουν πλεονέκτημα λόγω του μικρότερου μήκους κύματος εκπομπής τους. Επίσης για τον ίδιο αυτό λόγο, τα laser διεγερμένων διμερών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην επεξεργασία διατάξεων ημιαγωγών, όπου τα μικρότερα μπλε και υπεριώδη μήκη κύματος επιτρέπουν να αποκτηθούν, μέσω της φωτολιθογραφίας, μικρότερα χαρακτηριστικά των διατάξεων.

Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά της επεξεργασίας με laser είναι αυτό της διοχέτευσης της δέσμης στο προς επεξεργασία αντικείμενο. Η επιτυχία της λειτουργίας του μηχανήματος εξαρτάται συχνά από την ικανότητα ακριβώς της παροχής της δέσμης σε μία εστιασμένη κηλίδα πάνω στο προς επεξεργασία αντικείμενο. Με την σειρά του το μέγεθος της κηλίδας, το οποίο συχνά έχει κρίσιμη σημασία, εξαρτάται από την ποιότητα της δέσμης ως προς την χωρική κατανομή της ισχύος, την σταθερότητα και τον αριθμό των ταλαντούμενων ρυθμών.

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένα απλοϊκό αλλά βασικό σύστημα οδήγησης και εστίασης της δέσμης. Δεν είναι βέβαια πάντα δυνατό να τοποθετείται το αντικείμενο σε μία οριζόντια ή σε μία κατά κάποιον τρόπο καλά ορισμένη επιφάνεια.



Πράγματι, σε πολλές εφαρμογές η δέσμη πρέπει να οδηγηθεί είτε με αρθρωτούς βραχίονες (βλ. Εικόνα 3.2) είτε μέσω οπτικών ινών. Να τονίσουμε σε αυτό το σημείο, ότι η σωστή επιλογή των οπτικών μέσων και της διαδρομής της δέσμης περιέχει μεγάλο μέρος της προληπτικής ασφάλειας αυτών των μηχανημάτων



καθώς οι διαρροές ακτινοβολίας, οι μη επιθυμητές ανακλάσεις και διαθλάσεις, είναι συνηθισμένα φαινόμενα ακόμα και από απειροελάχιστες αστοχίες αυτών των διατάξεων. Συστήματα αρθρωτών βραχιόνων, στα laser CO₂ ειδικά, περιλαμβάνουν μία συλλογή κατόπτρων από χρυσό για ανακλάσεις μέχρι και μέσα από επτά συνδέσεις. Αν και αυτά τα συστήματα είναι ανθεκτικά σε φθορές, όταν χρησιμοποιούνται με laser υψηλής ισχύος υπάρχουν προφανείς περιορισμοί, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται η απόσταση μεταξύ του laser και του αντικειμένου, η ελαστικότητα του βραχίονα, η ακρίβεια εστίασης και η σημαντική επίδραση των οπτικών στοιχείων πάνω στην ποιότητα της δέσμης.

Τα περισσότερα συστήματα καθοδήγησης της δέσμης χρησιμοποιούν οπτικές ίνες. Ένας κυματοδηγός οπτικής ίνας αποτελείται από τον πυρήνα και το περίβλημα μικρότερου δείκτη διάθλασης. Ο πυρήνας έχει είτε ομοιόμορφο είτε κλιμακούμενο δείκτη διάθλασης. Ο δείκτης διάθλασης αλλάζει απότομα από n_1 σε n_2 στην οριακή επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος (βλ. Εικόνα 3.3). Εφόσον $n_2 < n_1$ η ίνα είναι ικανή να παγιδεύσει μία δέσμη φωτός λόγω ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μία ακτίνα θα οδηγηθεί μέσα από την ίνα μόνο αν η γωνία i είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας i_c . Αν η θ_m είναι η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης για την οποία θα υποστεί ολική εσωτερική ανάκλαση, βλέπουμε ότι

$$n_0 \sin \theta_m = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos i_c \quad (3.1)$$

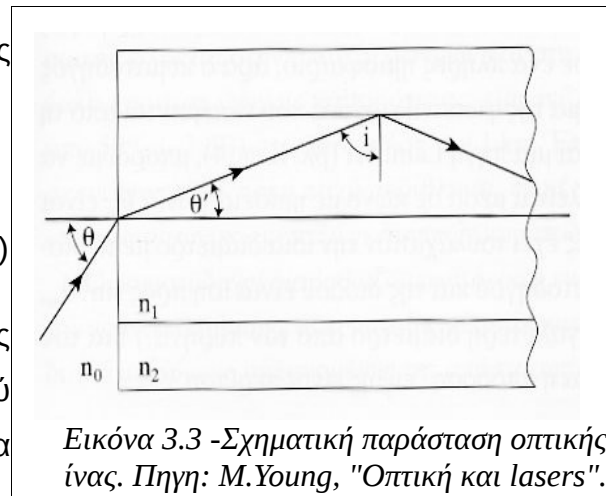
η κρίσιμη γωνία δίνεται από την σχέση

$$\sin i_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.2)$$

χρησιμοποιώντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις, βρίσκουμε ότι

$$NA = n_0 \sin \theta_m = (n_1^2 - n_2^2)^{(1/2)} \quad (3.3)$$

Η ποσότητα αυτή είναι γνωστή ως αριθμητικό άνοιγμα του κυματοδηγού και ορίζεται όπως το αριθμητικό άνοιγμα ενός αντικειμενικού φακού.



Σημαντικό ρόλο παίζουν τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε για τις οπτικές ίνες, ανάλογα με την συμπεριφορά τους στο μήκος κύματος της δέσμης που θέλουμε να οδηγήσουμε. Για παράδειγμα, οι οπτικές ίνες πυριτίου που χρησιμοποιούνται και στις τηλεπικοινωνίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε Nd:YAG αλλά όχι σε CO₂ lasers, όπου το μήκος κύματός στα 10,6μm απορροφάται ολοκληρωτικά. Αντιθέτως, τα γυαλιά των χαλκογενιδίων είναι αρκετά αποτελεσματικά για τα laser CO₂.

Εκτός από τη βελτιωμένη ελαστικότητα τους και την αύξηση της απόστασης μεταξύ laser και αντικειμένου προς επεξεργασία, η χρήση οπτικών ινών οδηγεί σε μία βελτίωση της ποιότητας της δέσμης οπότε και μια πιο αποδοτική επεξεργασία.

3.2 Οι μηχανισμοί συγκόλλησης, κοπής, χάραξης και διάτρησης με laser

Λεπτομερής θεωρητική ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ μίας δέσμης laser και της επιφάνειας ενός υλικού είναι πολύ δύσκολο να γίνει, και ξεφεύγει από τα όρια αυτής της εργασίας. Οι παράμετροι του υλικού που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι, μεταξύ άλλων, η ανακλαστικότητα της επιφάνειας, η θερμική αγωγιμότητα, η ειδική θερμική χωρητικότητα, οι λανθάνουσες θερμότητες τήξης και εξάτμισης, τα σημεία τήξης και βρασμού και η απορρόφηση της ακτινοβολίας του laser από τους ατμούς του υλικού. Παρόλα αυτά η θεωρία μας επιτρέπει να κάνουμε υπολογισμούς

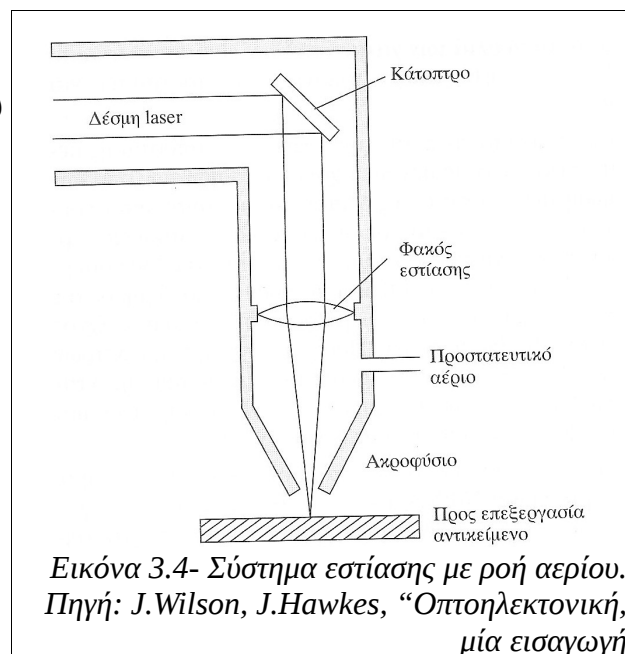
τάξης μεγέθους για την εκτίμηση ποσοτήτων, όπως η άνοδος της θερμοκρασίας και ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού για δεδομένες τιμές ισχύος εξόδου του laser. Οι υπολογισμοί πρέπει επίσης να λάβουν υπόψη αν το laser λειτουργεί σε CW ή παλμικό τρόπο, και σε περίπτωση παλμικού τρόπου την συχνότητα επαναληπτικότητας του παλμού.

3.2.1 Συγκόλληση.

Στην βασική διαδικασία συγκόλλησης, δύο μέταλλα, όμοια ή ανόμοια, τοποθετούνται σε επαφή και η γύρω περιοχή θερμαίνεται μέχρι τα υλικά να ρευστοποιηθούν και να συντηχθούν. Απαιτείται προσεκτικός έλεγχος για να διασφαλιστεί ότι παρέχεται αρκετή θερμότητα ώστε να τηχθεί επαρκής ποσότητα υλικού, αλλά όχι τόση ώστε να το εξατμίσει. Η εξάτμιση ενδεχομένως μπορεί να οδηγήσει σε αδύναμες, πορώδεις συγκολλήσεις. Ένα από τα προβλήματα είναι ότι η ανακλαστικότητα των περισσότερων μετάλλων μειώνεται δραματικά καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει το σημείο τήξης, απαιτώντας μεγαλύτερο έλεγχο της προσπίπτουσας ενέργειας.

Η συγκόλληση με laser έχει να συναγωνιστεί πολλές καλά καθιερωμένες τεχνικές, όπως η μαλακή κόλληση, η συγκόλληση τόξου, η συγκόλληση αντίστασης και η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Ωστόσο, η συγκόλληση με laser έχει αρκετά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται:

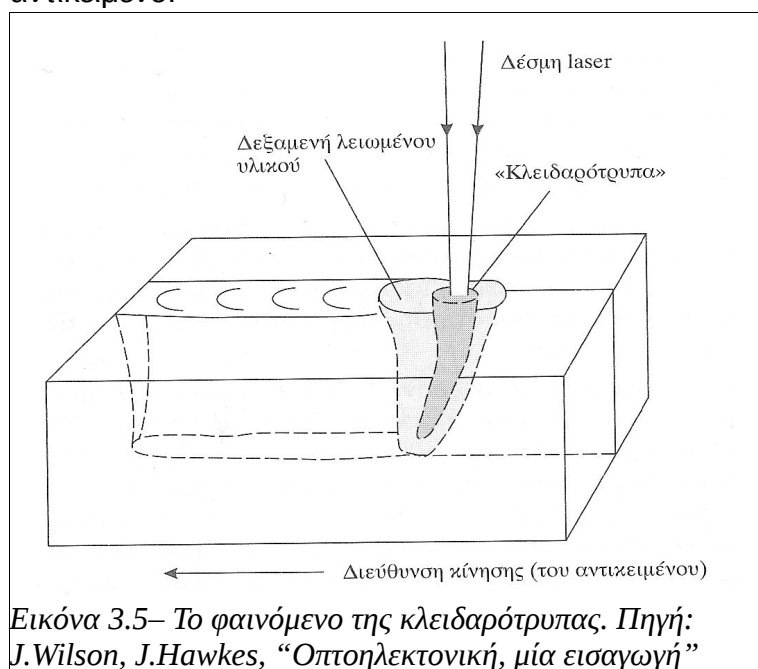
1. Ελάχιστη θερμότητα εισόδου, η οποία έχει ως αποτέλεσμα πολύ μικρή παραμόρφωση του προς κατεργασία αντικειμένου.
2. Η θέρμανση είναι εντοπισμένη και η ψύξη είναι γρήγορη, έτσι ώστε οι γειτονικές περιοχές δεν επηρεάζονται.
3. Δεν υπάρχει φυσική επαφή με άλλα εξωτερικά στοιχεία.
4. Ανόμοια υλικά μπορούν να



συγκολληθούν, πράγμα που είναι συχνά δύσκολο με άλλες τεχνικές.

5. Η διαδικασία μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί.
6. Μπορούμε να έχουμε γρηγορότερους ρυθμούς συγκόλλησης απ' ό,τι με άλλες τεχνικές.
7. Υψηλή ποιότητα του αποτελέσματος της διαδικασίας.

Η συγκόλληση γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας ένα αδρανές προστατευτικό αέριο, όπως το αργό ή το ήλιο, για να καλύψει την περιοχή συγκόλλησης ώστε να αποτρέψει την οξείδωση των μετάλλων, η οποία οδηγεί σε συγκόλληση κακής ποιότητας. Το αέριο βοηθά επίσης στην απομάκρυνση οποιουδήποτε ατμού του μετάλλου μπορεί να δημιουργηθεί και να εναποτεθεί στο φακό εστίασης. Οι ατμοί των μετάλλων μπορεί επίσης να είναι πολύ απορροφητικοί και σε μερικές περιπτώσεις ενδέχεται να εμποδίσουν την ακτινοβολία να φτάσει στο προς επεξεργασία αντικείμενο.



Και τα CW και τα παλμικά laser χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις. Συγκολλήσεις συνεχόμενης ραφής γίνονται σχεδόν αποκλειστικά από CW lasers , που λειτουργούν στα 500W ή και περισσότερο. Ενώ τα CW lasers παράγουν συνεχείς συγκολλήσεις, τα παλμικά παράγουν μία σειρά σημειακών συγκολλήσεων καθώς η δέσμη κινείται πάνω από το αντικείμενο. Η απόσταση μεταξύ των σημειακών συγκολλήσεων εξαρτάται βέβαια από την συχνότητα των παλμών και την

ταχύτητα σάρωσης. Με κατάλληλες ρυθμίσεις αυτών μπορούν οι παλμοί να αλληλοκαλύπτονται και να παράγουν μία ημισυνεχή συγκόλληση. Σε περιπτώσεις που απαιτείται μόνο ένα σημείο ή μικρός αριθμός σημείων είσαι σαφώς κατάλληλο ένα παλμικό laser. Συχνά χρησιμοποιούνται lasers Nd:YAG ή Nd: γυαλιού.

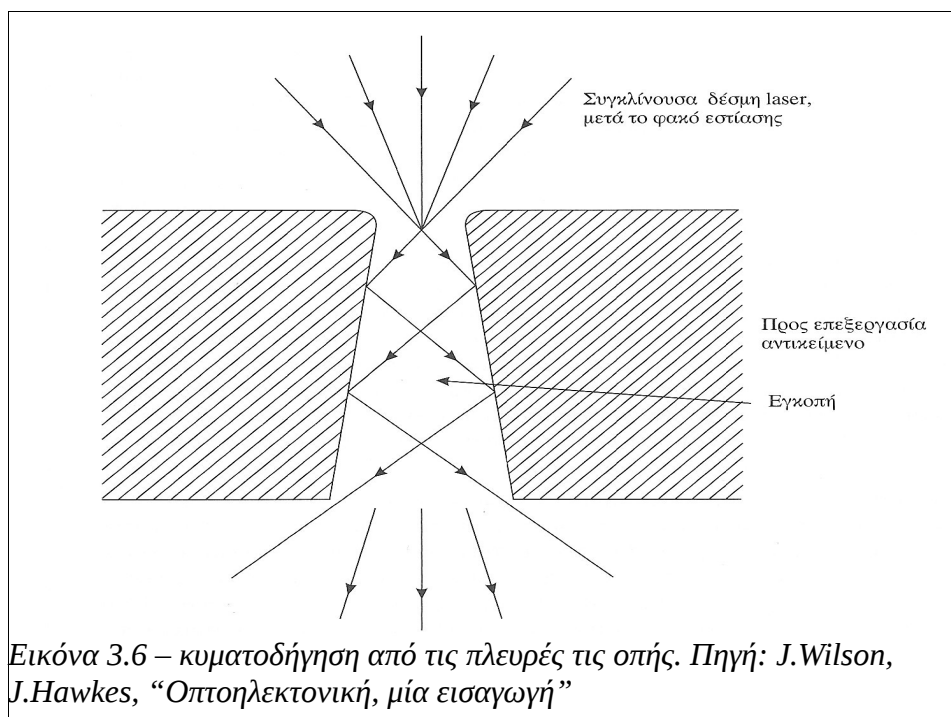
Όταν χρησιμοποιούμε lasers CO₂ πολλών kW ή παλμικά lasers υψηλής ενέργειας, η διαδικασία γίνεται πιο πολύπλοκη. Σε αυτές τις περιπτώσεις όταν η δέσμη χτυπά για πρώτη φορά την επιφάνεια, πιθανόν να εξατμιστεί μία σημαντική ποσότητα υλικού, σχηματίζοντας μία μικρή οπή, λεγόμενη “κλειδαρότρυπα” (Εικ. 3.5). Η ενέργεια του laser στη συνέχεια εισέρχεται μέσα σε αυτή την οπή, παγιδεύεται και μεταφέρεται βαθύτερα μέσα στο υλικό, απ’ ότι με οποιονδήποτε άλλο τρόπο. Το υλικό γύρω από την οπή λιώνει και γεμίζει την οπή, ενώ αργότερα στερεοποιείται για να σχηματίσει την ένωση, καθώς το laser σαρώνει την επαφή των δύο μετάλλων. Αν δεν ήταν αυτό το φαινόμενο, τα βάθη συγκόλλησης θα περιοριζόνταν περίπου στο 1 mm. Laser CO₂ υψηλής ισχύος χρησιμοποιούν αυτό το φαινόμενο διευκολύνοντας την κατασκευή μεγάλων διατάξεων.

3.2.2. Κοπή και χάραξη.

Η βιομηχανική κοπή με laser χρησιμοποιεί σχεδόν τα ίδια lasers που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση και τα πλεονεκτήματά της, συγκρινόμενη με τις κλασσικές τεχνικές, είναι όμοια με αυτά για τη συγκόλληση και ουσιαστικά ανεξάρτητα από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου laser. Στην κοπή, σκοπός είναι η γρηγορότερη εξάχνωση του υλικού για τη δημιουργία μιας ζώνης που επηρεάζεται από την θερμότητα όσο το δυνατό πιο μικρής. Η κοπή με laser είναι διαδικασία υποβοηθούμενη από ένα αέριο, το οποίο διώχνει υπό πίεση το λιωμένο υλικό από την περιοχή κοπής ή εγκοπής. Στην περίπτωση υλικών, όπως τα μέταλλα, χρησιμοποιείται συνήθως οξυγόνο. Αυτό ενισχύει τον ρυθμό και την ποιότητα των ακμών κοπής, οι οποίες φέρουν μία λεπτή επίστρωση οξειδίου. Σε πολλές περιπτώσεις, π.χ. εάν η μεταλλική ακμή στην συνέχεια συγκολληθεί, το στρώμα του οξειδίου είναι ανεπιθύμητο και πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα αδρανές αέριο. Παρομοίως, όταν πρόκειται να κοπούν μη μεταλλικά υλικά, όπως κεραμικά, ξύλο, χαρτί ή πλαστικό, είναι καλύτερο να αποφεύγεται η οξείδωση και χρησιμοποιείται και πάλι αδρανές αέριο.

Το ρεύμα αέρος, διοχετεύεται συνήθως ομαξονικά με την δέσμη laser και είναι σημαντικό να ελέγχονται η πίεση και ο ρυθμός ροής. Σε πολλές περιπτώσεις έχουν σχεδιαστεί, προσεκτικά διαμορφωμένα, ακροφύσια για την βελτιστοποίηση της διαδικασίας αυτής.

Χάλυβας πάχους μέχρι 5mm μπορεί εύκολα να κοπεί με laser CO₂ 500W και ακόμα μεγαλύτερου πάχους μπορεί να αντιμετωπιστεί με laser υψηλής ισχύος. Τα χείλη της τομής ή της εγκοπής στα σχετικά μεγάλου πάχους υλικά είναι αναπάντεχα λεία. Αυτό οφείλεται σε ένα φαινόμενο καθοδήγησης του φωτός (Εικ. 3.6), λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων της δέσμης από τις πλευρές της εγκοπής. Το μέγεθος της κωνικότητας της τομής μπορεί να ρυθμίζεται μέχρι κάποιου σημείου από την θέση της εστιακής απόστασης του φακού εστίασης. Στην κοπή μετάλλων είναι ορθότερο να εστιάζουμε πάνω στην επιφάνεια, ενώ στα μη μεταλλικά δοκίμια έχουμε καλύτερα αποτελέσματα όταν η εστία βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια, μέσα στο υλικό.



Τα συστήματα κοπής με laser είναι ελεγχόμενα από υπολογιστή ή ρομπότ. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κοπής μεταλλικού φύλλου γίνεται ο κατάλληλος έλεγχος, με ηλεκτρονικά μέσα, της κίνησης σε δύο άξονες. Όμως σε μία πιο πολύπλοκη κατεργασία μπορεί να απαιτηθεί έλεγχος με υπολογιστή σε

περισσότερους άξονες, με αυτόματη αναγνώριση εντοπισμού και έλεγχο με ανατροφοδότηση της εστιασμένης δέσμης. Η ευελιξία ενός τέτοιου συστήματος είναι από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της κοπής με laser. Όταν απαιτούνται πολλές διαφορετικές “αντιμετωπίσεις” ενός προς κατεργασία αντικειμένου, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο προγραμματισμό του συστήματος laser, χωρίς να απαιτείται συχνή αλλαγή εργαλείων. Αυτά τα πλεονεκτήματα οδήγησαν στην αυξημένη χρήση τέτοιων “πολυεργαλείων” laser στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η χάραξη ή το μαρκάρισμα είναι παρόμοια με την κοπή, αν και το βάθος της εγκοπής είναι πολύ μικρότερο. Στην χάραξη, δημιουργείται πρώτα μία γραμμή στην επιφάνεια για εξασθένιση του υλικού πριν την κοπή. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία ημιαγωγών. Παρομοίως το μαρκάρισμα βρίσκει πολλές εφαρμογές στην αποτύπωση γραμμάτων, αριθμών ή συμβόλων πάνω σε διάφορα υλικά.

3.2.3. Διάτρηση.

Η διάνοιξη οπών ή η διάτρηση ήταν μία από τις πρώτες βιομηχανικές χρήσεις των lasers, όταν το 1965 μια μήτρα από αδάμαντα διανοίχτηκε με ένα laser ρουβινίου, για εφελκυσμό συρμάτων, σε περίπου το ένα εκατοστό του χρόνου που χρειαζόταν με τα κλασσικά μέσα. Σήμερα τα lasers χρησιμοποιούνται για την διάτρηση μίας σειράς υλικών, για παράδειγμα χαρτιού, πλαστικών και λαστιχένιων θηλών για παιδικά μπουκάλια, ακροφυσίων για μεταλλικά δοχεία με πεπιεσμένα αέρια, κεραμικών και γυαλιών καθώς και για εξαρτήματα κραμάτων τιτανίου, που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια των στροβίλων. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι και εδώ τα ίδια όπως και για την συγκόλληση και για την κοπή. Είναι μία τεχνική με την οποία είναι δυνατόν να διανοιχθούν οπές με μεγάλη ακρίβεια επανάληψης, με πολύ γρήγορους ρυθμούς, συχνά σε υλικά που είναι δύσκολα να τα επεξεργαστούν με άλλους τρόπους.

Οι διαστάσεις των οπών περιγράφονται με το λόγο βάρους προς τη διάμετρο οπής και με την κωνικότητα, που είναι ο λόγος της διαμέτρου εισόδου προς την διάμετρο της οπής στη μέση της διαδρομής:

$$\text{κωνικότητα} = \frac{\delta_{\text{εισόδου}}}{\delta_{\text{μέσο}}} \quad (2.4)$$

Όπως και με την κοπή, οι πλευρές της οπής είναι λείες, λόγω των φαινομένων κυματοδηγησης στις πλευρές της οπής (βλ. Εικ. 3.6). Αυτό το φαινόμενο είναι εμφανέστερο σε υλικά όπως το γυαλί, όπου μπορεί να επιτευχθεί λόγος βάθους προς διάμετρο οπής ίσος με 25, ενώ για τα μέταλλα είναι σχεδόν 12.

Στις περισσότερες εργασίες διάτρησης, η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού είναι πάνω από το σημείο βρασμού. Με απλές σκέψεις προκύπτει ότι, για ένα δεδομένο ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στη επιφάνεια, όσο μικρότερη είναι η διάρκεια του παλμού τόσο το καλύτερο. Κατά την διάρκεια ενός μεγάλου παλμού, η θερμότητα έχει περισσότερο χρόνο ώστε να διαχυθεί μέσα στο υλικό, με αποτέλεσμα να θερμαίνεται ένα μεγαλύτερος όγκος υλικού σε μικρότερη θερμοκρασία. Άρα συμπεραίνουμε ότι παλμικά lasers προτιμούνται έναντι των CW. Για διάνοιξη οπής σε μέταλλα, το laser CO₂ έχει το πρόβλημα της χαμηλής αρχικής απορρόφησης ενέργειας και προτιμούνται τα lasers Nd:YAG. Για μη μεταλλικά υλικά, η κατάσταση είναι αντίστροφη.

3.3 Παραδείγματα μηχανημάτων laser.

Παραθέτουμε εδώ ένα δείγμα από ολοκληρωμένα συστήματα laser που διατίθενται στο εμπόριο και χρησιμοποιούνται για τις παραπάνω διεργασίες:



laser: CO₂

ανοικτού τύπου

ισχύς : 2 kW

χρήσεις: κοπή, διάτρηση.

Τριφασικό τροφοδοτικό στα 380V

laser: CO₂

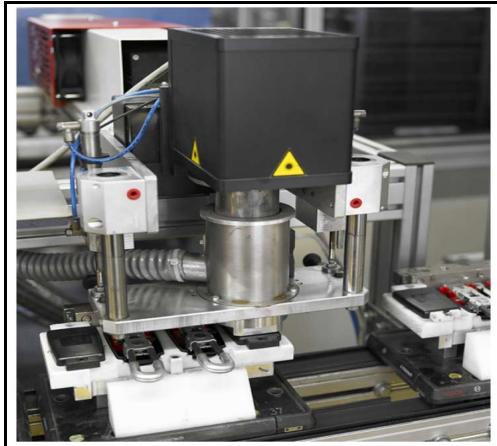
κλειστού τύπου

ισχύς : 1,8 kW

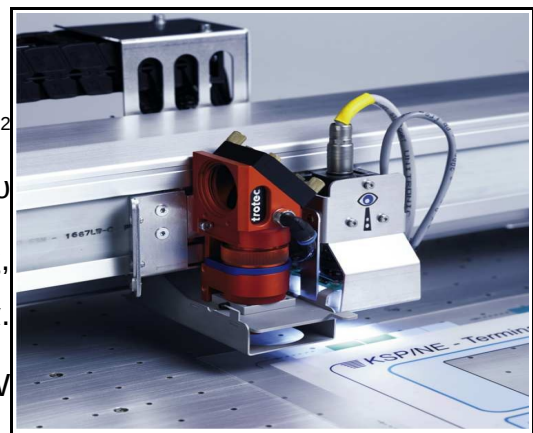
χρήσεις: κοπή, διάτρηση.

Τριφασικό τροφοδοτικό στα 380V

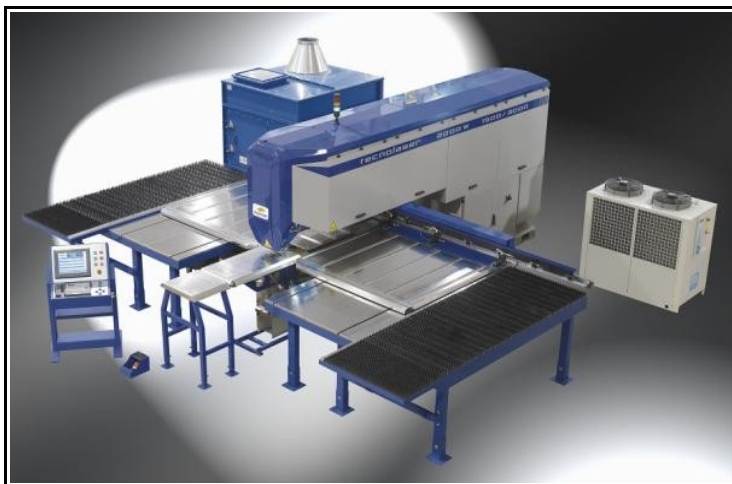




laser: Nd:YAG
ανοικτού τύπου
ισχύς: 30 – 200W
χρήση: μαρκάρισμα
τροφοδοτικό: 220V AC



laser CO₂
ανοικτού τύπου
χρήσεις: κοπή ξύλου, υφάσματος,
plexiglass, πλαστικών κ.α.
ισχύς: 200W



laser CO₂
ανοικτού τύπου
χρήσεις: κοπή ανοξείδωτου
χάλυβα και αλουμινίου
ισχύς: 1 – 4,5kW

Κεφάλαιο 4 – Κίνδυνοι από τις χρήσεις των lasers.

Οι κίνδυνοι που υπεισέρχονται από την λειτουργία μηχανημάτων που χρησιμοποιούν πηγές laser μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τους κινδύνους από την δέσμη της ακτινοβολίας και άλλους κινδύνους από παράγοντες όπως την υψηλή τάση, χημικούς παράγοντες κ.α.

4.1 Κίνδυνοι από την δέσμη laser

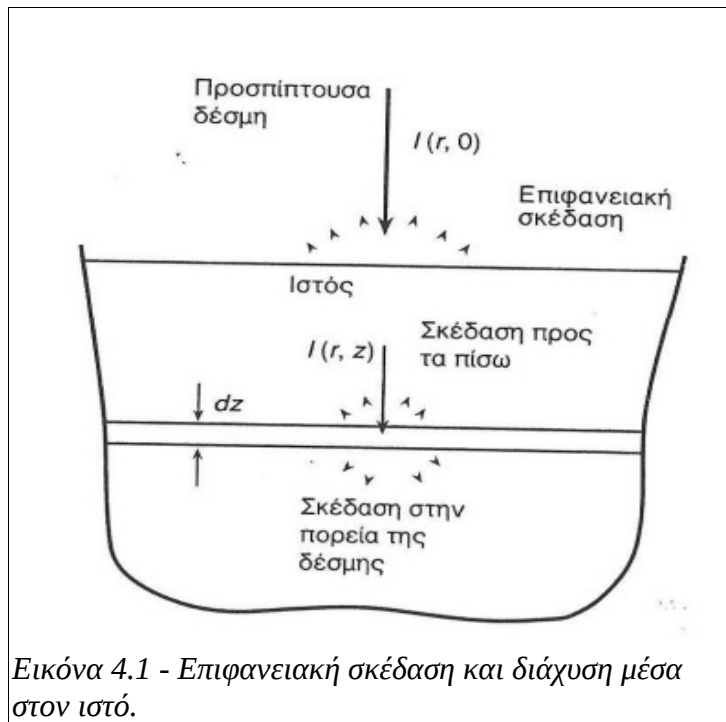
Πριν αναλύσουμε τις επιδράσεις στους ιστούς από την ακτινοβολία laser, ας ξεχωρίσουμε τους τρόπους έκθεσης σε αυτήν:

- Άμεση Έκθεση: τα μάτια ή το δέρμα εκτίθενται άμεσα στο σύνολο ή σε μέρος της δέσμης laser.
- Έκθεση από ανάκλαση: η έκθεση μετά από ανάκλαση σε κατοπτρικές επιφάνειες μπορεί να είναι τόσο επιζήμια όσο και η άμεση έκθεση, ιδίως όταν η επιφάνεια είναι επίπεδη με υψηλό συντελεστή ανάκλασης στο μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Καμπύλες επιφάνειες μπορούν να διευρύνουν το άνοιγμα της δέσμης. Ο ιστός δεν απορροφά την ίδια πυκνότητα ενέργειας, ωστόσο αυξάνεται η επιφάνεια έκθεσης.
- Έκθεση μετά από διάχυση. Επιφάνεια διάχυσης μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε ανακλά την δέσμη σε πολλές κατευθύνσεις, όπως για παράδειγμα τα μεταλλικά εργαλεία. Οι ανακλώμενες φέρουν μόνο ένα ποσοστό της ισχύος της δέσμης laser παρ' όλα αυτά παραμένουν επικίνδυνες ιδίως για laser υψηλής ισχύος. Διαρροές ακτινοβολίας τέτοιου είδους είναι οι πιο συνηθισμένες. Επίσης είναι δύσκολο να εντοπιστούν έγκαιρα.

Για να ανακλά μία επιφάνεια ή να διαχέει την ακτίνα φωτός, δεν παίζει ρόλο μόνο αν είναι λεία ή όχι αλλά και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, μία επιφάνεια που διαχέει το ορατό φως μπορεί να αποτελεί κάτοπτρο για το υπέρυθρο.

Όταν μία δέσμη laser προσπίπτει πάνω στον ιστό ένα μέρος της σκεδάζεται από την διαχωριστική επιφάνεια ιστού – αέρα. Ένα άλλο μέρος της διαχέεται μέσα στον

ιστό μέσω πολλαπλών σκεδάσεων των φωτονίων (βλ. Σχήμα 4.1) . Το ποσοστό που θα σκεδαστεί από την επιφάνεια και το ποσοστό που θα διαχυθεί και θα απορροφηθεί από τον ιστό εξαρτάται από την φύση του ιστού και το μήκος κύματος την ακτινοβολίας.



Οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τους ιστούς, καθώς και ο βαθμός του αποτελέσματος, ποικίλουν ανάλογα τον ιστό, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, την απόσταση πηγής – στόχου, την πυκνότητα ισχύος της δέσμης, τον χρόνο ακτινοβολήσης, τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες του ιστού κ.α. Οι κύριοι μηχανισμοί είναι ο φωτοθερμικός, ο φωτομηχανικός και ο φωτοχημικός.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε συνοπτικά στους μηχανισμούς φωτοβιολογικής δράσης, καθώς και στα δύο κύρια όργανα – πύλες εισόδου της ακτινοβολίας laser στο σώμα, τους οφθαλμούς και το δέρμα.

4.1.1 Θερμική αλληλεπίδραση.

Όταν η θερμοκρασία στον ιστό φτάσει τους 45° C, η δομή των βιομορίων του αλλάζει, δεδομένου πως οι δεσμοί υδρογόνου σπάνε. Έτσι, έχουμε μεταβολή των πρωτεϊνών, του κολλαγόνου, των λιπιδίων και της αιμοσφαιρίνης από τα οποία

αποτελούνται οι βιολογικοί ιστοί. Αρχικά, οι μεταβολές αυτές είναι αντιστρεπτές. Μετά όμως από περαιτέρω έκθεση στην ακτινοβολία γίνονται μη αντιστρεπτές. Οι παραπάνω μεταβολές αποτελούν το φαινόμενο της υπερθερμίας. Όταν η θερμοκρασία του σώματος φτάσει και ξεπεράσει τους 60° C, κάτι που συμβαίνει όταν περάσει ένα μικρό διάστημα από τη θέρμανση των μαλακών ιστών, ξεκινά η διαδικασία της πήξης. Μακροσκοπικά, η μόνη παρατηρούμενη αλλαγή είναι η λεύκανση της ακτινοβολημένης επιφάνειας. Στην ουσία, έχουμε βασικές αλλαγές στη δομή του ιστού που οδηγούν σε αυξημένη σκέδαση και πολλαπλές διαθλάσεις κι ανακλάσεις της ακτινοβολίας. Αποτέλεσμα της ανάκλασης όλων των ορατών μηκών κύματος του φωτός είναι η λεύκανση που παρατηρούμε σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Οι αλλαγές αυτές στη δομή που αναφέρθηκαν είναι η μεταβολή φάσης των πρωτεϊνών (μετουσίωση). Ο μοριακός τύπος της πρωτεΐνης γίνεται ασταθής και οι αλυσίδες της ξεδιπλώνονται. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει, βέβαια, η μετουσίωση του κολλαγόνου από το οποίο αποτελείται σε μεγάλο βαθμό το βασικό πλέγμα των συνδετικών ιστών του σώματος και των τοιχωμάτων των αιμοφόρων αγγείων. Η φυσιολογική δομή του είναι αυτή της τριπλής έλικας, που είναι τρεις μακρές, πολυπεπτιδικές πρωτεϊνικές αλυσίδες συνδεδεμένες μεταξύ τους. Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 60°C, η δομή της τριπλής έλικας καταστρέφεται και οι αλυσίδες παίρνουν τυχαίες θέσεις.

Εάν η θερμοκρασία φτάσει τους 100° C, πραγματοποιείται μια πιο δραματική αλλαγή φάσης που ονομάζεται ατμοποίηση. Δεδομένου πως θεωρείται ότι τα κύτταρα βρίσκονται κάτω από κανονικές συνθήκες πίεσης μιας ατμόσφαιρας, το νερό των κυττάρων αρχίζει να βράζει σε αυτή τη θερμοκρασία αφού οι ηλεκτρολύτες επηρεάζουν ελάχιστα το σημείο βρασμού. Με τη μεταβολή, λοιπόν, του υγρού νερού σε ατμό αυξάνεται ο όγκος των κυττάρων κατά χίλιες φορές και, προκειμένου ο ατμός να βρει τρόπο διαφυγής, γίνεται μια μορφή έκρηξης που καταστρέφει τα τοιχώματά τους. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργεί περισσότερους ατμούς στους 100° C.

Όταν όλο το νερό του κυττάρου εξαφανιστεί, το υπόλοιπο του κυττάρου ανεβάζει κι άλλο τη θερμοκρασία του πολύ γρήγορα μέχρι να φτάσει στους 300 με 400° C.

Τότε ο ιστός μαυρίζει κι απανθρακώνεται με παράλληλη παραγωγή ατμών και καπνού. Πάνω από τους 500° C, και με την παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου, ο ιστός καίγεται κι εξαχνώνεται.

Αξίζει να παρατηρηθεί πως η διάχυση της θερμότητας και συνεπώς η καταστροφή του ιστού περιορίζεται γενικά στο σημείο απορρόφησης της ακτινοβολίας, δεδομένου ότι η προώθηση του μετώπου θερμότητας έξω από την περιοχή της απορρόφησης περιορίζεται από το φαινόμενο της θερμικής δεξαμενής, αφού η αλλαγή φάσης λειτουργεί σαν τέτοια.

Το ποια διαδικασία από τις παραπάνω θα επικρατήσει σε κάθε περίπτωση εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τον τύπο του laser που χρησιμοποιείται.

Οι αλληλεπιδράσεις που περιγράψαμε παραπάνω αφορούν στην επιλεκτική ή στη γενική απορρόφηση ακτινοβολίας με αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας. Αντίθετα, η παραγωγή των μη θερμικών διαδικασιών περιορίζεται στις δέσμες υψηλής ισχύος και μικρής διάρκειας παλμών. Αν η διάρκεια παλμού καθώς και η διάμετρος της δέσμης είναι μικρή, ακόμα κι ένας παλμός χαμηλής ενέργειας θα δώσει μεγάλη πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας, της τάξης των 10^{16} W/m² για παλμό διάρκειας 100 ps. Σε τέτοιες πυκνότητες έχουμε τη δημιουργία πλάσματος.

4.1.2 Φωτομηχανική αλληλεπίδραση.

Το φωτομηχανικό φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της εκτόνωσης του ηλεκτρονικού πλάσματος που δημιουργείται από τον ιονισμό των ατόμων του ιστού κατά την απορρόφηση της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Οι ισχυρές εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται προκαλούν την ρήξη και τελικά την αποδόμηση του ιστού. Ένα ηλεκτρόνιο, που έχει παραχθεί μέσω πολυφωτονικού φαινομένου, κερδίζει ενέργεια με την απορρόφηση κβάντων κι όταν συσσωρεύσει αρκετή ενέργεια είναι ικανό να ιονίσει ένα άτομο μέσω σύγκρουσης κι έτσι θα έχουμε δυο ηλεκτρόνια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και τελικά έχουμε μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων που δημιουργεί την πυκνότητα πλάσματος. Άλλες αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν, όπως η διέγερση ατόμων με πολυφωτονική απορρόφηση ή οι συγκρούσεις ηλεκτρονίων, έχουν ως αποτέλεσμα τον εύκολο ιονισμό αυτών των διεγερμένων ατόμων. Το πλάσμα μετά τη δημιουργία του συνεχίζει να απορροφά ενέργεια από τη δέσμη, αν

συνεχίζει να ακτινοβολείται ο ιστός, γεγονός που οδηγεί στην ελάττωση της διαδιδόμενης ακτινοβολίας.

Η δημιουργία του πλάσματος ακολουθείται από ένα υδροδυναμικό κρουστικό κύμα, το οποίο μπορεί να σκίσει τον ιστό. Αποδεικνύεται πως η θερμική καταστροφή που προκαλείται περιορίζεται μόνο στη μηχανικά κατεστραμμένη περιοχή και δεν επεκτείνεται πέραν των ορίων της αλλοίωσης που δημιουργεί το laser. Η διαδικασία αυτή, η δημιουργία δηλαδή πλάσματος που οδηγεί σε υδροδυναμικό κρουστικό κύμα (shok wave) που αρχικά διαδίδεται με υπερηχητική ταχύτητα, είναι γνωστή ως φωτο-διηλεκτρική διάσπαση.

Κατά το φωτομηχανικό φαινόμενο μπορεί να έχουμε την πρόκληση μηχανικού κύματος και με φωτο-εκρηκτική εξάτμιση ή με θερμο-ελαστική διαδικασία. Κατά τη φωτο-εκρηκτική εξάτμιση η απορροφούμενη πυκνότητα ενέργειας της ακτινοβολίας laser ξεπερνά ένα κατώφλι που προσδιορίζεται από τις θερμικές ιδιότητες του ιστού. Η απομάκρυνση του υλικού από την επιφάνεια του ιστού, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ορμής, επάγει ανάκρουση που διαδίδεται σαν ακουστικό κύμα. Θερμο-ελαστική διαδικασία έχουμε όταν η φωτεινή ενέργεια laser απορροφάται από ορισμένη μάζα κι έτσι δημιουργείται βαθμίδα θερμοκρασίας λόγω της μετατροπής της σε θερμότητα. Αν η θερμότητα που αναπτύσσεται δεν ξεπερνά το κατώφλι εξάτμισης, καθώς τότε θα είχαμε αλλαγή φάσης, σύμφωνα με τα παραπάνω η βαθμίδα θερμοκρασίας οδηγεί σε ακουστικό κύμα.

4.1.3 Φωτοχημική αλληλεπίδραση.

Κατά το φωτοχημικό φαινόμενο έχουμε απορρόφηση ενός ή περισσότερων φωτονίων από τα μόρια του ιστού, την διέγερσή τους και την επακόλουθη φωτοβιοχημική αντίδραση που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή στη δομή και τις ιδιότητες του ιστού. Η φωτοχημική δράση διακρίνεται στη μονοφωτονική και την πολυφωτονική διέγερση του στόχου. Η πρώτη περίπτωση αφορά στην απορρόφηση ενός φωτονίου ενέργειας ίσης ή μεγαλύτερης από το ενεργειακό χάσμα του υλικού που προκαλεί τη διέγερση των ηλεκτρονίων και έχει σαν αποτέλεσμα την άμεση διάσπαση των χημικών δεσμών και τη φωτοχημική μετατροπή του υλικού. Αντίθετα, η πολυφωτονική απορρόφηση μπορεί να οδηγήσει στην έμμεση διάσπαση των χημικών δεσμών του υλικού, με την προϋπόθεση η

συνολική ενέργεια απορρόφησης να γίνει ικανή ώστε να ξεπεράσει το φράγμα δυναμικού του υλικού.

4.1.4 Αποδόμηση βιολογικών ιστών από την ακτινοβολία laser.

Παράλληλα με τη γνώση των άμεσων συνεπειών που έχει η ακτινοβολία ενός ιστού με laser, είναι εξίσου σημαντικό να γνωρίζουμε την τύχη του ιστού που καταστρέφεται. Μετά από πολλές μελέτες και πειράματα, η εμπειρία μας έχει δείξει πως ο ιστός που έχει ακτινοβοληθεί έντονα και για μεγάλη χρονική διάρκεια μετατρέπεται σε νεκρωμένο ιστό και απορρίπτεται, ενώ ένας ιστός ο οποίος έχει καταστραφεί λιγότερο διατηρεί αρκετή συνοχή ώστε να ακολουθήσουν φλεγμονώδεις αντιδράσεις και να προχωρήσει σε ίνωση.

Ίνωση αποκαλείται ο σχηματισμός ή η εξέλιξη ενός υπερβολικά ινώδους συνδετικού ιστού σε ένα όργανο ή ιστό σαν διορθωτική διαδικασία ως αντίδραση στο σχηματισμό ενός ινώδους ιστού που αποτελεί φυσιολογικό συστατικό του οργάνου ή του ιστού.

Όπως φάνηκε από τα προηγούμενα, η αποδόμηση των ιστών κατά τη διάρκεια του φωτοθερμικού φαινομένου είναι αποτέλεσμα μιας μορφής εκρήξεων του θερμαινόμενου νερού. Η πίεση που ασκείται στο εσωτερικό του ιστού προκειμένου να εκτονωθεί ο ατμός που δημιουργείται ξεπερνά τις μηχανικές δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για τη συνοχή και τελικά οι ίνες του σκίζονται και ο ιστός αποδομείται.

Οι επιπτώσεις διαφέρουν ανάλογα και το είδος του laser. Η έκθεση σε παλμικό laser επιτρέπει την ψύξη των ιστών στα διαστήματα ανάμεσα στους παλμούς κι έτσι ελαττώνεται η βλάβη που θα μπορούσε να προκληθεί στους παρακείμενους ιστούς, αφού η θερμική καταστροφή είναι συνάρτηση του χρόνου έκθεσης του ιστού στην ακτινοβολία.

Συγκεκριμένα, εξισώνοντας το μήκος της θερμικής διάχυσης που δίνεται από τη σχέση:

$$l^2 = 4Kt \quad (4.1)$$

με το οπτικό μήκος διείσδυσης :

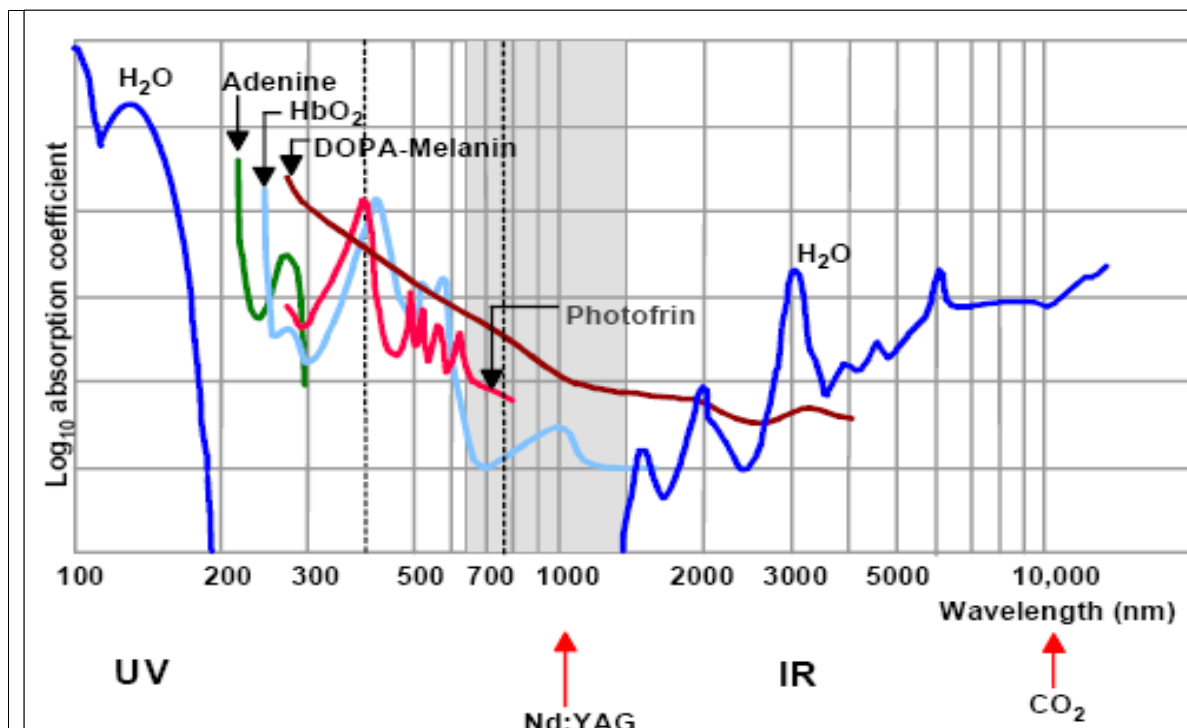
$$L = \frac{1}{\alpha} \quad (4.2)$$

προκύπτει ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης της ακτινοβολίας. Στην προηγούμενη σχέση, K είναι ο συντελεστής της θερμικής διάχυσης του ιστού, που είναι ανάλογος της θερμικής διάχυσης και t ο χρόνος έκθεσης στην ακτινοβολία, ενώ όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας. Τότε, ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης του ιστού είναι:

$$\tau_R = \frac{L^2}{4K} \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση που ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης είναι μικρότερος από τη διάρκεια του παλμού, τότε η θερμότητα παγιδεύεται στον όγκο που ορίζεται από την ακτινοβολημένη επιφάνεια και το οπτικό μήκος διείσδυσης της ακτινοβολίας κι άρα η θερμική καταστροφή περιορίζεται σε αυτήν την περιοχή.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως η έκθεση σε ακτινοβολία laser ενός ιστού με μεγάλο συντελεστή απορρόφησης για δεδομένο μήκος κύματος, έχει ως αποτέλεσμα να μικραίνει ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης του νερού, γεγονός που ναι μεν επιταχύνει τη διαδικασία της αποδόμησης αλλά ελαχιστοποιεί τη βλάβη στους παρακείμενους ιστούς. Οι σκληροί ιστοί του ανθρώπινου σώματος αποτελούνται κατά 30% από νερό, ενώ για τους μαλακούς βιολογικούς ιστούς το



Εικόνα 4.2 - Διάγραμμα συντελεστή απορρόφησης από χρωμοφόρα (νερό, αδενίνη, αιμοσφαιρίνη, μελανίνη) συναρτήσει του μήκους κύματος. Διακεκομμένες : ορατό, Γκρι : οπτικό παράθυρο δέρματος.

ποσοστό ανεβαίνει στο 70%. Η περιεκτικότητα του ιστού σε νερό καθορίζει τις οπτικές και τις θερμικές ιδιότητές του. Συγκεκριμένα για τις οπτικές ιδιότητες ισχύει η σχέση:

$$\alpha_{\text{ιστού}} = \alpha_{\text{νερού}} \cdot \chi \quad (4.4)$$

όπου χ το ποσοστό επί τις εκατό που καταλαμβάνει το νερό στον ιστό. Ανάλογη σχέση ισχύει και για τις θερμικές ιδιότητες. Εκτός, βέβαια, από το νερό, η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται κι από το φάσμα απορρόφησης ορισμένων χρωμοφόρων μορίων-συστατικών του ιστού-στόχου, όσο κι από τη συγκέντρωσή τους. Για παράδειγμα, η ορατή ακτινοβολία απορροφάται έντονα από την αιμοσφαιρίνη, τη μελανίνη κι άλλα χρωμοφόρα συστατικά. Οι πρωτεΐνες απορροφούν έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ στο διάστημα 700nm με 900 nm παρατηρείται ελάχιστη απορρόφηση και μέγιστο βάθος διείσδυσης στους ιστούς («οπτικό παράθυρο»). Για την υπέρυθη ακτινοβολία, έχουμε απορρόφησή της από το νερό, τον υδροξυαπατίτη και το κολλαγόνο. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται το φάσμα της απορρόφησης των πρωτεϊνών, των βιομορίων όπως η μελανίνη και η αιμοσφαιρίνη και του νερού συναρτήσει του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, καθώς και το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπουν δύο από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πηγές laser.

4.2 Δομή και απορρόφηση οφθαλμού.¹⁴

Ο οφθαλμικός βολβός αποτελεί κοιλότητα σφαιροειδούς σχήματος και διαμέτρου περίπου 24mm. Το τοίχωμά του αποτελείται από τρεις χιτώνες, τον ινώδη, τον αγγειώδη και τον αμφιβληστροειδή.

Ο ινώδης χιτώνας προς τα εμπρός είναι διαφανής και ονομάζεται κερατοειδής, ενώ προς τα πίσω είναι αδιαφανής και λέγεται σκληρός χιτώνας. Ο κερατοειδής χιτώνας έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αποτελεί το “τζάμι” του ματιού και κάθε βλάβη του έχει σαν αποτέλεσμα την θόλωση της όρασης. Ο κερατοειδής αποτελεί το ισχυρότερο διαθλαστικό μέσο του ματιού και προσφέρει περίπου τα δύο τρίτα της συνολικής διαθλαστικής ισχύος του ματιού. Η μεγάλη διαθλαστική ισχύς του

14 “Εισαγωγή στη Οφθαλμολογία”, Μ.Ν. Μόσχος, Ιατρικές εκδόσεις Ζήτα.

κερατοειδούς οφείλεται στην μεγάλη κυρτότητά του και στο γεγονός ότι η πρόσθια επιφάνειά του χωρίζει δύο οπτικά μέσα με μεγάλη διαφορά στον δείκτη διάθλασης, τον αέρα από την ίδια ουσία του κερατοειδούς.

Ο αγγειώδης χιτώνας αποτελείται από την ίριδα, το ακτινωτό σώμα και το χοριοειδή χιτώνα. Η ίριδα χωρίζει τον πρόσθιο από τον οπίσθιο θάλαμο του ματιού και στο μέσο της υπάρχει μία οπή, η κόρη.

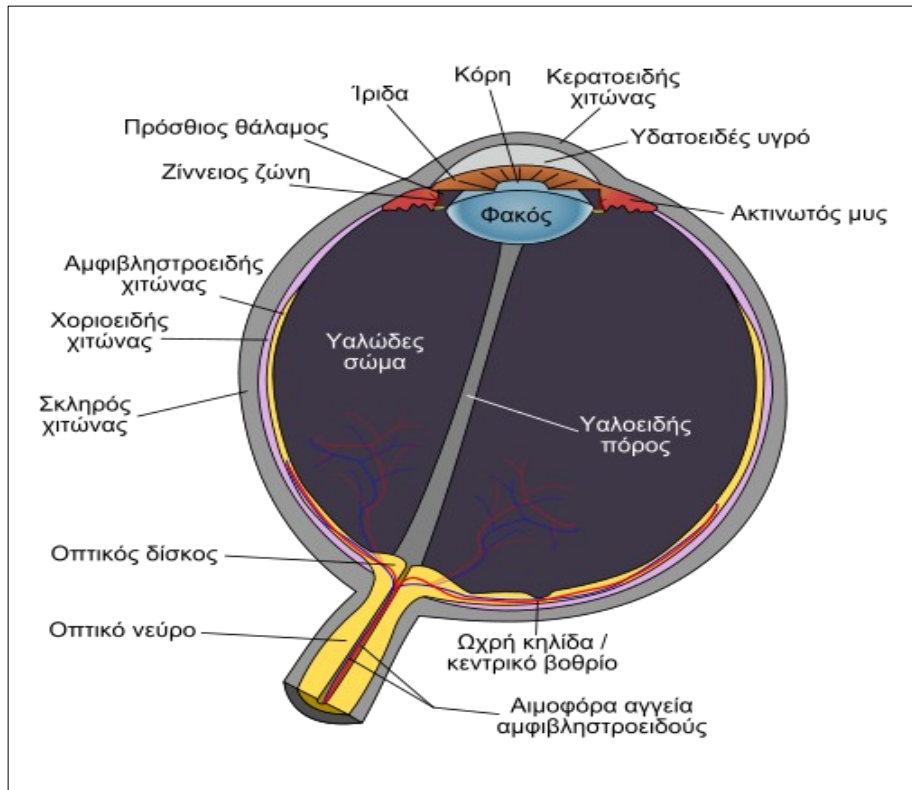
Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας αποτελεί τον αισθητηριακό χιτώνα του ματιού, διότι σε αυτόν βρίσκονται οι φωτοϋποδοχείς. Αποτελείται από το μελάγχρουν επιθήλιο προς τα έξω και τον ιδίως αμφιβληστροειδή προς τα μέσα, προς το υαλώδες σώμα.

Μέσα στον οφθαλμικό βολβό υπάρχει ο φακός, το υαλώδες σώμα και το υδατοειδές υγρό.

Ο φακός του ματιού είναι διαφανής αμφίκυρτος και εύπλαστος. Σκοπός του είναι να συγκεντρώνει τις οπτικές ακτίνες στον αμφιβληστροειδή, ανεξάρτητα αν προέρχονται από μακρινό ή κοντινό αντικείμενο. Η δυνατότητα αυτή προσαρμογής του φακού στην κοντινή όραση είναι αποτέλεσμα της ευπλαστότητάς του και της ικανότητας που έχει να μεταβάλλει την ακτίνα καμπυλότητάς του. Ο φακός μέσα στο μάτι έχει πολύ μεγαλύτερη εστιακή απόσταση από αυτή που θα είχε στον αέρα. Αυτό συμβαίνει γιατί ο φακός περιβάλλεται από οπτικά μέσα (υδατοειδές υγρό, υαλώδες σώμα) που δεν έχουν μεγάλες διαφορές στον δείκτη διάθλασης.

Το υαλώδες σώμα ή υαλοειδές αποτελεί μία πηκτώδη διαφανή μάζα που γεμίζει την κοιλότητα του ματιού πίσω από το φακό, αποτελείται από δίκτυο κολλαγόνων ινών και τα διάκενα τους πληρούνται από υαλουρονικό οξύ.

Στην εικόνα 4.3 φαίνονται σχηματικά τα διάφορα μέρη του οφθαλμού.



Εικόνα 4.3. Σχηματική παράσταση εγκάρσιας τομής του ματιού.

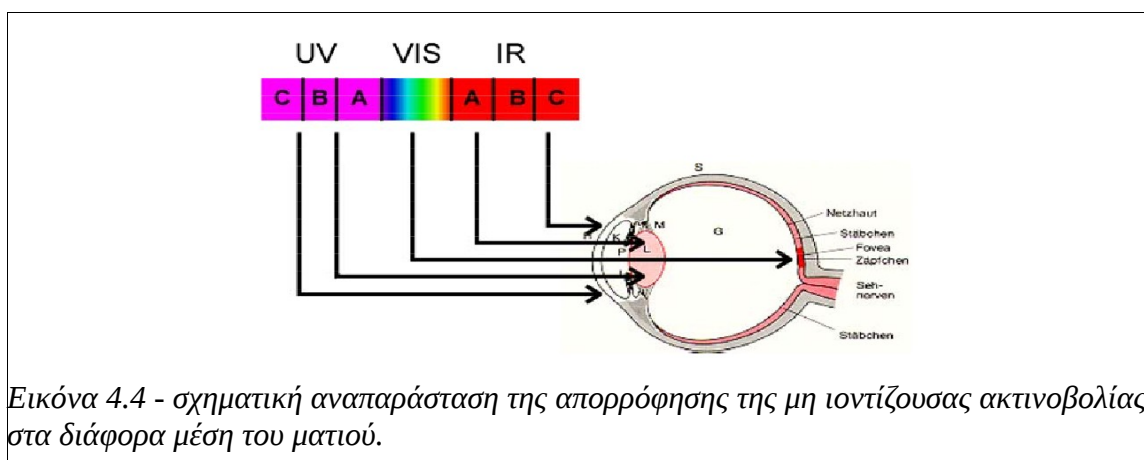
Το υδατοειδές υγρό παράγεται από το ακτινωτό σώμα και γεμίζει το χώρο του ματιού που βρίσκεται μεταξύ του φακού και του κερατοειδούς. Βρίσκεται σε διαρκή κυκλοφορία. Διέρχεται μέσω της κόρης από τον οπίσθιο στον πρόσθιο θάλαμο, από όπου και επάγεται μέσω της γωνίας του πρόσθιου θαλάμου. Συμμετέχει στην διατροφή του φακού και του κερατοειδούς.

Μία δέσμη φωτεινών ακτίνων που προσπίπτει στο μάτι εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή, αφού περάσει μέσα από τον κερατοειδή, το υδατοειδές υγρό, το φακό και το υαλώδες σώμα. Τα διαθλαστικά στοιχεία του ματιού, τα στοιχεία δηλαδή που θα δώσουν στην δέσμη την απαιτούμενη σύγκλιση για να εστιαστεί στον αμφιβληστροειδή, είναι ο κερατοειδής και ο φακός. Η συνολική διαθλαστική ισχύς του ματιού, η ισχύς δηλαδή του οπτικού συστήματος κερατοειδής- φακός είναι περίπου +60 D. Η διαθλαστική ισχύς ορίζεται ως το αντίστροφο της εστιακής απόστασης (σε μέτρα) και εκφράζεται σε διοπτρίες, D.

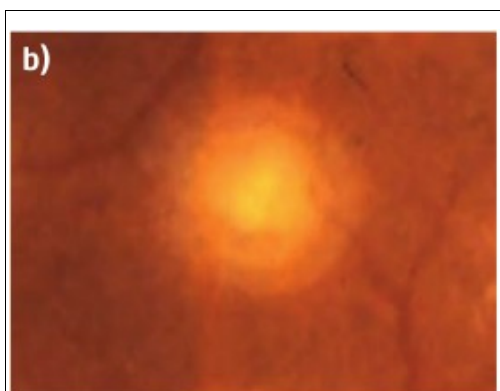
Η ακτινοβολία έχει την μεγαλύτερή της επίδραση στις περιοχές στις οποίες απορροφάται έντονα. Το πόσο βαθιά και πού θα επιδράσει περισσότερο εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η

διείσδυση συναρτήσει του τύπου της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

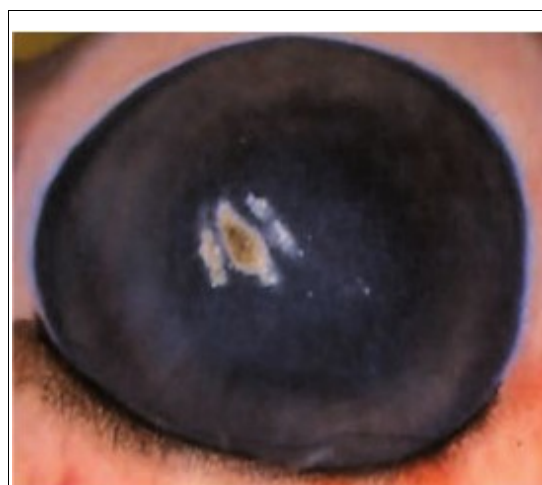
Τύπος ακτινοβολίας	Διείσδυση
Υπεριώδες C και B	Κερατοειδής
Υπεριώδες B και A	Φακός
Ορατό	Αμφιβληστροειδής
Υπέρυθρο A	Αμφιβληστροειδής, υαλώδες σώμα, Φακός
Υπέρυθρο B και C	Κερατοειδής



Οι διαχωριστικές γραμμές δεν είναι και τόσο αυστηρές. Μια πιο ακριβής εκτίμηση μπορεί να δοθεί εξετάζοντας πόσο εύκολα το κάθε μήκος κύματος διασχίζει τα διάφορα συστατικά μέρη του ματιού. Επίσης εξαρτάται και από την ηλικία καθώς σε νεαρή ηλικία το πρόσθιο τμήμα του ματιού είναι πιο διαφανές από ότι σε μεγαλύτερη.



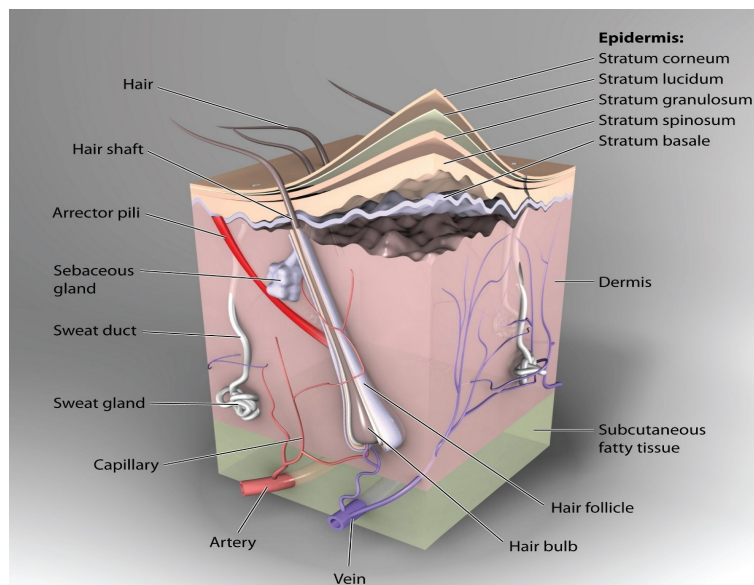
Εικόνα 4.5 - Έγκαυμα του αμφιβληστροειδούς από laser ορατής ακτινοβολίας



Εικόνα 4.6 - Φωτοκερατίτιδα από laser CO₂

4.3 Δομή και απορρόφηση δέρματος.¹⁵

Το δέρμα είναι το μεγαλύτερο όργανο του σώματος με μέση επιφάνεια περίπου 2m² και βάρος 4 kg. Το δέρμα έχει δύο στιβάδες. Την επιδερμίδα, η οποία είναι εξωτερική, και το χόριο ή δερμίδα το οποίο αποτελεί την εσωτερική στιβάδα. Κάτω από το χόριο υπάρχει χαλαρός συνδετικός ιστός, το υπόδερμα, το οποίο περιέχει άφθονο λίπος. Το δέρμα επίσης περιέχει και τα εξαρτήματά του, το οποία είναι οι αδένες, οι τρίχες και τα νύχια.



Εικόνα 4.7 -τριδιάστατη απεικόνιση των στρωμάτων του δέρματος, όπου διακρίνονται τα 2 κύρια μέρη επιδερμίδα και χόριο ή δερμίδα. Πηγή : wikipedia.org

Στην επιδερμίδα βρίσκονται τα κύτταρα της κερατίνης, τα οποία προσδίδουν στο δέρμα την αδιαπερατότητά του, τα μελανοκύτταρα, τα οποία παράγουν την μελανίνη κ.α. Το χόριο αποτελείται από ίνες κολλαγόνου, ελαστικές ίνες και δικτυωτές ίνες. Οι πρώτες είναι υπεύθυνες για την δομική υποστήριξη του δέρματος, και στα βαθύτερα στρώματα του χόριου γίνονται παχύτερες και τραχύτερες (δικτυωτές), ενώ οι δεύτερες είναι υπεύθυνες για την ελαστικότητα του δέρματος.

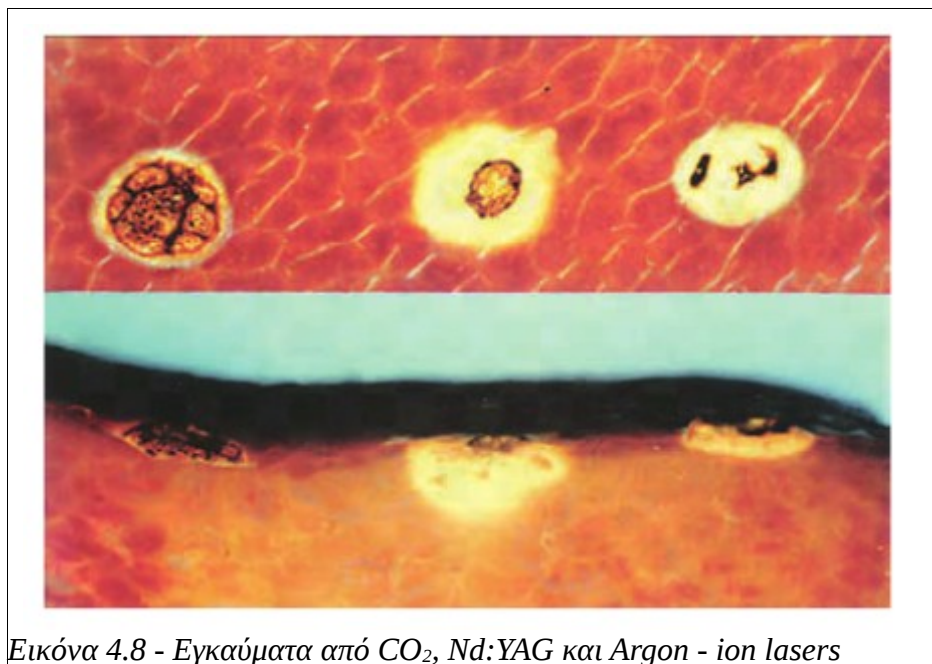
Για τις πηγές laser που χρησιμοποιούνται συνήθως (CO₂, Nd:YAG) περίπου το 99% της ενέργειας θα απορροφηθεί στα πρώτα 4mm του δερματικού ιστού. Η

15 “Μαθήματα Δερματολογίας και Αφροδισιολογίας”, Ομάδα Επιστημόνων, Συντονιστής: Α.Δ. Κατσάμπας Εκδόσεις Πασχαλίδης, 2007

απορρόφηση ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση:

$$I = I_0^{-\alpha L} \quad (4.5)$$

όπου I_0 (W/cm^2) είναι η πυκνότητα ισχύος του φωτός στην επιφάνεια, I (W/cm^2) η πυκνότητα ισχύος που διαδίδεται σε δοσμένο πάχος L (cm) του ιστού και α (cm^{-1}) η σταθερά απορρόφησης που εξαρτάται από τον ιστό και το μήκος κύματος.



Η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το δέρμα οφείλεται στην απορρόφησή της από τα λεγόμενα χρωμοφόρα, ουσίες δηλαδή που περιέχονται το δέρμα και απορροφούν επιλεκτικά συγκεκριμένα μήκη κύματος. Τα βασικότερα χρωμοφόρα παρουσιάζονται παρακάτω:

Μελανίνη: είναι η χρωστική του δέρματος. Η μελανίνη είναι ένα βιολογικό πολυμερές. Η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατεί στην επιδερμίδα, οφείλεται στην απορρόφησή της από τη μελανίνη. Η χημική δομή της μελανίνης είναι άγνωστη και για αυτό δεν μπορεί να μελετηθεί ή να αναπαραχθεί. Το φάσμα απορρόφησής της, όμως, ξέρουμε ότι ανήκει στο υπεριώδες φάσμα και ότι εξασθενεί το φως με ρυθμό ανάλογο του λ^{-4} χαρακτηριστικό της σκέδασης Rayleigh. Είναι το φυσικό αντιηλιακό του οργανισμού.

Κερατίνη: Η κερατίνη είναι μια ινώδης πρωτεΐνη που βρίσκεται στην επιδερμίδα.

Παράγεται μέσα στα κερατινοκύτταρα. Έχει φάσμα εκπομπής στα 460 nm, όταν διεγείρεται στα 370 nm.

Καροτένιο : Το καροτένιο είναι ένα από τα χρωμοφόρα συστατικά του δέρματος, αλλά επίσης μπορεί να βρεθεί στο αίμα και η παρουσία του στους ανθρώπινους οργανισμούς εξαρτάται από τη διατροφή τους. Η κορυφή απορρόφησης του είναι στα 480 nm και δεν επηρεάζει το γενικό χρώμα του δέρματος.

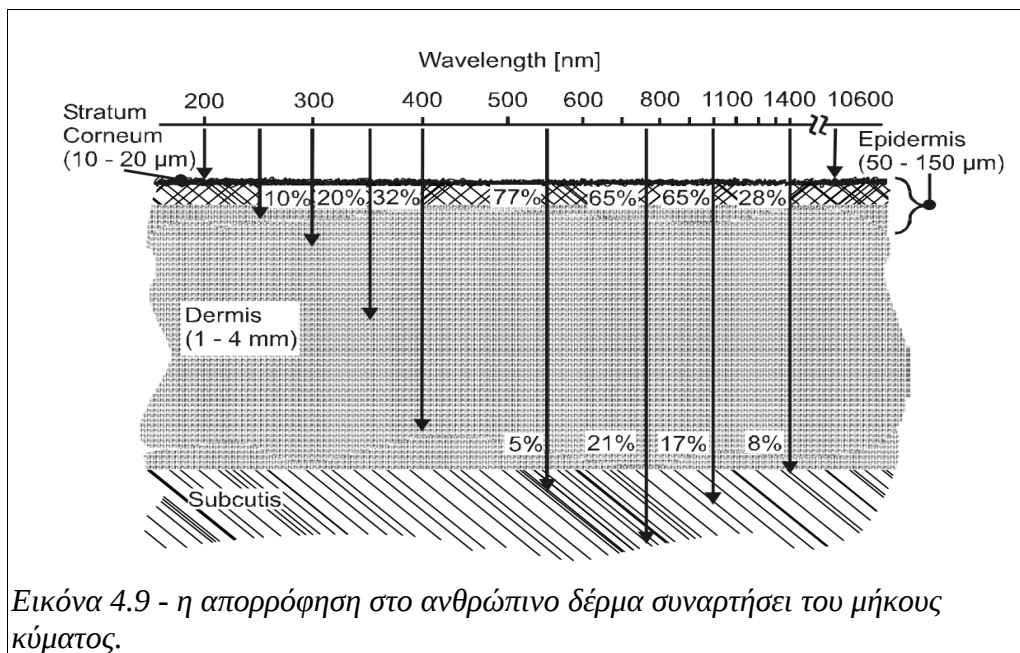
Κολλαγόνο: Το κολλαγόνο είναι επίσης μια ινώδης πρωτεΐνη που βρίσκεται στο δέρμα. Οι ίνες της είναι η κύρια αιτία σκέδασης του φωτός στο δέρμα. Όταν διεγείρεται στα 335 nm έχει φάσμα εκπομπής στα 380 και 460 nm.

Αιμοσφαιρίνη: Το δέρμα μας είναι γεμάτο με αιμοφόρα αγγεία, τα οποία περιέχουν αιμοσφαιρίνη (Hb). Είναι η χρωστική των ερυθρών αιμοσφαιρίων. Είναι ένα μακρομόριο με 4 άτομα σιδήρου, τα οποία συνδέονται αντιστρεπτά με το οξυγόνο και το μεταφέρουν στους ιστούς. Η αιμοσφαιρίνη έχει ένα μοναδικό φάσμα απορρόφησης με χαρακτηριστικές περιοχές απορρόφησης στα 420nm και στα 545nm-575nm.

Κυτοχρώματα: είναι μια σειρά ενζύμων σημαντικών για τον μεταβολισμό των κυττάρων. Περιέχουν αιμοπρωτεΐνες και λόγω του σιδήρου που υπάρχει στο μόριό τους έχουν κορυφές απορρόφησης στο υπεριώδες και στο ορατό.

DNA: Η κυτταρική φύση της επιδερμίδας μας βεβαιώνει ότι το DNA είναι ένα σημαντικό χρωμοφόρο. Παρουσιάζει κορυφή στο φάσμα απορρόφησης περίπου στα 240 - 290 nm (UVC). Η απορρόφηση φωτονίων UV έχει σαν αποτέλεσμα αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές μεταβολές, όπως: διμερισμός των αζωτούχων βάσεων και ιδιαίτερα της θυμίνης, υδάτωση των βάσεων, θραύση δεσμών υδρογόνου, θραύση ενός κλώνου, διασταύρωση DNA και πρωτεϊνών (crosslinking) κ.ά.

Σε γενικές γραμμές το ανθρώπινο δέρμα απορροφά έντονα μη ιονίζουσα ακτινοβολία για μήκη κύματος μικρότερα των 200 nm και μεγαλύτερα για μήκη κύματος μεγαλύτερα των 10,6 μm. Στο φάσμα των 700-800 nm παρατηρείται μεγάλη διεισδυτικότητα, όπως βλέπουμε και στην εικόνα 4.9.



4.4 Επιπτώσεις της ακτινοβολίας στους ιστούς.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι επιπτώσεις τις ακτινοβολίας ανάλογα με το μήκος κύματος, στο δέρμα και τον οφθαλμό. Ακολουθούν επεξηγήσεις¹⁶.

Μήκος κύματος ακτινοβολίας	Οφθαλμός	Δέρμα
200nm – 280nm Υπεριώδες C UVC	Φωτοκερατίτιδα	Ερύθημα Καρκίνος του δέρματος Επιτάχυνση της γήρανσης του δέρματος
280 nm – 315 nm Υπεριώδες B UVB	Φωτοκερατίτιδα	Μελάγχρωση
315 nm – 400 nm Υπεριώδες A UVA	Καταρράκτης	Μελάγχρωση Έγκαυμα
400 nm – 780 nm Ορατό VIS	Φωτοχημικός και θερμικός τραυματισμός του αμφιβληστροειδούς	Μελάγχρωση Έγκαυμα Φωτοευαισθησία
780 nm – 1400 nm	Καταρράκτης	Έγκαυμα

16 “Δερματικά νοσήματα. Διάγνωση και Θεραπεία.”, T.P. Habif MD, επιμέλεια έκδοσης: Α. Κατσάμπας, εκδόσεις Παρισιάνου, 2007

Υπέρυθρο A IRA	Έγκαυμα του αμφιβληστροειδούς (ή της ωχράς κηλίδας)	
1,4 μm – 3,0 μm Υπέρυθρο B IRB	Καταρράκτης Έγκαυμα του κερατοειδούς “Μυγάκια” (Aqueous flare)	Έγκαυμα
3,0 μm – 1 mm Υπέρυθρο C IRC	Έγκαυμα του κερατοειδούς	Έγκαυμα

Πηγή: <http://web.princeton.edu/sites/ehs/laserguide/sec2.html>

Φωτοκερατίτιδα: κερατίτιδα γενικά ονομάζεται η φλεγμονή του κερατοειδούς. Όταν ο κερατοειδής εκτεθεί πολλή ώρα σε υπεριώδη ακτινοβολία προκαλείται απόπτωση του επιθηλίου του, με αποτελέσματα συσσώρευση αίματος, έντονο πόνο, δακρύρροια και φωτοφοβία.

Καταρράκτης: είναι η θόλωση του φακού. Η ακτινοβολία διαταράσσει τη περιεκτικότητα του φακού σε νερό και ιόντα Na, K, Ca. Επίσης επηρεάζει την διάταξη των ινών, την πυκνότητα και την μικρομοριακή δομή των πρωτεϊνών.

Ερύθημα: κοκκίνισμα της περιοχής ακτινοβόλησης. Συνοδεύεται από πόνο και ευαισθησία της περιοχής.

Γήρανση: πρόωρη γήρανση της επιδερμίδας με την εμφάνιση ρυτίδων, κηλίδων και (ακτινικών) φακίδων. Η ανάπτυξη της έντονης ρυτίδωσης οφείλεται στην καταστροφή του ελαστικού ιστού και των ινών κολλαγόνου της δερμίδας.

Μελάγχρωση: μαύρισμα. Η απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας ενεργοποιεί την παραγωγή μελανίνης (μια φυσική άμυνα του οργανισμού) στην οποία οφείλεται το σκούρο χρώμα του δέρματος.

Καρκίνος του δέρματος: η παρατεταμένη έκθεση του δέρματος σε υπεριώδη ακτινοβολία φαίνεται να έχει καρκινογενετική δράση. Το καρκίνωμα εμφανίζει τοπική καταστροφή και διήθηση του δέρματος και σπάνια δίνει μεταστάσεις.

Φωτοευαισθησία: εμφανίζεται με την έκθεση σε ακτινοβολία σε συνδυασμό με την λήψη ορισμένων φαρμάκων ή ουσιών που διεγείρονται και προκαλούν τις

αντιδράσεις. Τα συμπτώματα ποικίλουν (εξανθήματα, οιδήματα, κοκκίνισμα, φαγούρα κτλ.)

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσουμε ότι η σοβαρότητα των επιπτώσεων εξαρτάται από μία σειρά από παράγοντες που έχουν να κάνουν με την δέσμη αλλά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ιστού. Η μεγαλύτερη διάμετρος της δέσμης και κατ'επέκταση η μικρότερη πυκνότητα ισχύος ανά επιφάνεια μειώνει τον κίνδυνο. Η διάμετρος της δέσμης ποικίλει μεταξύ των 2mm και των 8mm ανάλογα και την απόσταση πηγής στόχου. Το μέγεθος του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, όσο μεγαλύτερο είναι τόσο εκτείνεται η περιοχή τραυματισμού. Η διάρκεια του παλμού, όσο μικρότερη τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα τραυματισμού. Η συχνότητα των παλμών, όσο αυξάνει τόσο μειώνεται ο χρόνος που είναι διαθέσιμος για διάχυση της θερμότητας και επούλωσης. Ο δερματότυπος δηλαδή η ποσότητα μελανίνης στον ιστό όσο αυξάνεται τόσο αυξάνει η απορρόφηση θερμότητας.

4.2 Άλλοι κίνδυνοι.

Εκτός από τους κινδύνους που συνδέονται άμεσα με την δέσμη και την απορρόφηση της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας, μία σειρά από διαφορετικές κατηγορίες κινδύνου παρουσιάζεται παρακάτω.

4.2.1 Ηλεκτροπληξία.

Διάφορα συστήματα laser παρουσιάζουν κινδύνους ηλεκτροπληξίας. Ατύχημα μπορεί να συμβεί από επαφή με εκτεθειμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα καθώς και με αγωγούς τροφοδοσίας. Η έκθεση σε ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια εργασιών συντήρησης ή εγκατάστασης του συστήματος laser, όπου το μηχάνημα είναι “ανοικτό” δηλαδή έχουν αφαιρεθεί τα προστατευτικά καλύμματα. Τα αποτελέσματα της ηλεκτροπληξίας ξεκινούν από απλό κνησμό (φαγούρα), πόνο, μέχρι σοβαρούς τραυματισμούς, ακόμα και θανατηφόρους, ιδίως από συστήματα υψηλή τάσης. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος 50Hz (οικιακής κατανάλωσης) συναρτήσει της έντασης του¹⁷:

- 0,5 – 1 mA: γίνεται μόλις αντιληπτό, προκαλεί ασθενείς μυϊκές συσπάσεις.

¹⁷ “Σημειώσεις Βιοφυσικής”, Μ.Μακροπούλου, εκδόσεις ΕΜΠ, 2010

- 5 – 15 mA: δημιουργεί ισχυρές συσπάσεις των σκελετικών μυών, τίναγμα του σώματος και κατα συνέπεια μπορεί να προκληθούν τραυματισμοί και κατάγματα.
- 15 – 100 mA: προκαλείται έντονος πόνος και αναπνευστική δυσχέρεια, λόγω συσπάσεων των αναπνευστικών μυών. Μεγάλη είναι η πιθανότητα πρόκλησης αναπνευστικής παράλυσης και ελαφρών εγκαυμάτων στα σημεία επαφής.
- 100 – 500 mA: προκαλείται βλάβη στις κοιλίες της καρδιάς που παραμένει και μετά την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος. Αναπνευστική παράλυση, εξαιρετικά ισχυρές μυικές συσπάσεις και σοβαρά εγκαύματα.

Η σοβαρότητα των αποτελεσμάτων εξαρτάται επίσης από την διαδρομή του ρεύματος μέσα στον οργανισμό και την διάρκεια ροής του.

4.2.2 Επικίνδυνα παραγόμενα αέρια.

Καπνοί, αναθυμιάσεις, ατμοί μετάλλων, σωματίδια κ.α. απελευθερώνονται κατά τις διαδικασίες κοπής, χάραξης και συγκόλλησης. Ορισμένα από αυτά τα παράγωγα είναι επικίνδυνα για το αναπνευστικό σύστημα ή ακόμα και καρκινογόνα. Μερικά παραδείγματα: διοξείδιο του πυριτίου που απελευθερώνεται από την κοπή χαλαζία, βαρέα μέταλλα από χαρακτική, υδροκυάνιο, οξείδιο του καδμίου, τελλούριο και εξαφθοριούχο τελλούριο κ.τ.λ.

4.2.3 Ιοντίζουσα ακτινοβολία.

Ακτινοβολία εκτός εκείνης της δέσμης μπορεί να παραχθεί από διάφορα στοιχεία ενός συστήματος laser, όπως τροφοδοτικά, λαμπτήρες εκκενώσεως και σωλήνες πλάσματος. Πολλά εκ των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ενός συστήματος laser παράγουν ακτίνες-Χ. Ακόμα όταν μία δέσμη παλμικού laser υψηλής ισχύος (της τάξης του 1kW/cm^2) χτυπά ένα στόχο, δημιουργεί πλάσμα το οποίο εκπέμπει ιοντίζουσα ακτινοβολία.¹⁸

4.2.4. Κίνδυνοι πυρκαγιάς.

Διάφορα υλικά όπως ύφασμα, πλαστικό κ.α μπορούν να αναφλεχθούν κάτω από κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας. Συνήθως μία δέσμη άνω των 10 W/cm^2 μπορεί

¹⁸ Για τις επιδράσεις των ιοντιζουσών ακτινοβολιών στον ανθρώπινο οργανισμό βλ. Και “Ιοντίζουσες ακτινοβολίες, εφαρμογές στην Βιολογία και την Ιατρική”, Ε.Ν. Γαζής, εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2002, σελ. 197-214

να προκαλέσει πυρκαγιά σε εύφλεκτα υλικά. Αδιαφανή εμπόδια τα οποία χρησιμοποιούνται για να μπλοκάρουν την δέσμη κατά την έξοδο της από τον χώρο εργασίας, συνήθως δεν αντέχουν υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας για περισσότερο από μερικά δευτερόλεπτα χωρίς κάποια ζημιά, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής καπνού, της δημιουργίας οπής ή της ανάφλεξης. Το ίδιο ισχύει προφανώς και για αντικείμενα από τέτοια υλικά τα οποία βρίσκονται μέσα στο χώρο εργασίας χωρίς καμία χρησιμότητα. Η καθαρότητα του χώρου εργασίας από τέτοιου είδους αντικείμενα καθώς και ανακλαστικές επιφάνειες είναι σημαντική ιδίως όταν χρησιμοποιούμε αόρατο laser.

4.2.5. Επικίνδυνα αέρια.

Πολλά επικίνδυνα αέρια χρησιμοποιούνται σε συστήματα laser όπως το χλώριο, το φθόριο, το υδροχλώριο, το υδροφθόριο κ.α. Χρησιμοποιούνται διάφορες κατηγορίες αερίων, τοξικά, καρκινογενετικά, εύφλεκτα, οξειδωτικά, κρυογονικής τα οποία πρέπει να αποθηκεύονται κατάλληλα ώστε να αποφεύγεται κάθε διαρροή και με την απαραίτητη σήμανση. Ακόμα δοχεία υψηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση αερίων, περικλείουν κινδύνους έκρηξης σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

4.3 Όρια έκθεσης – MPE.

Σύμφωνα με τα διεθνή και ευρωπαϊκά πρότυπα έχουν καθιερωθεί ασφαλή όρια έκθεσης σε ακτινοβολία laser τα οποία μας δίνουν την μέγιστη δόση ενέργειας που δεν είναι επιζήμια για τους ιστούς. Τα όρια αυτά, γνωστά και MPE (maximum permissible exposure) δίνονται αναλυτικά στα πρότυπα IEC 60825 1 (-6) , EN 207, EN 208, ANSI Z136.1(-.6) κ.α. Τα πρότυπα αυτά πλέον έχουν ενημερωθεί και επικαιροποιηθεί, έρευνα συνεχίζει και γίνεται. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τα δεδομένα από το διεθνές πρότυπο IEC 60825.

Τα MPE δημιουργήθηκαν με βάση πειραματικά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από ακτινοβολία σε ιστούς ζώων αλλά και ανθρώπινους. Τα πειράματα έγιναν με δεδομένα το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, την ακτινοβολία δέρματος ή ματιού,

,την διάμετρο της δέσμης στο σημείο αλληλεπίδρασης και τη διάρκεια του παλμού που δέχτηκε ο ιστός και αλλάζοντας την ισχύ του παλμού ή την ισχύ του συνεχούς laser, Κατόπιν εξέτασης των ιστών για τυχόν κακώσεις, μεταλλάξεις ή τραυματισμούς συλλέγονται τα χρήσιμα δεδομένα. Οι εξετάσεις αυτές ποικίλουν. Το όριο έκθεσης για το οποίο το 50% των δεδομένων μας δίνουν κάποια κάκωση καλείτε “Effective Dose 50%” και συμβολίζεται ED-50 . Η ED-50 αποτελεί στατιστικό αποτέλεσμα, έτσι τραυματισμοί και κακώσεις παρατηρούνται και για μικρότερες δόσεις. Κατά κανόνα λοιπόν τα MPE είναι μικρότερα από την ED-50, σε γενικές γραμμές χρησιμοποιείται ένας παράγοντας της τάξης του 1/10. Ανάλογα το μήκος κύματος και τον χρόνο έκθεσης ο παράγοντας αυτός, που ονομάζεται παράγοντας ασφαλείας, έχει διακυμάνσεις γύρω από αυτή την τιμή. Εκτιμάται ότι για έκθεση ελαφρώς πάνω από το MPE παρατηρούνται συνήθως τραυματισμοί. Η πιθανότητα αυτή αυξάνει ραγδαία καθώς αυξάνεται η δόση πάνω από το MPE.

Όπως είδαμε, η απορρόφηση και οι επιπτώσεις διαφέρουν στο μάτι και στο δέρμα, ιδιαίτερα στην περιοχή που απορροφά ο αμφιβληστροειδής (ορατό). Κατά συνέπεια θα διαφέρουν και τα όρια έκθεσης. Οι τιμές των MPE προσδιορίζονται σε μονάδες ενέργεια ή ισχύος ανά τετραγωνικό εκατοστό, δηλαδή σε J/cm^2 ή W/cm^2 και εξαρτώνται από την διάρκεια της έκθεσης και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ακόμα για το μάτι, μπορεί να εξαρτάται και από το μέγεθος του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή. Σε γενικές γραμμές για μεγάλους χρόνους έκθεσης το MPE είναι χαμηλότερο από ότι για μικρής διάρκειας, όμως υπάρχουν και περιοχές τιμών μήκους κύματος και διάρκειας για τις οποίες το MPE δεν εξαρτάται από τις τιμές τους, αυτές καθαυτές.

4.3.1 Παράμετροι που επηρεάζουν τον υπολογισμό των MPE.

Ανάλογα με το μήκος κύματος και τον ιστό απορρόφησης ορίζεται ένα οριακό άνοιγμα της δέσμης (διάμετρος) πάνω από το οποίο πρέπει να υπολογίζουμε το άνοιγμα όταν θέλουμε να συγκρίνουμε μία δόση με το MPE. Αυτό έχει να κάνει με την απορρόφηση κάθε ιστού αλλά και με τις οπτικές ιδιότητες του κερατοειδούς και του φακού γιατί από αυτές εξαρτάται η επιφάνεια ακτινοβολήσης του αμφιβληστροειδούς. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές αυτές:

Μήκος κύματος	Μάτι	Δέρμα
180 – 400 nm	1 mm	3,5 mm
400 – 1400 nm	7mm	3,5 mm
1,4 – 100 μm	1mm για $t \leq 0,35s$ 1,5t ^{3/8} mm για $0,35s < t < 10 s$ 3,5 mm για $t \geq 10s$	3,5 mm
0,1 – 1 mm	11 mm	11 mm

Οι τιμές αυτές περιλαμβάνουν και τα “χειρότερα” ενδεχόμενα, για παράδειγμα το μέγεθος των 7mm είναι μέγιστη διάμετρος της κόρης του ματιού, σε σκοτεινό περιβάλλον και για το δέρμα στο υπέρυθρο, τα 11mm περιλαμβάνουν όλη την περιοχή επίδρασης της ακτινοβολίας, λόγω σκεδάσεων μέσα το δέρμα.

Δεδομένου ότι οι υπολογισμοί μας γίνονται για τυχαία έκθεση σε ακτινοβολία, η διάρκεια της έκθεσης εξαρτάται από την ανθρώπινη αντίδραση. Την παράμετρο αυτή, λοιπόν δεν μπορούμε να την υπολογίσουμε με ακρίβεια, αλλά πρέπει να την εκτιμήσουμε. Η εκτίμησή μας βασίζεται στην μέγιστη προβλεπόμενη διάρκεια έκθεσης. Υπάρχουν αναμενόμενες τιμές για την διάρκεια της έκθεσης αλλά σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι υποχρεωτικές εφόσον μπορούμε να στηρίξουμε τεκμηριωμένα (ανάλογα με την περίπτωση) μια άλλη εκτίμηση. Για αυτές τις τιμές χρησιμοποιήθηκαν βιολογικά δεδομένα. Για παράδειγμα ο χρόνος που χρειάζεται για να αντιδράσει το μάτι και να κλείσει αυτόματα το βλέφαρο είναι 0,25 s. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αναμενόμενες τιμές μαζί με συνοπτικό σχολιασμό.

Δέρμα		
	Εκτιμώμενος χρόνος έκθεσης	Σχόλια
Υπεριώδες	30 000 s	Συνεχής έκθεση σε 8ωρη εργασία. 8 hr = 60 min = 28800s $\approx 3 \cdot 10^4 s$
Ορατό και υπέρυθρο	10 s	Επαγωγή του πόνου
Μάτι		
Υπεριώδες	30000 s	Η ανάπτυξη των συμπτωμάτων της

		φωτοκερατίτιδας διαρκεί κάποιες ώρες, συνήθως δε, εκδηλώνονται την νύχτα.
Ορατό	0,25 s	Χρόνος αντίδρασης ματιού
Κοντινό Υπέρυθρο	10 s	Αντίδραση στον πόνο
Μέσο και μακρινό υπέρυθρο	10 s	Αντίδραση στη θερμότητα

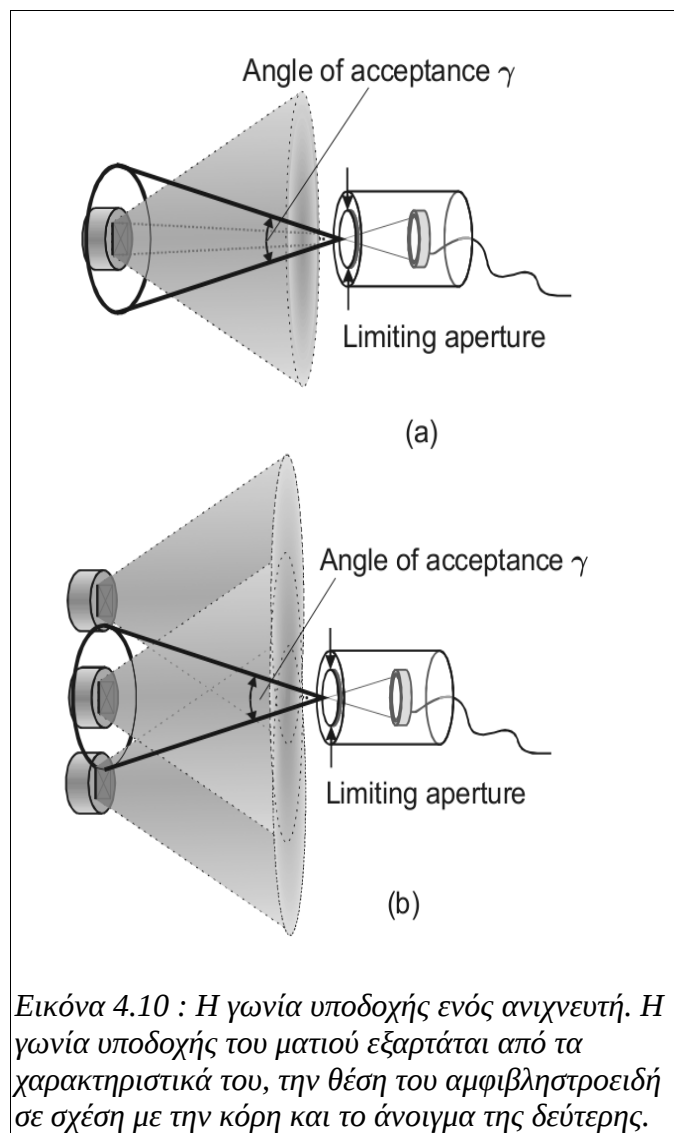
Όσο αφορά την απόσταση πηγής – στόχου πρέπει πάντα να χρησιμοποιούμε το κοντινότερο σημείο στο οποίο είναι προσβάσιμο στην τροχιά της δέσμης laser.

Μια τελευταία παράμετρος που αξίζει να αναφέρουμε είναι η γωνία υποδοχής. Προσοχή η γωνία υποδοχής γ_{ph} διαφέρει από το άνοιγμα της δέσμης θ . Τα πρότυπα μας δίνουν τις μέγιστες τιμές ώστε να αποφεύγεται λανθασμένη εκτίμηση του κινδύνου από λάθος μετρήσεις και εκτιμήσεις. Για σύγκριση με τα όρια θερμικής επίπτωσης στο αμφιβληστροειδή δίνεται : $\gamma_{th}=100$ mrad. Για σύγκριση με τα όρια φωτοχημικής επίπτωσης στον αμφιβληστροειδή δίνονται συναρτήσεις του χρόνου έκθεσης:

- για $t_{exp} < 100$ s , $\gamma_{ph} = 11$ mrad .
- για 100 s $< t_{exp} < 10000$ s , $\gamma_{ph} = 1,1 t^{1/2}$ mrad .
- για $t_{exp} > 10000$ s , $\gamma_{ph} = 110$ mrad .

Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται μόνο για υπολογισμούς στα μήκη κύματος 400 – 600 nm και αφορούν μόνο τις επιπτώσεις στον αμφιβληστροειδή, όπως φαίνεται και στους πίνακες του παραρτήματος.

Για την καλύτερη κατανόηση του ορισμού της γωνίας υποδοχής, παρατίθεται το επόμενο σχήμα.



4.3.2 Μεθοδολογία προσδιορισμού δόσης ακτινοβολίας και MPE.

Τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε για τους υπολογισμούς μας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με την ακόλουθη μεθοδολογία:

- Προσδιορισμός MPE
 1. Προσδιορίζουμε το μήκος κύματος που εκπέμπει το laser (λ).
 2. Προσδιορίζουμε τον μέγιστο εκτιμώμενο χρόνο έκθεσης (t).
 - Για εσκεμμένη έκθεση: t = διάρκεια έκθεσης.
 - Για τυχαία έκθεση στο μάτι: α) στο ορατό, $t = 0,25s$. β) στο υπεριώδες, t

= 30000 s. γ) στο υπέρυθρο, $t = 100$ s

- ο Για έκθεση στο δέρμα: $t = 10 - 100$ s.

3. Καθορίζουμε αν το άνοιγμα της δέσμης (θ) (στους πίνακες παρακάτω το συναντάμε και με το σύμβολο α) ανήκει σε ένα από τα τρία σύνολα: $\theta < 1,5$ mrad , $1,5$ mrad $< \theta < 100$ mrad, $\theta > 100$ mrad.

4. Βρίσκουμε το MPE από τους πίνακες κάνοντας και τους απαραίτητους υπολογισμούς.

5. Αν έχουμε παλμικό laser:

- ο Μοναδικός παλμός: α) στο ορατό, αν $\tau_{\text{pulse}} < 0,25$ s, τότε θέτουμε $t = \tau_{\text{pulse}}$, αλλιώς $t = 0,25$ s. β) στο υπεριώδες, $t = 30000$ s. γ) στο υπέρυθρο, $t = 10$ s.
- ο Για συστοιχία παλμών: α) υπολογίζουμε το MPE_{single} , μονού παλμού με $t = \tau_{\text{pulse}}$. β) υπολογίζουμε για την συστοιχία: $MPE_{\text{train}} = MPE_{\text{single}} \cdot N^{0,25}$, όπου N ο αριθμός των παλμών. γ) υπολογίζουμε το μέσο MPE ως εξής : $MPE_{\text{μέσο}} = (MPE \text{ για } t = \text{διάρκεια έκθεσης}) / N$. δ) χρησιμοποιούμε το μικρότερο από τα τρία.

6. Προσδιορίζουμε το ζητούμενο MPE με την βοήθεια των πινάκων.

- Προσδιορισμός της δόσης (E_{exp}) .

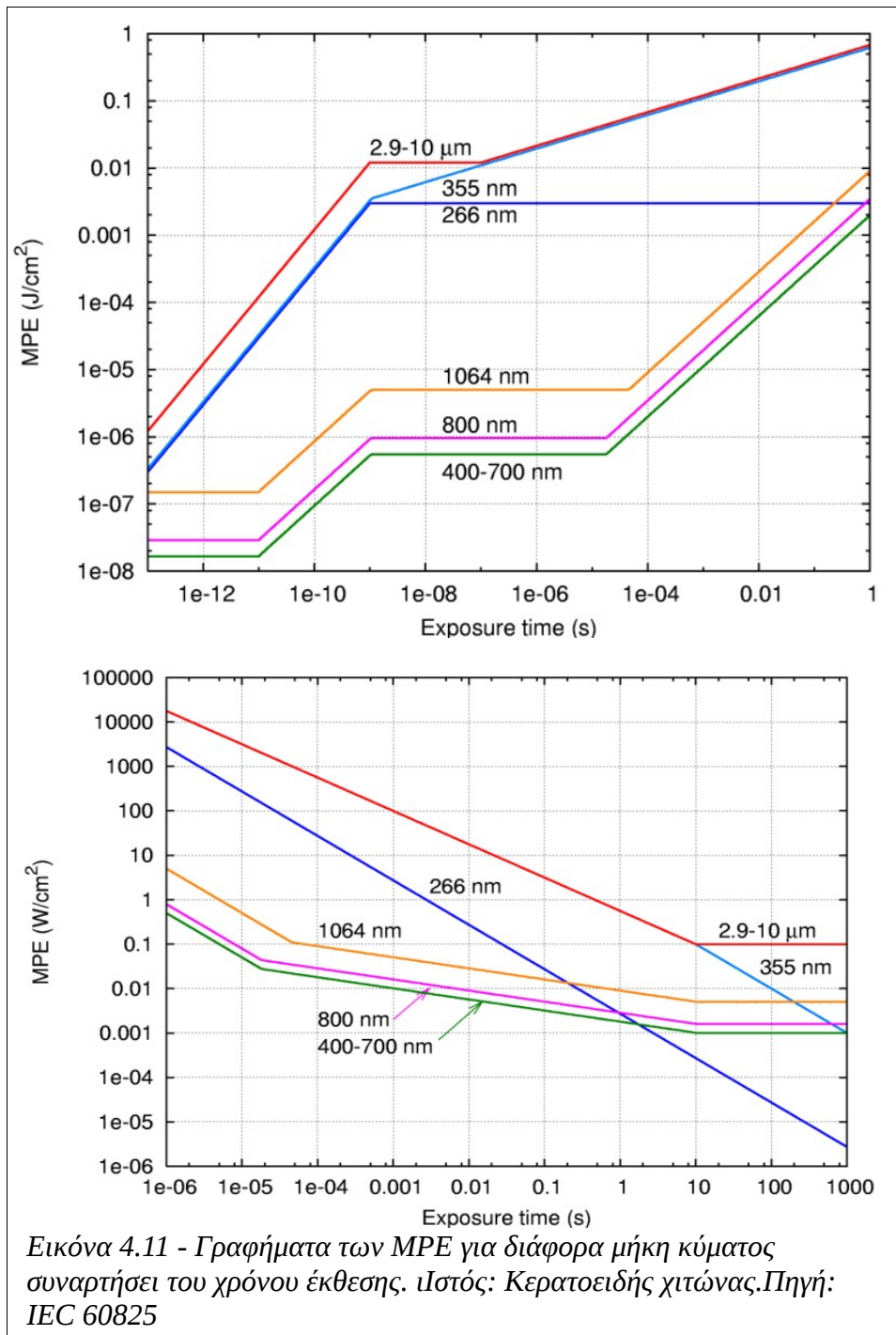
Υπολογίζουμε την ισχύ ή την ενέργεια ανά τετραγωνικό εκατοστό που δέχτηκε ή μπορεί να δεχτεί ο ιστός.

- Συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας. Για να χαρακτηρίσουμε ασφαλή μία δόση ακτινοβολίας πρέπει $E_{\text{exp}} < MPE$.

Πρέπει να τονίσουμε, ότι στο εμπόριο διατίθενται εύχρηστα προγράμματα υπολογισμού των MPE, τα οποία μπορεί ο ενδιαφερόμενος να “κατεβάσει” στον ηλεκτρονικό του υπολογιστή, κατόπιν αμοιβής. Τα προγράμματα αυτά, πωλούνται από εταιρίες που εμπορεύονται προϊόντα ασφαλείας laser και οι ιστοσελίδες τους μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία.

Ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να απασχολήσει τους υπολογισμούς μας είναι η

απόσταση ασφαλείας από την πηγή, δηλαδή πάνω από ποια απόσταση το άνοιγμα της δέσμης απλώνει τόσο ώστε η έκθεση στην ακτινοβολία laser να είναι ασφαλής. Η απόσταση ασφαλείας ονομάζεται NOHD (nominal ocular hazard distance) και υπολογίζεται είτε πειραματικά είτε υπολογίζοντας με την βοήθεια των εξισώσεων του επόμενου κεφαλαίου, όπου θα συζητήσουμε αυτό το θέμα πιο αναλυτικά.



Εικόνα 4.11 - Γραφήματα των MPE για διάφορα μήκη κύματος συναρτήσει του χρόνου έκθεσης. Ιστός: Κερατοειδής χιτώνας. Πηγή: IEC 60825

4.3.3 Πίνακες MPE.

Στο τέλος αυτής της εργασίας υπάρχει παράρτημα με τους πίνακες των MPE σύμφωνα με αυτά που έχουμε αναλύσει σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης παρατίθενται συγκεντρωμένες όλες οι τιμές και οι εξισώσεις που αναφέρονται σε αυτή την ενότητα. Για την καλύτερη κατανόηση και την εύκολη χρήση των πινάκων παραθέτουμε επεξηγήσεις για τους συντελεστές C_i , $i=1,2,3,4,5,6,7$ και T_1, T_2 .

Για χάρη απλούστευσης των πινάκων, τα MPE δίνονται για συγκεκριμένα φάσματα μηκών κύματος, και χρόνου έκθεσης. Χρησιμοποιούνται και οι παράγοντες C_i που είναι αδιάστατοι και οι περισσότεροι είναι συναρτήσεις του μήκους κύματος (λ) μετρημένο σε nm.

- Ο C_1 εκφράζει το MPE για θερμική επίπτωση στο υπεριώδες.
- Ο C_2 εκφράζει την εξάρτηση της φωτοχημικής επίδρασης του υπεριώδους από το μήκος κύματος.
- Ο C_3 εκφράζει την εξάρτηση της φωτοχημικής επίδρασης στον αμφιβληστροειδή από το μήκος κύματος.
- Ο C_4 αποτελεί διόρθωση του ορίου της θερμικής επίδρασης στον αμφιβληστροειδή.
- Ο C_5 προσαρμόζει το MPE ενός παλμού για απορρόφηση N παλμών.
- Ο C_6 αυξάνει το MPE για θερμική επίδραση του αμφιβληστροειδούς από συνεχή ακτινοβολία.
- Ο C_7 διορθώνει το όριο της θερμικής επίδρασης στον αμφιβληστροειδή.

Υπάρχουν ακόμα δύο παράγοντες χρόνου. Ο T_1 που είναι ο χρόνος έκθεσης που είναι η διαχωριστική γραμμή μεταξύ θερμικών και φωτομηχανικών φαινομένων στο υπεριώδες και εξαρτάται από το λ . Ο T_2 χαρακτηρίζει τον χρόνο που χρειάζεται να εστιάσει το μάτι και εξαρτάται από το α , δηλαδή την γωνία υποδοχής του ματιού.

Οι τιμές και οι συναρτήσεις των παραγόντων δίνονται στο παράρτημα.

Ο υπολογισμός των MPE απαιτεί μία συγκεκριμένη διαδικασία, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί χρονοβόρα. Στο εμπόριο διατίθενται και διάφορα προγράμματα, φιλικά προς τον χρήστη, τα οποία δέχονται ως παράμετρος, το μήκος κύματος, την

ισχύ, την διάμετρο της δέσμης, τον ιστό που ακτινοβολείται κ.α. και επιστρέφουν το αντίστοιχο MPE καθώς και αν η δόση είναι επικίνδυνη και κατά πόσο.

4.4 Ταξινόμηση laser.

Σύμφωνα με διεθνή πρότυπα τα laser ταξινομούνται με βάση την ικανότητά τους να προκαλούν βλάβες στους βιολογικούς ιστούς. Οι παράμετροι με τους οποίους γίνεται αυτή η ταξινόμηση είναι η ισχύς εξόδου του laser, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, η διάρκεια έκθεσης, η διάμετρος της δέσμης στο σημείο αλληλεπίδρασης. Η ταξινόμηση αυτή άρχισε στις αρχές του 1970 στις ΗΠΑ με πρότυπα ANSI έτσι διαμορφώθηκε το “παλιό σύστημα” ταξινόμησης. Από το 2002 και μετά έχει αρχίσει να διαμορφώνεται το “αναθεωρημένο σύστημα” ταξινόμησης καθώς οι γνώσεις μας πάνω στις στα laser βαθαίνουν. Το νέο σύστημα ταξινόμησης είναι μέρος του διεθνούς προτύπου τυποποίησης IEC 60825 και από το 2007 και του αμερικάνικου ANSI Z136.1 καθώς και σε πληθώρα άλλων εθνικών προτύπων.

Η ταξινόμηση των laser βασίζεται την έννοια του ορίου έκθεσης MPE που εξηγήσαμε παραπάνω. Η ταξινόμηση αυτή, όπως έχει διαμορφωθεί σήμερα έχει ως εξής (για χάρη απλότητας και για να μην δημιουργούμε σύγχυση στον αναγνώστη, δεν παραθέτουμε το παλιότερο σύστημα ταξινόμησης):

Κατηγορία 1η:

- **Τάξη (Class) 1.** Τα laser αυτής της κατηγορίας δεν μπορούν να παράγουν επιζήμια επίπεδα ακτινοβολίας. Τα laser αυτά πρέπει να επισημαίνονται, αλλά δεν χρειάζονται παραπάνω μέτρα προστασίας. Παραδείγματα τέτοιων laser είναι τα laser εκτυπωτών ή τα laser των συσκευών CD/DVD.

- **Τάξη 1M.** Ούτε αυτή η κατηγορία μπορεί υπό κανονικές συνθήκες να παράγει επιζήμια επίπεδα ακτινοβολίας. Εκτός και αν κοιτάξουμε την δέσμη με την βοήθεια ισχυρών οπτικών μέσων όπως ισχυρούς φακούς (eye-loupe) ή τηλεσκόπιο. Τα laser αυτά πρέπει να επισημαίνονται, αλλά δεν χρειάζονται παραπάνω μέτρα προστασίας πέραν της πρόληψης χρήσης οπτικών μέσων.

Κατηγορία 2η:

- **Τάξη 2:** Εδώ ανήκουν τα laser χαμηλής ισχύος και τα laser που εκπέμπουν στο ορατό και μπορούμε να κοιτάξουμε την δέσμη κάτω από προϋποθέσεις. Λόγω της φυσιολογικής ανθρώπινης αντίδρασης αποστροφής (αυτόματο κλείσιμο βλεφάρων σε 0.25s) , αυτά τα laser δεν δημιουργούν ζημιά. Μπορούν όμως να γίνουν επιζήμια αν η άμεση έκθεση στη ακτινοβολία διαρκέσει μεγάλη χρονική περίοδο. Laser cw που η ισχύς εξόδου του δεν υπερβαίνει το 1mW.

- **Τάξη 2M:** Ομοίως με τα παραπάνω. Ο κίνδυνος να γίνουν επικίνδυνα αυξάνει σημαντικά όταν η έκθεση γίνεται μέσα από οπτικά μέσα.

Κατηγορία 3η:

Laser μεσαίας ισχύος που χρειάζονται λήψη συγκεκριμένων μέτρων ασφαλείας ώστε να αποφεύγεται έκθεση του ματιού. Τα μέτρα ασφαλείας αυτά πρέπει να προβλέπουν την αποφυγή είτε της άμεσης έκθεσης είτε της έκθεσης από ανάκλαση.

- **Τάξη 3R:** Είναι συστήματα laser που είναι δυνητικά επικίνδυνα για άμεση ή από (κατοπτρική) ανάκλαση έκθεση ματιού που είναι σταθερό και κατάλληλα εστιασμένο. Η πιθανότητα τραυματισμού είναι μικρή. Δεν δημιουργούν ούτε κινδύνους πυρκαγιάς ούτε κινδύνους από διάχυση της δέσμης. Μπορούν όμως να δημιουργήσουν κινδύνους αν διέρχονται μέσα από κατάλληλα οπτικά μέσα. Laser ισχύος εξόδου μεταξύ 1-5mW, ανήκουν σε αυτή την τάξη.

- **Τάξη 3B:** Εδώ ανήκουν laser τα οποία είναι επικίνδυνα για άμεση ή από ανάκλαση έκθεση του ματιού. Η πιθανότητα τραυματισμού μεγαλώνει σε σχέση με την τάξη 3R. Για cw laser από τα 350 nm μέχρι το μακρινό υπέρυθρο το όριο έκθεσης είναι στα 500 mW. Για παλμικά laser στο ορατό το όριο είναι στα 30 mJ.

Κατηγορία 4η:

- **Τάξη 4:** Laser υψηλής ισχύος των οποίων οι δέσμες ακτινοβολίας μπορούν να γίνουν επιζήμιες όχι μόνο με άμεση ή κατοπτρική έκθεση αλλά και μετά από διάχυση. Αυτής της κατηγορίας laser μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιά καθώς και δερματικά εγκαύματα. Όλα τα laser που υπερβαίνουν τους περιορισμούς της κατηγορίας 3 ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Κεφάλαιο 5 – Μέτρα Ασφαλείας.

5.1 Εισαγωγή.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να εκμηδενίσουμε τον κίνδυνο είναι στην πηγή του. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να αποφύγουμε επικίνδυνες καταστάσεις. Η καλύτερη λύση είναι να απομονώνουμε όλη την διαδρομή της δέσμης και όποιων άλλων παραγόντων κινδύνου (κλειστού τύπου συστήματα). Στις βιομηχανικές και άλλες εφαρμογές, αυτό δεν είναι κατορθωτό πάντα όμως. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα εφαρμογών ανοικτών συστημάτων ιδίως στην βιομηχανία όπου τα laser που χρησιμοποιούνται ανήκουν στις κατηγορίες 3 και 4.

Τα μέτρα ασφαλείας μπορούν διαχωριστούν σε τρία επίπεδα, στο τεχνικό επίπεδο (Engineering control measures), στο επίπεδο οργάνωσης (Administrative control measures) και στα ατομικά μέτρα προστασίας (Personal protection). Στο τεχνικό επίπεδο περιλαμβάνονται τα μέτρα που έχουν να κάνουν με την αποφυγή του κινδύνου με καλύμματα προστασίας, ασφάλειες κ.α.. Στο επίπεδο οργάνωσης περιλαμβάνονται η χρήση σημάτων κινδύνου, η εκπαίδευση πάνω σε ζητήματα ασφαλείας, ο έλεγχος τήρησης των κανόνων ασφαλείας, τα καθήκοντα του τεχνικού ασφαλείας laser (Laser Safety Officer) κ.α. Τέλος σε ατομικό επίπεδο περιλαμβάνονται προστατευτικά γυαλιά, γάντια κ.α.

Ανάλογα με την κατηγορία και την τάξη του συστήματος laser τα μέτρα γίνονται και πιο αυστηρά. Για την κατηγορία 1 δεν είναι απαραίτητα συγκεκριμένα μέτρα ασφαλείας πέρα από την αποφυγή απευθείας έκθεσης του ματιού μέσα από συγκλίνοντα οπτικά μέσα. Το ίδιο ισχύει και για την κατηγορία 2, μόνο που εδώ συνίσταται η σήμανση του laser και εφόσον χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς σκοπούς, η επιτήρηση από έναν LSO. Για την τάξη 3R πρέπει να αποφεύγεται η απευθείας έκθεση του ματιού με κάθε τρόπο, να αποκλείεται η διαρροή της δέσμης προς χώρους όπου υπάρχουν άτομα που δεν εργάζονται με το laser, να ακολουθούνται αυστηρά οι οδηγίες χρήσης και συντήρησης.

Για της κλάσεις 3B και 4 οι κίνδυνοι αυξάνουν σημαντικά. Ο έλεγχος από ένα LSO είναι απαραίτητος, η εργασία πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσκοπικό.

Διακόπτες ασφαλείας, διαχωριστικά του χώρου, σύστημα πυρόσβεσης, μέτρα ατομικής προστασίας είναι αναγκαία. Πρέπει με κάθε τρόπο να ελέγχεται η διαδρομή της δέσμης και να ελαχιστοποιείται ή να μηδενίζεται η ελεύθερη διαδρομή της. Πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένες διαδικασίες λειτουργίας, ελέγχου, συντήρησης και εγκατάστασης αυτών των συστημάτων.

5.2 NOHD και ελεγχόμενη περιοχή laser.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναζητήσαμε την απάντηση στο ερώτημα: σε ποια απόσταση είναι ασφαλής η έκθεση σε μία δέσμη laser; Η απόσταση αυτή λέγεται NOHD (nominal ocular hazard distance) και είναι η απόσταση στην οποία η έκθεση του ματιού γίνεται ίση με το αντίστοιχο MPE. Η NOHD δίνεται σε μέτρα από τον παρακάτω τύπο:

$$NOHD = \frac{2}{\theta} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} \quad (5.1)$$

όπου θ η γωνία ανοίγματος της δέσμης σε rad, P η ισχύς εξόδου του laser σε W και το MPE σε W/m^2 . Αν η γωνία μας δίνεται σε μοίρες η σχέση (5.1) γίνεται:

$$NOHD = \frac{2}{\tan(\theta/2)} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} \quad (5.2)$$

οι σχέσεις αυτές μας δίνουν την NOHD για την απλή περίπτωση ελεύθερης δέσμης, στην εικόνα 5.1 φαίνονται οι σχέσεις για διάφορες περιπτώσεις διάδοσης της δέσμης, και υπολογίζονται κάποιες NOHD με βάση τα δεδομένα του προτύπου IEC 60825-1. Η περιοχή κινδύνου που καθορίζεται από την NOHD ονομάζεται nominal hazard zone (NHZ)

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε τις απώλειες από τον αέρα ή άλλο οπτικό μέσο, μέσω σκεδάσεων και απορροφήσεων. Η διαπερατότητα ενός οπτικού μέσου είναι:

$$\tau = e^{-z\xi} \quad (5.3)$$

όπου z είναι η απόσταση και ξ συντελεστής απωλειών με μονάδες αντίστροφες

της απόστασης. Οι απώλειες μεταφορές υπολογίζονται από τη σχέση

$$E_0 = \frac{4P}{\pi(\theta z)^2} \tau \tag{5.4}$$

όπου ο παράγοντας που πολλαπλασιάζουμε το τ είναι η πυκνότητα ισχύος της δέσμης σε απόσταση z.

NOHD	Formula	Schematic
Unmodified laser beam NOHD = 3364 m	$NOHD = \frac{2}{\theta_{63}} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}}$	
Multimode fibre NA = 0.25 NOHD = 17.5 m	$NOHD = \frac{1.73}{NA} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}}$	
Diffuse reflection R = 0.9 beta = 0 deg NOHD = 2.4 m	$NOHD = \sqrt{\frac{RP \cos \beta}{\pi MPE}}$	
Focused beam f = 25 mm NOHD = 18 m	$NOHD = \frac{2f}{d_{63}} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}}$	

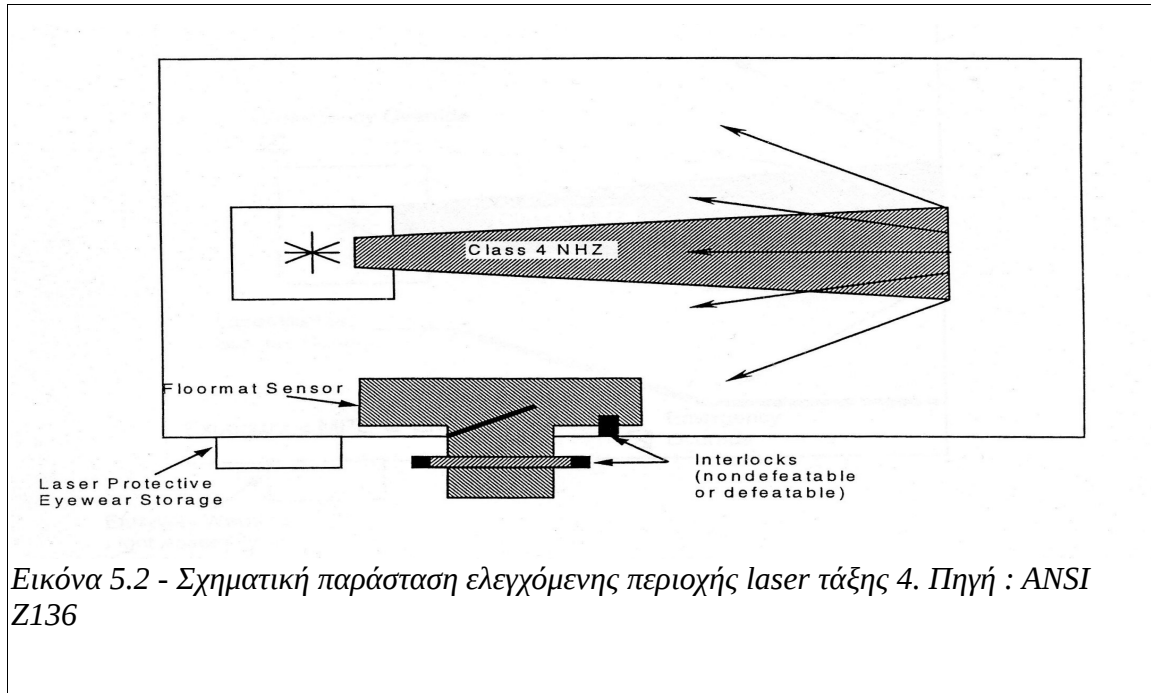
Εικόνα 5.1 - παραδείγματα NOHD, P= 1kW, θ-1,5 mrad, MPE = 50 W/m². Πηγή : Laser Safety,R.Henderson and K. Schulmeister.

Η ελεγχόμενη περιοχή laser πρέπει να καθορίζεται με βάση τα παραπάνω. Βλέπουμε στην εικόνα ότι σε όχι σπάνιες περιπτώσεις η NOHD είναι αρκετά μεγάλη και ο χώρος εργασίας laser δεν μπορεί παρά να είναι κλειστός και αυστηρά διαχωρισμένος από του υπόλοιπους χώρους. Αυτό δεν σημαίνει ότι ανάλογα και με την τάξη του laser, δεν είναι αρκετός ένας πάγκος εργασίας ή κουρτίνες που θα

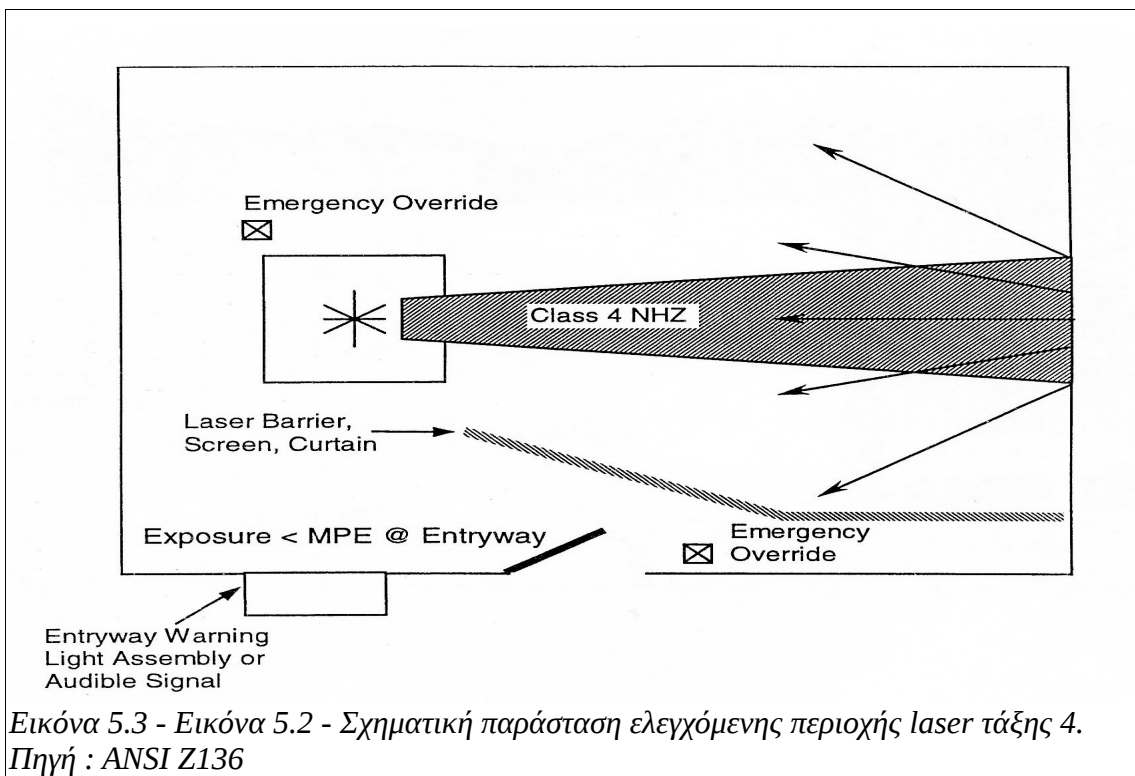
αποκόπτουν την πορεία της δέσμης. Ο διαχωρισμός του χώρου εργασίας εξυπηρετεί δύο σκοπούς, να κρατάει το μη εξουσιοδοτημένο προσωπικό έξω από αυτόν και την δέσμη μέσα σε αυτόν. Για το προσωπικό μέσα στον χώρο, πρέπει να ακολουθούνται οι κανόνες ασφαλείας που αναλύουμε παρακάτω.

Οι τοίχοι, οι κουρτίνες και τα παράθυρα είναι απαραίτητο να επικαλύπτονται ή να αποτελούνται από υλικό το οποίο βεβαιώνει ότι σταματάει την πορεία της δέσμης είτε διαχέοντας είτε απορροφώντας. Για παράδειγμα, το μήκος κύματος του laser CO₂ απορροφάται έντονα από το γυαλί, έτσι τα κλειστά παράθυρα αποτελούν ένα καλό κάλυμμα προστασίας από αυτή την ακτινοβολία, αρκεί βεβαίως η δόση που θα απορροφηθεί να μην είναι ικανή να βλάψει το γυαλί. Μερικές ελεγχόμενες περιοχές laser κυρίως σε μεγάλα και ψηλοτάβανα εργοστάσια είναι ανοικτές στην οροφή, αυτό είναι αποδεκτό εφόσον κανείς δεν εργάζεται πάνω από αυτό το ύψος και δεν υπάρχει πιθανότητα η δέσμη να ανακλαστεί και να κατευθυνθεί προς τα κάτω.

Ακόμα η ελεγχόμενη περιοχή laser πρέπει να φέρει στην περιμέτρώ της τα προβλεπόμενα σήματα (τα ειδικά σήματα κίνδυνου φαίνονται στο Παράρτημα 2). Σε κατηγορίες laser υψηλού κινδύνου (3B και 4) όπου η ελεγχόμενη περιοχή αποτελείται από ένα κλειστό δωμάτιο η είσοδος πρέπει να είναι ελεγχόμενη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πόρτες ασφαλείας, διακόπτες της δέσμης συνδεδεμένοι με την πόρτα ,ελεγχόμενοι προθάλαμοι κ.α. (βλ. Εικόνες 5.2, 5.3)



Εικόνα 5.2 - Σχηματική παράσταση ελεγχόμενης περιοχής laser τάξης 4. Πηγή : ANSI Z136



Εικόνα 5.3 - Εικόνα 5.2 - Σχηματική παράσταση ελεγχόμενης περιοχής laser τάξης 4. Πηγή : ANSI Z136

5.3 Τεχνικά Μέτρα Ασφάλειας.

Σε τεχνικό επίπεδο, τα μέτρα ασφαλείας αποτελούνται από ό,τι είναι απαραίτητο για να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος από την χρήση συστημάτων laser. Αφορούν τεχνικές προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να τηρούνται κατά την κατασκευή και την εγκατάσταση του συστήματος. Οι προδιαγραφές αυτές ποικίλουν ανάλογα ε την τάξη του συστήματος laser.

Προστατευτικά περιβλήματα: (απαιτούνται για όλες τις τάξεις, εκτός της τάξης 1). το προστατευτικό περίβλημα ενός laser έχει σκοπό να εμποδίσει την πρόσβαση προς όλα τα εξαρτήματα του laser, εκτός την δέσμης. Δεν πρέπει να αφαιρείτε ποτέ, ούτε να είναι ανοικτό κατά την διάρκεια λειτουργίας του laser.

Δικλείδες ασφαλείας: (τάξεις 3R, 3B,4). Οι δικλείδες εμποδίζουν την λειτουργία του laser όταν το περίβλημα είναι ανοικτό. Ορισμένα συστήματα διαθέτουν κλειδί παράκαμψης των δικλείδων ασφαλείας. Η χρήση αυτού του κλειδιού πρέπει να γίνεται αυστηρά μόνο όταν είναι αναγκαίες εργασίες επισκευής, που προϋποθέτουν την λειτουργία του laser. Αυτές οι εργασίες πρέπει να εκτελούνται με χρήση ατομικών μέτρων προστασίας και από κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό. Το κλειδί δεν πρέπει να παραμένει πάνω στη κλειδαριά αλλά σε μέρος όπου πρόσβαση έχει μόνο ο υπεύθυνος συντήρησης και επισκευής του συστήματος. Τα πρότυπα ασφαλείας, επιτρέπουν την παράκαμψη των δικλείδων ασφαλείας και για απλές εργασίες συντήρησης από τον χρήστη. Αυτό κατά την γνώμη μας δεν είναι ικανοποιητικό, δεδομένου ότι για χάρη της αύξησης της παραγωγικότητας, ο χειριστής εκτίθεται σε κίνδυνο.

Απομακρυσμένες δικλείδες ασφαλείας: (τάξεις 3B και 4). αυτές οι δικλείδες, όμοιες με τις προηγούμενες, μπορούν να συνδεθούν στην είσοδο της ελεγχόμενης περιοχής laser , σε παράθυρα ή με ένα κουμπί κινδύνου. Συνήθως συνδέονται απευθείας με το τροφοδοτικό του συστήματος και διακόπτουν την λειτουργία του σε έκτακτες περιπτώσεις ή κατά την είσοδο μη εξουσιοδοτημένου προσωπικού στην ελεγχόμενη περιοχή. Στην εικόνα 5.2 φαίνεται η αναπαράσταση ενός δωματίου με απομακρυσμένες δικλείδες ασφαλείας.

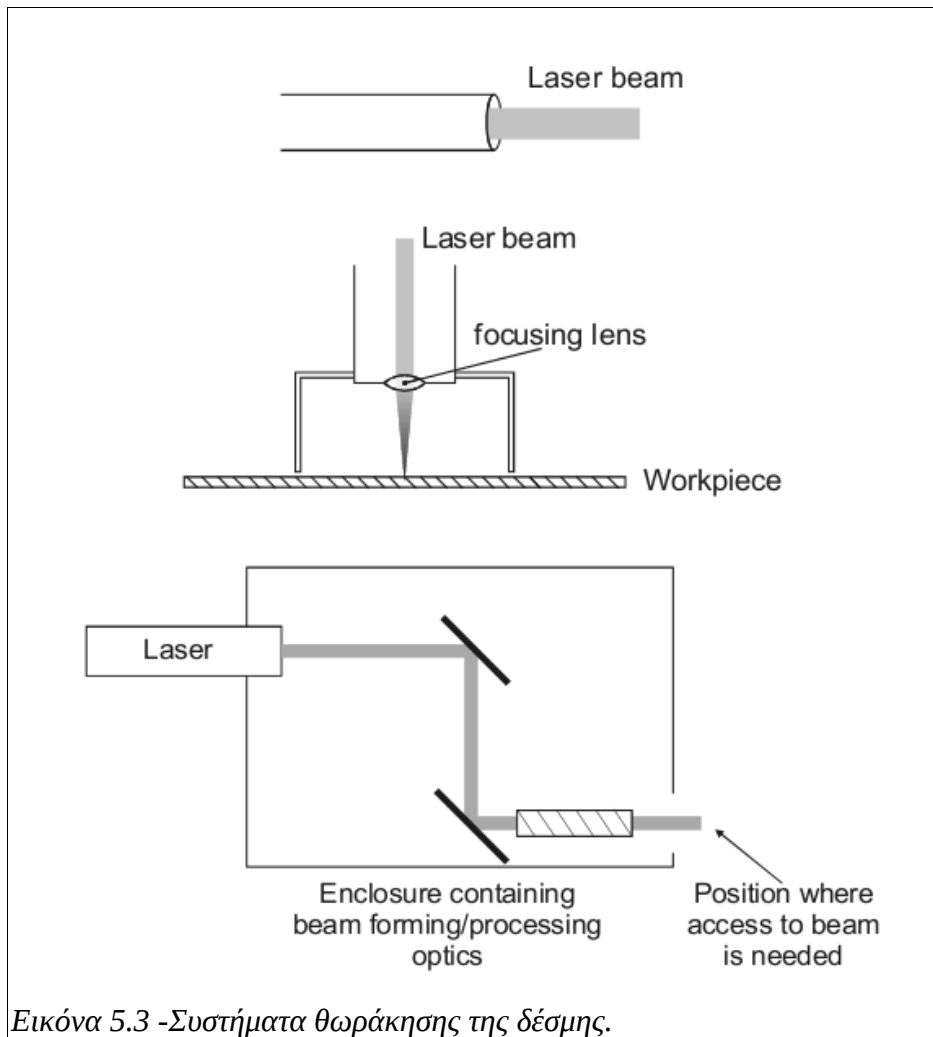
Κλειδί ελέγχου: (τάξεις 3B και 4). συστήματα laser αυτών των τάξεων θέτονται

σε λειτουργίας μόνο με χρήση ειδικού κλειδιού, μοναδικού για κάθε laser. Αυτό διασφαλίζει την χρήση του συστήματος μόνο από τον χρήστη του. Και αυτό το κλειδί δεν πρέπει να παραμένει πάνω στο μηχάνημα αλλά σε μέρος όπου έχει πρόσβαση μόνο ο χρήστης.

Συσκευή προειδοποίησης λειτουργίας (ένδειξη “laser on”): (τάξεις 3B και 4, καθώς και σε αόρατη ακτινοβολία laser τάξης 3R). αυτή η συσκευή αποτελείτε συνήθως από μία φωτεινή ένδειξη ή παράγει ένα προειδοποιητικό ήχο και σηματοδοτεί ότι το laser είναι σε λειτουργία ή είναι έτοιμο για χρήση. Αν πρόκειται για φωτεινή ένδειξη πρέπει να είναι τοποθετημένη σε εμφανές σημείο.

Διακόπτης ή εξασθενητής δέσμης: (τάξεις 3B και 4). μηχανικό κλείστρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διακοπή ή την εξασθένιση της εξόδου του laser όταν δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί ο διακόπτης λειτουργίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για laser όπου χρειάζονται αρκετό χρόνο για να σταθεροποιήσουν την έξοδό τους και η λειτουργία τους πρέπει να διακοπεί προσωρινά.

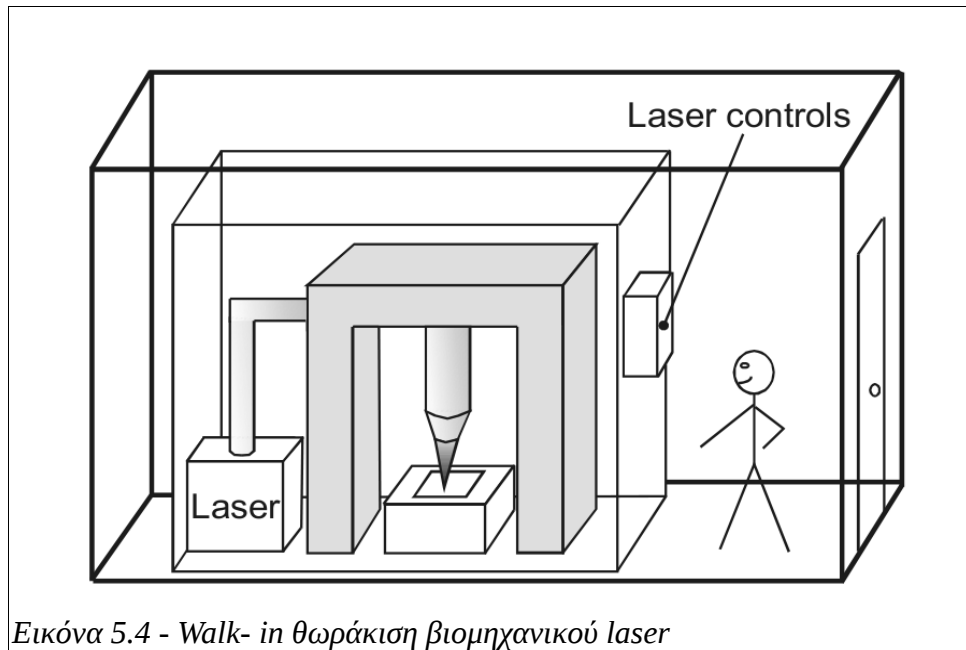
Περίβλημα δέσμης (θωράκιση): αυτά αφορούν την ελαχιστοποίηση της ελεύθερης διαδρομής της δέσμης laser ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα. Στα συστήματα του εμπορίου που διατίθενται για βιομηχανικές χρήσης τα περιβλήματα τοποθετούνται από τον κατασκευαστή. Σε ερευνητικά ιδρύματα όμως πρέπει να τοποθετούνται από τον χρήστη. Όπου δεν είναι δυνατή η συνολική θωράκιση του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες δέσμης και περιβλήματα του σημείου επεξεργασίας (πχ σημείο διάτρησης). Παραδείγματα φαίνονται στη εικόνα 5.3



Εικόνα 5.3 -Συστήματα θωράκισης της δέσμης.

Μεταλλικά υλικά και γυαλί είναι τα συνηθέστερα υλικά των περιβλημάτων. Αυτά πρέπει να διαθέτουν επαρκή οπτική πυκνότητα στο μήκος κύματος του laser, να αντέχουν τη ισχύ της δέσμης χωρίς βλάβες, να είναι σταθερά και συμπαγή.

Για μεγάλες βιομηχανικές εφαρμογές (ανοικτού τύπου συστήματα) χρησιμοποιείται η θωράκιση walk – in. Τα περιβλήματα καλύπτουν ολόκληρο το σύστημα laser ενώ η λειτουργία του ελέγχεται εξωτερικά με την προϋπόθεση βέβαια κανείς να μην είναι στο εσωτερικό του περιβλήματος. Σε αυτές τις εγκαταστάσεις δεν αρκούν οι δικλείδες και τα κλειδιά ασφαλείας καθώς λάθος κινήσεις μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά ατυχήματα. Σαν επιπρόσθετα μέτρα μπορούν να τοποθετηθούν ειδικά παράθυρα, κάμερες η ακόμα και αισθητήρες πίεσης το δάπεδο προκειμένου να εμποδίζεται η λειτουργία του laser αν κάποιος είναι στο εσωτερικό του περιβλήματος.



Εικόνα 5.4 - Walk- in θωράκιση βιομηχανικού laser

5.4 Μέτρα σε επίπεδο οργάνωσης της παραγωγής .

Τα τεχνικά μέτρα ασφαλείας δεν μπορούν να παρέχουν πλήρη προστασία, για αυτό ενισχύονται από τα μέτρα σε επίπεδο οργάνωσης. Τα μέτρα αυτά είναι οι συγκεκριμένες οδηγίες χρήσεις των μηχανημάτων, πιθανά κάποιοι “τοπικοί” κανόνες που αφορούν τον χώρο εργασίας και ονομάζονται Τυποποιημένες Διαδικασίες Λειτουργίας (ΤΔΛ, Standard Operating Procedures). Όλα τα μέτρα αυτά πρέπει να τεκμηριώνονται , να επανεξετάζονται και να ενημερώνονται συχνά.

Οι ΤΔΛ αποτελούνται από κανόνες χρήσης, λειτουργίας και συντήρησης ειδικούς για ένα σύστημα laser ή για μία διαδικασία με χρήση συστήματος laser. Οι ΤΔΛ καθορίζουν τι πρέπει και τι δεν πρέπει να γίνει, την χρονική σειρά κ.α. Άλλες πτυχές της οργάνωσης έχουν να κάνουν με την γενική πολιτική που ακολουθείται σε μία γραμμή παραγωγής, τα κριτήρια και η χορήγηση άδειας στους χρήστες και τους συντηρητές των μηχανημάτων laser, η εκπαίδευση τους κ.α.

Οι ΤΔΛ πρέπει να συνυπολογίζουν πτυχές της αξιολόγησης των κινδύνων που συζητήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτές είναι:

- Το είδος και η τάξη του συστήματος laser καθώς και ιδιαίτερες πλευρές του σχεδιασμού του.
- Την διαδρομή της δέσμης από την πηγή στον στόχο και τα οπτικά μέσα που χρησιμοποιούνται.
- Το εργασιακό περιβάλλον.
- Τους εργαζόμενους με το laser καθώς και όποιο άλλο εργαζόμενο μπορεί να εκτεθεί σε κίνδυνο από το laser.

Ακόμα πρέπει να διευκρινίζονται κι να είναι σε γνώση όλων όσων εμπλέκονται σε διαδικασίες με χρήση laser, τι, που και πότε πρέπει να γίνεται κάθε εργασία. Επίσης πρέπει να απαγορεύονται εργασίες που δεν είναι αναγκαίες αλλά μπορούν να εκθέσουν σε κίνδυνο.

Οι λεπτομέρειες που είναι απαραίτητες για τον καθορισμό των ΤΔΛ ποικίλουν ανάλογα με το είδος της εργασίας. Εάν πρόκειται για επαναλαμβανόμενες διαδικασίες ρουτίνας, τότε μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν λογικές ακολουθίες που πρέπει να ακολουθούνται. Σε ένα ερευνητικό εργαστήριο όμως, αυτό δεν είναι εύκολο. Υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη ευελιξία στον τρόπο που χρησιμοποιείτε το laser. Εκεί πρέπει να διαμορφωθούν γενικοί κανόνες ασφαλείας που πάντα πρέπει να ακολουθούνται. Στα άτομα που εργάζονται (ανεξαρτήτως χώρου εργασίας) με επικίνδυνα συστήματα laser πρέπει να παρέχεται επαρκής εκπαίδευση στην ασφάλεια των laser και να υποχρεώνονται να δουλεύουν κάτω από καλά ορισμένες γραμμές ασφαλείας.

Οι οδηγίες πρέπει να είναι σαφείς και ξεκάθαρες και πρέπει να καλύπτουν θέματα όπως:

- Τα ονόματα και τις κατηγορίες όσων εμπλέκονται στην χρήση του συστήματος laser.
- Τυχόν άδειες και εγκρίσεις που χρειάζονται.
- Τυχόν απαγόρευση της χρήσης από έναν και μόνο εργαζόμενο.
- Περιορισμούς για το που θα πρέπει να χρησιμοποιείτε το laser.

- Οδηγίες χρήσεις των πλήκτρων του μηχανήματος.
- Τυχόν ελέγχων που πρέπει να γίνουν πριν τεθεί σε λειτουργία (σήμανση, παρουσία εξουσιοδοτημένου προσωπικού, ρυθμίσεις συνδέσεις κ.τ.λ.).
- Ατομικά μέτρα προστασίας. (θα τα δούμε παρακάτω)
- Τεχνικοί έλεγχοι. (ευθυγράμμιση τη δέσμης, λειτουργίας δικλίδων, παρουσία περιβλημάτων κ.τ.λ.)
- Ενέργειες ή διαδικασίες που απαγορεύονται ρητά. (φαγητό ή ποτό, εύφλεκτα ρούχα κ.τ.λ.)
- Την διαδικασία έναρξης της λειτουργίας του laser.
- Την διαδικασία τερματισμού της λειτουργίας του laser.
- Τον τρόπο με τον οποί πρέπει να γίνονται τυχόν προσαρμογές κατά την λειτουργία.
- Τα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται σε περίπτωση υποψίας ατυχήματος.

Το μεγαλύτερο μέρος του καθορισμού αυτών των μέτρων αφήνεται στην διοικητική δομή. Οι διαδικασίες αυτές όμως γίνονται με μοναδικό κριτήριο την αύξηση την παραγωγικότητας, ενώ πρέπει να γίνονται με κριτήριο την εκμηδένιση του κινδύνου για τους εργαζόμενους και την βελτίωση των συνθηκών εργασίας. Για την συμμετοχή των εργαζόμενων στις επιτροπές ασφαλείας ισχύουν τα ίδια με αυτά που περιγράφονται στο κεφάλαιο 1.

Σε αντιστοιχία με τη προηγούμενη ενότητα μπορούμε να διακρίνουμε αυτά που πρέπει να ξέρει και να τηρεί ο χειριστής του συστήματος. Τα μέτρα αυτά δεν πρέπει να ξεχνιούνται ούτε να υποτιμούνται.:

- Υπό ποιες συνθήκες (αν υπάρχουν) πρέπει να ανοίγεται το προστατευτικό περίβλημα.
- Την σωστή λειτουργία των δικλίδων ασφαλείας και των κλειδιών παράκαμψης.
- Την σωστή λειτουργία των απομακρυσμένων δικλίδων ασφαλείας συμπεριλαμβανομένων αυτών του κατασκευαστή και αυτών που ίσως έχουν

τοποθετηθεί κατά την εγκατάσταση του συστήματος.

- Τη σωστή χρήση και φύλαξη του κλειδιού λειτουργίας. Είναι κοινό λάθος, για χάρη ευκολίας το κλειδί να μένει πάνω στο μηχάνημα.
- Να έχει υπόψη του την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση της συσκευής προειδοποίησης λειτουργίας.
- Την σωστή χρήση του διακόπτη δέσμης για προσωρινή διακοπή της λειτουργίας.

5.5 Ατομική προστασία.

Τα μέσα ατομικής προστασίας (ΜΑΠ), δηλαδή τα ειδικά γυαλιά και άλλος προστατευτικός ρουχισμός, είναι απαραίτητα όταν τα υπόλοιπα μέτρα ασφαλείας δεν μπορούν να μηδενίσουν το κίνδυνο για τα μάτια και το δέρμα των εργαζομένων. Ωστόσο, η ατομική προστασία δεν πρέπει ποτέ να θεωρείται ως ο ιδανικός τρόπος. Πάντα πρέπει να συνοδεύεται από συνδυασμό όλων των επιπέδων της ασφάλειας.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για να αποφευχθεί η χρήση των ΜΑΠ. Αυτά ίσως παρεμποδίζουν την ικανότητα ενός εργαζομένου να δει καθαρά, να μετακινήσει αντικείμενα ή να χρησιμοποιήσει εργαλεία. Τέτοιοι περιορισμοί σε συνδυασμό με την φθορά των ΜΑΠ μπορούν να δαμάσουν τον εργαζόμενο ώστε να τα αφαιρέσει. Η εμπειρία δείχνει ότι αυτό γίνεται συχνά. Κάτι τέτοιο πρέπει να αποφεύγεται, η χρήση των ΜΑΠ πρέπει να είναι δικαιολογημένη και κατανοητή ως απαραίτητη για την σωματική ακεραιότητα του εργαζομένου. Η εκπαίδευση για την σωστή χρήση των ΜΑΠ καθώς και η αντικατάσταση του φθαρμένου εξοπλισμού είναι αναγκαία.

Η προστασία των ματιών (γυαλιά) είναι η πιο διαδεδομένη και σημαντική. Θα την συζητήσουμε πλήρως στην επόμενη ενότητα. Μάσκες προσώπου (όμοια με εκείνες που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτροσυγκολλήσεις) μερικές φορές χρησιμοποιούνται για την προστασία των ματιών αλλά και του προσώπου. Αυτές είναι χρήσιμα για προστασία από διάχυτη ή ανακλώμενη υπεριώδη ακτινοβολία αλλά είναι ανεπαρκή για προστασία από απευθείας δέσμη ιδίως από laser υψηλής ισχύος.

Ειδικά ενδύματα, συμπεριλαμβανομένων των γαντιών, μπορούν να

χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου οι εργαζόμενοι πρέπει να έχουν τα χέρια τους κοντά στη διαδρομή της δέσμης για προστασία από έκθεση που υπερβαίνει το αντίστοιχο MPE για το δέρμα.

Τα laser που δημιουργούν κινδύνους για το δέρμα, συνήθως δημιουργούν και κίνδυνο πυρκαγιάς, (τάξη 4). ως εκ τούτου οι προστατευτικές ενδυμασίες και τα γάντια πρέπει να είναι ανθεκτικά στην θερμότητα και πυρίμαχα. Σε εργασίες που περιλαμβάνουν έκθεση σε ορατή και υπέρυθη ακτινοβολία, όπου η ακτινοβολήση ξεπερνάει τα 2 W/ cm^2 , ενδείκνυται να φορεθεί ρουχισμός ο οποίος δεν φλέγεται εύκολα, όπως ειδικές πυρίμαχες φόρμες εμπορίου, μάλλινο με πυκνή πλέξη ή μεταξωτό ύφασμα. Όταν η ακτινοβολήση ξεπερνάει τα 10 W/ cm^2 , τέτοιου είδους υφάσματα πρέπει να φορεθούν από όλους τους εμπλεκόμενους σε σύστημα laser τάξης 4.

Μετά από κάποιο αριθμό πλυσιμάτων, ο παραπάνω πυρίμαχος ρουχισμός πρέπει να αντικαθιστάται από καινούργιο, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Το υλικό του ρουχισμού το οποίο του δίνει την ιδιότητα του βραδυφλεγούς (διάφορα χημικά στοιχεία) ξεπλένεται μετά από αρκετό αριθμό πλύσεων. Επίσης ανοίγει το πλέγμα του υφάσματος. Ρουχισμός που αποτελείται από συνθετικά, βαμβακερά και άλλα υφάσματα, δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να χρησιμοποιούνται για προστασία του δέρματος από ακτινοβολία laser. Ακόμα η ενδυμασία πρέπει να προσφέρει όσο το δυνατό μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων και ευελιξία.

5.6 Ειδικά γυαλιά προστασίας.

5.6.1 Γενικά.

Γυαλιά για την προστασία των ματιών χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα των εφαρμογών των laser και είναι αναμφισβήτητα μία από τις πιο σημαντικές πτυχές της ασφάλειας. Η ευρεία αποδοχή των γυαλιών σε συνδυασμό με την ευρεία αποδοχή και γνώση των κινδύνων του εγκυμονούν τα laser για τα μάτια,

υποδηλώνουν ότι είναι και η πιο κατάλληλη ίσως και η μόνη απαραίτητα προστασία. Στην πραγματικότητα αυτό είναι λάθος καθώς, όπως είδαμε παραπάνω τα ΜΑΠ αποτελούν την έσχατη λύση, όταν η ασφαλής χρήση συστημάτων laser δεν μπορεί να εξασφαλισθεί από άλλα μέσα. Η προστασία των ματιών δεν πρέπει ποτέ να αντιμετωπίζεται απομονωμένη από τα υπόλοιπα επίπεδα της προστασίας. Πάραυτα η προστασία των ματιών είναι η μοναδική λύση όταν οι εργαζόμενοι πρέπει να είναι εντός της NHZ (Nomimal Hazard Zone) και δεν είναι εφικτό να αποτρέπεται η επικίνδυνη έκθεση με άλλα μέσα, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές ανακλάσεις και την διαδρομή της δέσμης.

Η χρήση γυαλιών συνίσταται όταν οι παρακάτω τέσσερις συνθήκες πληρούνται:

1. Είναι δικαιολογημένο το ενδεχόμενο έκθεσης των ματιών πάνω από τα ΜΡΕ. Οι εργαζόμενοι δεν πρέπει να υποχρεούνται να φορούν τα γυαλιά όταν δεν χρειάζεται καθώς η μακρά χρήση τους μπορεί να προκαλέσει προσωρινά προβλήματα στην όραση.

2. Έχουν εξαντληθεί τα ενδεχόμενα για επαρκή προστασία από άλλα τεχνικά μέσα όπως περιβλήματα δέσμης κ.τ.λ.

3. Δεν υπάρχει ανάλογος κίνδυνος για το δέρμα. Για παράδειγμα, laser με μέση ή χαμηλή ισχύ δεν είναι τόσο επικίνδυνα για το δέρμα και οι επιπτώσεις στο μάτι είναι πολύ πιο σοβαρές. Αυτό δεν ισχύει όμως για laser τάξης 3B και 4 όπου η χρήση μόνο ΜΑΠ είναι ανεπαρκής.

4. Μπορεί να εξασφαλιστεί το αναγκαίο επίπεδο προστασία των ματιών. Για παράδειγμα αν ο κίνδυνος προέρχεται από δύο ή παραπάνω laser (δύο ή παραπάνω μήκη κύματος), τότε ένα ζευγάρι γυαλιά δεν μπορεί να είναι αποτελεσματικό.

Τα γυαλιά δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιούνται για σκόπιμη απευθείας έκθεση σε ακτινοβολία laser, αλλά μόνο για προστασία από τυχαία έκθεση.

Τα γυαλιά πρέπει να επιθεωρούνται τακτικά για ζημιές οι οποίες μπορούν να υποβαθμίσουν την προστασία που παρέχουν. Τυχόν ελαττώματα πρέπει να διορθώνονται άμεσα και όπου δεν είναι δυνατή η διόρθωση πρέπει να αντικαθίστανται. Γυαλιά τα οποία έχουν εκτεθεί απευθείας στην δέσμη του laser

πρέπει να απορρίπτονται άμεσα και να αντικαθίστανται καθώς το σημείο της ζημιάς είναι πλέον τρωτό. Ακόμα ο σχεδιασμός και οι ιδιότητες των γυαλιών, που είναι διαθέσιμα για χρήση, πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες προστασίας από συγκεκριμένο μήκος κύματος και ισχύ.

Η προστασία που μας προσφέρουν τα γυαλιά οφείλεται στις οπτικές ιδιότητες των φακών τους. Η επιλογή των σωστών ιδιοτήτων για κάθε περίπτωση είναι ζωτικής σημασίας, καθώς είναι συχνό φαινόμενο να χρησιμοποιείται ακατάλληλος εξοπλισμός προστασίας. Τα χαρακτηριστικά των γυαλιών πρέπει να πληρούν δύο προϋποθέσεις: να αποκόπτουν την ακτινοβολία laser από την πορεία της προς το μάτι αλλά και να αφήνουν να περνάει την απαραίτητη ακτινοβολία για να βλέπουμε. Για laser σε μήκη κύματος μακριά από το φάσμα του ορατού, οι δύο προϋποθέσεις εύκολα πληρούνται καθώς υπάρχουν υλικά διαφανή στο ορατό και ταυτόχρονα απορροφούν έντονα στο μακρινό υπέρυθρο ή υπεριώδες (π.χ. γυαλί) . Για ορατά ή κοντά στο ορατό μήκη κύματος , οι δύο προϋποθέσεις γίνονται αντικρουόμενες οπότε πρέπει να επέλθει κάποιος συμβιβασμός. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται διάφοροι τύποι γυαλιών, στις λεζάντες φαίνεται το μήκος κύματος προστασίας και η διαπερατότητα από ορατό φως.





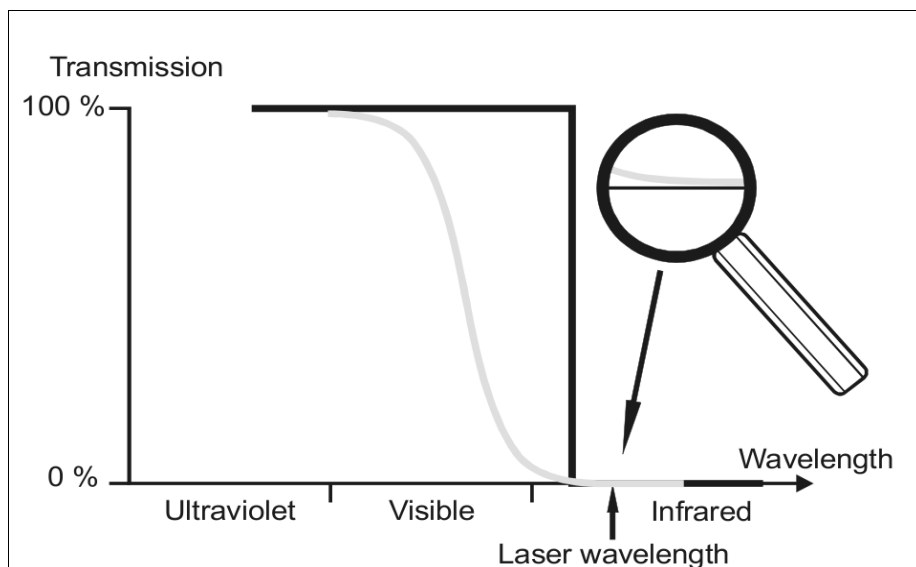
Φιλτράρει στα 655 - 685nm, 36% διαπερατότητα στο ορατό.



Photograph © Copyright of Phillips Safety Products

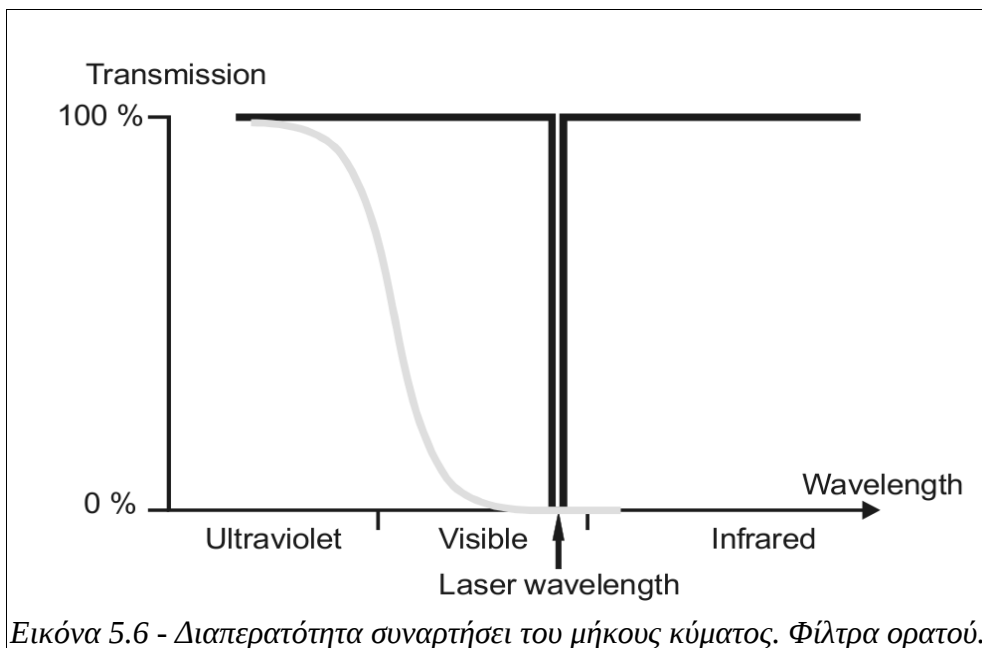
Φιλτράρει στα 190 - 532nm, 46,4% διαπερατότητα στο ορατό.

Στην εικόνα 5.5 φαίνεται το φάσμα ενός φίλτρου που προορίζεται για μήκος κύματος στο κοντινό υπέρυθρο. Η μαύρη καμπύλη απεικονίζει το φάσμα ενός ιδανικού φίλτρου για το οποίο η διαπερατότητα στο ορατό είναι 100% και "κόβεται" στο 0% για το υπέρυθρο. Όσον αφορά το πραγματικό φίλτρο, η διαπερατότητα στο ορατό δεν είναι 100% και αυτό οδηγεί σε μείωση της φωτεινότητας και σε αλλαγή των χρωμάτων που βλέπουμε. Επίσης η καμπύλη τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν, αυτό σημαίνει ότι δεν φιλτράρεται η ακτινοβολία laser στο σύνολό της.



Εικόνα 5.5 - Διαπερατότητα συναρτήσει του μήκους κύματος. Φίλτρα κοντινού υπέρυθρου.

Στην εικόνα 5.6 φαίνονται τα φάσματα ενός ιδανικού και ενός πραγματικού φίλτρου για ένα μήκος κύματος στο ορατό. Βλέπουμε ότι το ιδανικό αποκόπτει επιλεκτικά το μήκος κύματος που θέλουμε ενός αφήνει να περνάνε τα μήκη κύματος σε όλο το υπόλοιπο φάσμα του ορατού. Αυτό πρακτικά είναι αδύνατο. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται φίλτρα όπως αυτό που φαίνεται στο ίδιο σχήμα. Το φίλτρο αυτό παρεμποδίζει σημαντικά την ικανότητά μας να δούμε.



Τα περισσότερα φίλτρα που χρησιμοποιούνται είναι όμοια με αυτά που απεικονίζονται, και απορροφούν την βλαπτική ισχύ του laser. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και ανακλαστικές επιστρώσεις, που προσδίδουν μεγαλύτερη ασφάλεια στα γυαλιά. Σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια του γυαλιού πρέπει να είναι κυρτή έτσι ώστε η ανακλώμενη δέσμη να ανοίγει και άρα να μειώνεται η πυκνότητα ισχύος. Νέοι τύποι γυαλιών είναι υπό ανάπτυξη (optical limiters) που λειτουργούν με ανάλογο τρόπο με τα φωτοχρωμικά γυαλιά ηλίου. Αυτά έχουν την ικανότητα να αλλάζουν τα οπτικά τους χαρακτηριστικά ανάλογα με την ακτινοβολία που δέχονται. Αυτοί οι τύποι γυαλιών μπορούν, εν δυνάμει, να προσφέρουν ικανοποιητική προστασία χωρίς να εμποδίζουν έντονα την φυσιολογική όραση.

5.6.2 Οπτική πυκνότητα.

Η διαπερατότητα ενός υλικού ορίζεται μπορεί να οριστεί με απλά λόγια ως το ποσοστό της ακτινοβολίας που περνάει ως προς την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στο υλικό. Μπορεί να εκφραστεί είτε ποσοστιαία είτε ως καθαρός αριθμός, διαπερατότητα 1 δηλαδή αντιστοιχεί σε διαπερατότητα 100%.

Για να καθορίσουμε το επίπεδο προστασίας των γυαλιών, ένα πιο βολικό μέγεθος είναι η οπτική πυκνότητα (optical density – OD) . Αυτή ορίζεται ως ο αρνητικός λογάριθμος της διαπερατότητας. Είναι δηλαδή η δύναμη του 10 κατά την οποία η ακτινοβολία μειώνεται από το φίλτρο. Οι τάξεις μεγέθους φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

OD	Διαπερατότητα		Μείωση κατά παράγοντα:
0	1	100.00%	10^0
1	0,1	10.00%	10^{-1}
2	0,01	1.00%	10^{-2}
3	0,001	0,1 %	10^{-3}
4	0,0001	0,001 %	10^{-4}
5	0,00001	0,0001 %	10^{-5}
6	0,000001	0,00001 %	10^{-6}
7	0,0000001	0,000001 %	10^{-7}

Ένα φίλτρο με διαπερατότητα 0,1% θα μειώνει την ισχύ της δέσμης κατά 1:1000 φορές και θα έχει οπτική πυκνότητα 3.

Η οπτική πυκνότητα που απαιτείται για να μειώσει τα επικίνδυνα επίπεδα μιας ακτινοβολίας σε ασφαλή, υπολογίζεται με βάση το MPE. Δηλαδή για μία τυχαία δόση ακτινοβολίας E η ελάχιστη διαπερατότητα του φίλτρου πρέπει να είναι:

$$\tau_{\lambda} = \frac{MPE}{E} \quad (5.5)$$

και κατ επέκταση η ελάχιστη οπτική πυκνότητα πρέπει να είναι ίση με:

$$OD = -\log_{10} \tau_{\lambda} = -\log_{10} \left(\frac{MPE}{E} \right) \quad (5.6)$$

όπου η δόση και το MPE πρέπει να εκφράζονται στις ίδιες μονάδες και

υπολογίζονται για την ίδιο χρόνο έκθεσης. Όπως είπαμε και στο κεφάλαιο 4 για να υπολογίσουμε την δόση πρέπει πάντα να παίρνουμε υπόψη μας την χειρότερη περίπτωση.

Η οπτική πυκνότητα όμως δεν είναι η μοναδική σημαντική παράμετρος για την επιλογή των γυαλιών. Το κατώφλι ζημιάς και η διαπερατότητα στο ορατό είναι εξίσου σημαντικά.

5.6.3 Κατώφλι ζημιάς.

Το φιλτράρισμα στα γυαλιά προστασίας, οφείλεται περισσότερο σε απορρόφηση παρά σε ανάκλαση του φωτός. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που χάνεται μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στο υλικό. Τα προστατευτικά γυαλιά λοιπόν κρίνονται και από το πόση ενέργεια αντέχουν. Μέχρι να επέλθει αστοχία (τήξη, φλόγα κ.τ.λ.), αυτό το όριο ονομάζεται κατώφλι ζημιάς.

Η οπτική πυκνότητα και το κατώφλι ζημιάς δεν σχετίζονται μεταξύ τους. Ένας απορροφητής με $OD = 3$ και ένας με $OD = 6$ απορροφούν παρόμοιο ποσοστό ενέργειας κοντά στο 99,9 %. αυτοί οι δύο απορροφητές μπορεί να έχουν και παραπλήσια κατώφλια ζημιάς, εάν είναι από το ίδιο υλικό και με το ίδιο πάχος και η διαφορετική απορρόφηση οφείλεται σε διαφορετικές συγκεντρώσεις βαφής.

Πρακτικά, η αντοχή του φίλτρου μας σε υψηλές ενέργειες δεν μας περιορίζει και τόσο. Αυτό συμβαίνει διότι, τα επίπεδα της ισχύος που ξεπερνάνε το κατώφλι για τα προστατευτικά γυαλιά, είναι εξίσου επικίνδυνα για το δέρμα. Όπως έχουμε πει πιο πάνω, όταν τα επίπεδα της έκθεσης ξεπερνάνε τα MPE για το δέρμα, δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν γυαλιά για τα μάτια αλλά πολύ πιο δραστικά μέτρα ασφαλείας.

5.6.4 Διαπερατότητα στο ορατό.

Δεδομένου ότι κατά την διάρκεια της εργασίας, ο εργαζόμενος πρέπει να είναι σε θέση να βλέπει όσο πιο καθαρά γίνεται, η οπτική πυκνότητα και το κατώφλι ζημιάς δεν χρησιμεύουν εάν εμποδίζεται η όραση από τα προστατευτικά γυαλιά.

Όπως είδαμε παραπάνω, τα φίλτρα, ακόμα και αν προορίζονται για μήκη κύματος εκτός του φάσματος του ορατού, μπορούν να μειώσουν το επίπεδο του

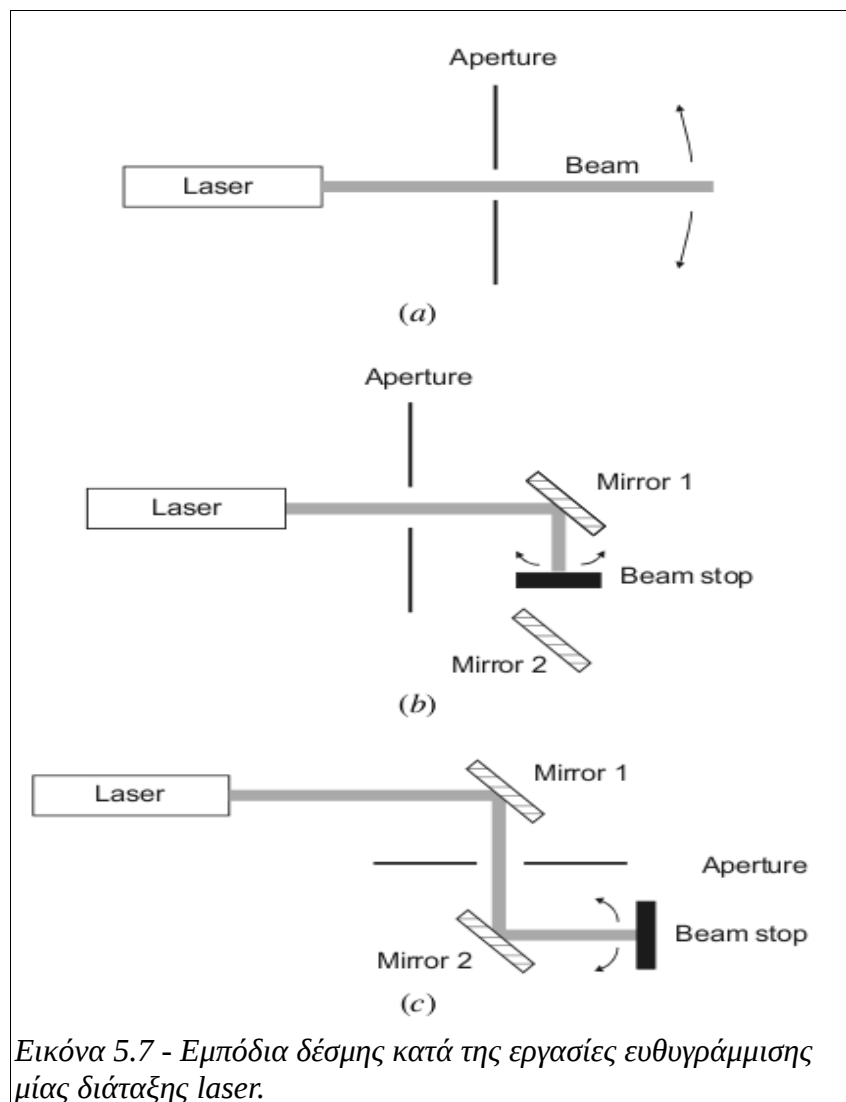
ορατού φωτός που έρχεται στα μάτια μας. Στα προστατευτικά γυαλιά του εμπορίου υπάρχουν οι αντίστοιχες ενδείξεις π.χ. “60% διαπερατότητα” που σημαίνει ότι “κόβει” το 40% της ορατής ακτινοβολίας. Διαπερατότητες άνω του 30% θεωρούνται ικανοποιητικές ενώ κάτω αυτού του ορίου πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά δεδομένου ότι επιβάλουν πολύ μεγάλη απώλεια οπτικής ικανότητας, εκτός βέβαια εάν χρησιμοποιούνται κάτω από συνθήκες καλού φωτισμού. Μπορούν ακόμα να αλλάξουν την χρωματική εμφάνιση διάφορων αντικειμένων και να μειώσουν την ικανότητα αναγνώρισης χρωμάτων καθώς αφαιρούν λιγότερο ή περισσότερο ορισμένα τμήματα του ορατού από κάποια άλλα.

Σε γενικές γραμμές όσο αυξάνει η OD τόσο μειώνεται η διαπερατότητα. Η χρήση προστατευτικών υψηλότερης OD από αυτή που χρειάζεται έχει σημαντικά μειονεκτήματα και σίγουρα δεν ωφελεί παραπάνω. Γι αυτό το λόγο για κάθε περίπτωση πρέπει να βρίσκεται η “χρυσή τομή” .

5.7 Εργασίες συντήρησης και επισκευής.

Κατά τις εργασίες επισκευής, συντήρησης ή βαθμονόμησης ενός συστήματος laser ο κίνδυνος έκθεσης στην ακτινοβολία του μεγαλώνει. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά κανόνα πρέπει να αφαιρεθούν τα προστατευτικά καλύμματα και γενικότερα, ένα μέρος ή όλα τα τεχνικά μέτρα ασφαλείας του μηχανήματος πρέπει να παρακαμφθούν.

Για εργασίες πολύωρες ή μεγάλης έκτασης, πρέπει να δημιουργηθεί μία επιπλέον, προσωρινή, ελεγχόμενη περιοχή. Σε αυτή την προσωρινή ελεγχόμενη περιοχή, να απαγορεύεται ρητά η παρουσία προσώπων άσχετων με την σχετική εργασία επισκευής. Ακόμα ειδικοί απορροφητές και εμπόδια της δέσμης πρέπει να παρεμβάλλονται καθ όλη την διαδικασία, για την προστασία του εργαζόμενου που την εκτελεί. Στο σχήμα φαίνεται πως και που πρέπει να αποκόπτεται η πορεία της δέσμης για ένα παράδειγμα διάταξης.



Εικόνα 5.7 - Εμπόδια δέσμης κατά της εργασίες ευθυγράμμισης μιας διάταξης laser.

Τέλος, οι εργασίες επισκευής πρέπει να διεξάγονται, αυστηρά, από εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο είναι άρτια εκπαιδευμένο σε θέματα ασφαλείας.

5.8 Τεχνικός Ασφάλειας Laser, εκπαίδευση και ανθρώπινος παράγοντας.

5.8.1 Ο ρόλος του Τεχνικού Ασφάλειας Laser.

Τα διεθνή πρότυπα απαιτούν την ύπαρξη Τεχνικού Ασφαλείας Laser (TAL) σε επιχειρήσεις ή ερευνητικά και εκπαιδευτικά ιδρύματα στα οποία χρησιμοποιούνται laser τάξης 3B και 4 καθώς και τάξης 3R με αόρατο μήκος κύματος. Ένας TAL

μπορεί επίσης να είναι χρήσιμος για την επίβλεψη της χρήσης μεγεθυντικών οπτικών μέσων για laser τάξης 1M ή 2M. Παρά τις συστάσεις των διεθνών προτύπων, στην χώρα μας δεν υπάρχει κάποια νομοθετική ρύθμιση που να καθορίζει την ανάγκη πρόσληψης ενός TAL.

Ο TAL έχει την ευθύνη της τήρησης τεχνικών και ατομικών των μέτρων ασφάλειας που αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση, να τηρούνται οι ΤΔΛ καθώς και να συμμετέχει στον καθορισμό τους από την σκοπιά της ασφάλειας των εργαζομένων που εμπλέκονται. Ο ρόλος του όμως ερμηνεύεται με διαφορετικούς τρόπους ανά χώρα και ανά επιχείρηση.

Σε ορισμένες χώρες (π.χ. Ηνωμένες Πολιτείες) στον TAL δίδεται σχεδόν αποκλειστικά η αρμοδιότητα να καθορίζει του απαραίτητους ελέγχους, να διαμορφώνει τις συνθήκες εργασίας και τις διαδικασίες χρήσεις του laser. Αυτό βέβαια, δεν λειτουργεί πάντα υπέρ της ασφαλούς χρήσης και της υγείας των εργαζομένων. Κατά την γνώμη μας, η συμμετοχή των ίδιων σε τέτοιες αποφάσεις, μαζί με την επιστημονική γνώση και την γνώση των κανονισμών του TAL, είναι απαραίτητη. Σε άλλες περιπτώσεις ο ρόλος του TAL περιορίζεται μόνο σε συμβουλές για την καλή χρήση των μέσων ασφάλειας και στην τήρηση αρχείων. Βέβαια και η δουλειά γραφείου στην τήρηση αρχείων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Εκτός από τον κατάλογο των laser που διαθέτει μια επιχείρηση μπορεί να κρατά αρχείο ατυχημάτων. Πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες εκδηλώθηκε ατύχημα, το μέγεθος της καταστροφής στο χώρο (π.χ. πυρκαγιά) αλλά κυρίως πληροφορίες που αφορούν τις επιπτώσεις στους εργαζομένους αλλά και την αποτελεσματικότητα των μέτρων, είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την παραπέρα μελέτη και την βελτίωση των μέτρων προστασίας.

Υπάρχουν δύο ζητήματα που αφορούν το ρόλο του Τεχνικού Ασφάλειας Laser και θέλουμε να θίξουμε. Το πρώτο αφορά την ευθύνη του εργοδότη. Σε καμία περίπτωση δεν υπονοούμε ότι ο TAL είναι υπεύθυνος για κάθε περιστατικό, ο ρόλος του είναι να κάνει την δουλειά του σύμφωνα με τις επιστημονικές του γνώσεις και να τις υποτάσσει προς όφελος των υπόλοιπων εργαζομένων. Την κύρια ευθύνη την έχει ο εργοδότης διότι τις περισσότερες φορές η τήρηση των κανόνων ασφάλειας έρχεται σε αντιπαράθεση με την αύξηση της παραγωγικότητας της εργασίας και κατ

επέκταση με την αύξηση των κερδών του.

Το δεύτερο ζήτημα αφορά την εκπαίδευση και την ειδίκευση του. Σίγουρα πρέπει να απαιτηθεί να διακατέχει τις βασικές αρχές της τεχνολογίας των laser, της οπτικής, βιοφυσικής και τις υπόλοιπες πτυχές της φυσικής που εμπλέκονται. Σίγουρα πρέπει να γνωρίζει τις τεχνικές μέτρησης της ακτινοβολίας laser καθώς και τους κανόνες ασφάλειας που περιγράφονται στα διεθνή πρότυπα. Παρακάτω, όμως αναφέρονται πιο συγκεντρωμένες τις ελάχιστες γνώσεις που πρέπει να έχει. Σε περαιτέρω καταγραφή των επιστημονικών γνώσεων που απαιτούνται δεν μπορούμε να επεκταθούμε στα επίπεδα της παρούσας εργασίας.

5.8.2 Εκπαίδευση εργαζομένων σε θέματα ασφάλειας.

Σε αυτή την ενότητα θα αναφέρουμε τα ελάχιστα επίπεδα γνώσεων που απαιτούνται για την ασφαλή χρήση των laser. Σε καμία περίπτωση αυτές οι ελάχιστες απαιτήσεις δεν πρέπει να λειτουργήσουν περιοριστικά, όσο καλύτερη είναι η εκπαίδευση των εργαζομένων, ειδικά αυτών που αποκαλούμε “εξειδικευμένο προσωπικό” τόσο βαθύτερη είναι η κατανόηση των μέτρων προστασίας.

Εκπαίδευση πάνω σε θέματα ασφάλειας των laser, απαιτείται για όλους όσους εμπλέκονται με την εργασία τους με αυτά και υπάρχει η πιθανότητα να εκτεθούν σε κίνδυνο. Αυτό περιλαμβάνει συνήθως εργαζόμενους με συστήματα των τάξεων 3B, 4 και αόρατο laser τάξης 3R. . Μπορεί επίσης να περιλάβει και εμπλεκόμενους με χαμηλότερης τάξης συστήματα όταν αυτά περιλαμβάνουν ενισχυτικά οπτικά μέσα.

Όλοι όσοι εμπλέκονται πρέπει , κωδικοποιημένα, να έχουν τις εξής βασικές γνώσεις:

- Την φύση της ακτινοβολίας laser, ως μη ιοντίζουσα ακτινοβολία, με τις ιδιότητες που αναφέρουμε στο 2ο κεφάλαιο. Δεν πρέπει να συγχέεται η ακτινοβολία laser με ιοντίζουσες ακτινοβολίες όπως η ακτίνες X κ.τ.λ. Στην καθομιλουμένη η έννοια “ακτινοβολία” ταυτίζεται με την ακτινοβολία που προέρχεται από ραδιενεργές πηγές, η οποία έχει τελείως διαφορετικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.
- Τα χαρακτηριστικά της δέσμης laser και πως αυτή μπορεί να γίνει επικίνδυνη, εαν “ξεφύγει” από την καθορισμένη της διαδρομή

(ανακλάσεις). Επίσης πρέπει να είναι κατανοητή η έννοια της ελεγχόμενης περιοχής laser.

- Τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας laser στον ανθρώπινο οργανισμό, καθώς και άλλους κινδύνους που συνδέονται με την λειτουργία του συστήματος laser.
- Την κατηγοριοποίηση των συστημάτων laser και την σημασία κάθε κατηγορίας.
- Την έννοια των προειδοποιητικών σημάτων.
- Τις οδηγίες χρήσης. Εδώ περιλαμβάνονται οι βασικές οδηγίες χρήσης του μηχανήματος, η λειτουργία των τεχνικών μέτρων ασφάλειας, οι ΤΔΛ.
- Τις διαδικασίες επισκευής και των ειδικών μέτρων που πρέπει να λαμβάνονται κατά την εκτέλεσή τους
- Την χρήση και την σημασία των ατομικών μέτρων προστασίας.
- Τι πρέπει να γίνει σε περίπτωση βλάβης.
- Τι πρέπει να κάνει σε περίπτωση που υπάρχει υποψία έκθεσης στην ακτινοβολία.

Όσον αφορά την εκπαίδευση που πρέπει να έχει ο ΤΑΛ, απαιτούνται περισσότερες γνώσεις που προστίθενται στις παραπάνω βασικές :

- Καλή γνώση των ιδιοτήτων τις δέσμης του laser.
- Να γνωρίζει το μήκος κύματος που εκπέμπει το laser ή τα laser που χρησιμοποιούνται και σε ποιο φάσμα ανήκουν.
- Να γνωρίζει ποιοι ιστοί μπορούν να τραυματιστούν και με ποιον τρόπο από το συγκεκριμένο laser.
- Να έχει την δυνατότητα να διεξάγει μετρήσεις
- Να γνωρίζει ή να μπορεί να υπολογίσει τα MPE και αν μια τυχαία έκθεση τα ξεπερνάει. Να μπορεί να εκτιμήσει την έκταση του τραυματισμού σε περίπτωση έκθεσης.

- Να μπορεί να καθορίσει την ελεγχόμενη περιοχή laser.
- Να γνωρίζει του επιπρόσθετους κινδύνους κατά τις εργασίες συντήρησης και επισκευής.
- Να μπορεί να εκτιμήσει τους κινδύνους και την έκταση τους σε περιπτώσεις είτε κανονικής χρήσης είτε βλάβης και κακής χρήσης.
- Να γνωρίζει την υπάρχουσα νομοθεσία και κανονισμούς γενικά για την ασφάλεια και την υγεία.
- Να μπορεί να σχεδιάσει τους απαραίτητους ελέγχους και διαδικασίες λειτουργίας και συντήρησης ώστε να εξαλείφονται οι κίνδυνοι στην πηγή τους (όπου αυτό είναι δυνατό) ή να ελαχιστοποιούνται.
- Να μπορεί να επιλέξει τα κατάλληλα μέτρα ατομικής προστασίας ανάλογα με το σύστημα laser που χρησιμοποιείται.
- Να μπορεί να παρακολουθεί τις εξελίξεις και όσο αφορά την ανάπτυξη της τεχνολογίας των laser και όσο αφορά την ασφάλεια.

Η εκπαίδευση έχει ιδιαίτερη σχέση και με τα θέματα που προκύπτουν από τον ανθρώπινο παράγοντα.

5.8.3 Ανθρώπινος παράγοντας – συνθήκες εργασίας.

Ζητήματα τα οποία επηρεάζουν την συμπεριφορά και τις συνθήκες εργασίας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον τρόπο που οι άνθρωποι αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο. Ο τρόπος που οι άνθρωποι εργάζονται καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις εμπειρίες τους, τις αντιλήψεις και τις ικανότητες τους. Αυτά είναι τα προσωπικά χαρακτηριστικά. Η φύση της εργασίας, τα εργαλεία και ο εξοπλισμός επίσης επηρεάζουν τον τρόπο που εργάζονται. Επιπλέον τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στο χώρο εργασίας, οι συνθήκες εργασίας, η κόπωση, η πίεση, το άγχος επηρεάζουν έντονα τον τρόπο που δουλεύουν. Αυτοί είναι παράγοντες εργασίας.

Οι άνθρωποι δεν είναι μηχανές. Δεν είναι γεννημένοι και κατασκευασμένοι για να συμπεριφέρονται με όμοιο τρόπο σε όμοιες περιστάσεις. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν την συμπεριφορά τους και δημιουργούν τον απρόβλεπτο

ανθρώπινο παράγοντα στα θέματα ασφαλείας

Από την μία η απλή ενημέρωση και εκπαίδευση δεν επαρκούν για να ικανοποιείται η ασφαλής και υγιεινή εργασία. Είναι αδύνατο να διαμορφωθεί σωστή αντίληψη για τον κίνδυνο, απλά εξηγώντας τι πρέπει να γίνει χωρίς μια λογική αιτιολόγηση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποτίμηση των κινδύνων και θεώρηση κάποιων μέτρων ασφαλείας ως τυπικά και άρα περιττά.

Από την άλλη όταν δεν υπάρχει ούτε η βασική εκπαίδευση, οι εργαζόμενοι αναγκάζονται να “μάθουν” από την εμπειρία τους με την πάροδο του χρόνου πολλές φορές με τραγικές συνέπειες. Ακόμα ελλιπή εκπαίδευση μπορεί να οδηγήσει σε αδικαιολόγητο φόβο ειδικά όταν πρόκειται για συστήματα νέας και άγνωστης τεχνολογίας.

Άλλοι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν ατυχήματα είναι οι απρόσεκτοι έλεγχοι, η απόσπαση της προσοχής, η κόπωση, η μη έγκαιρη επισκευή ή αντικατάσταση φθαρμένου εξοπλισμού κ.α. Οι έλεγχοι πρέπει να επαναλαμβάνονται τακτικά. Οι συνθήκες εργασίας πρέπει να ακολουθούν κανονισμούς που να μην επιτρέπουν το συνωστισμό εργαζομένων, να προβλέπουν κατάλληλα διαλείμματα και εναλλαγές εργασιών, να τηρούνται τα ωράρια εργασίας, να μη υπάρχει πίεση για αύξηση της παραγωγικότητας.

Όλα αυτά και άλλα ζητήματα που αφορούν τους χώρους εργασίας δεν μπορούν να λυθούν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Είναι ζητήματα της βελτίωσης της ζωής των εργαζομένων, ζητήματα ταξικής πάλης. Η κατάκτηση ασφαλών και υγιεινών συνθηκών είναι στα χέρια του εργατικού κινήματος. Από την μεριά μας, μπορούμε να δώσουμε τα κατάλληλα επιστημονικά εφόδια ώστε αυτό να γίνει πράξη.

Κεφάλαιο 6 – Παρατηρήσεις και συμπεράσματα από χώρους εργασίας και εργαστήρια του Ε.Μ.Π..

6.1 Επισκέψεις σε χώρους εργασίας.

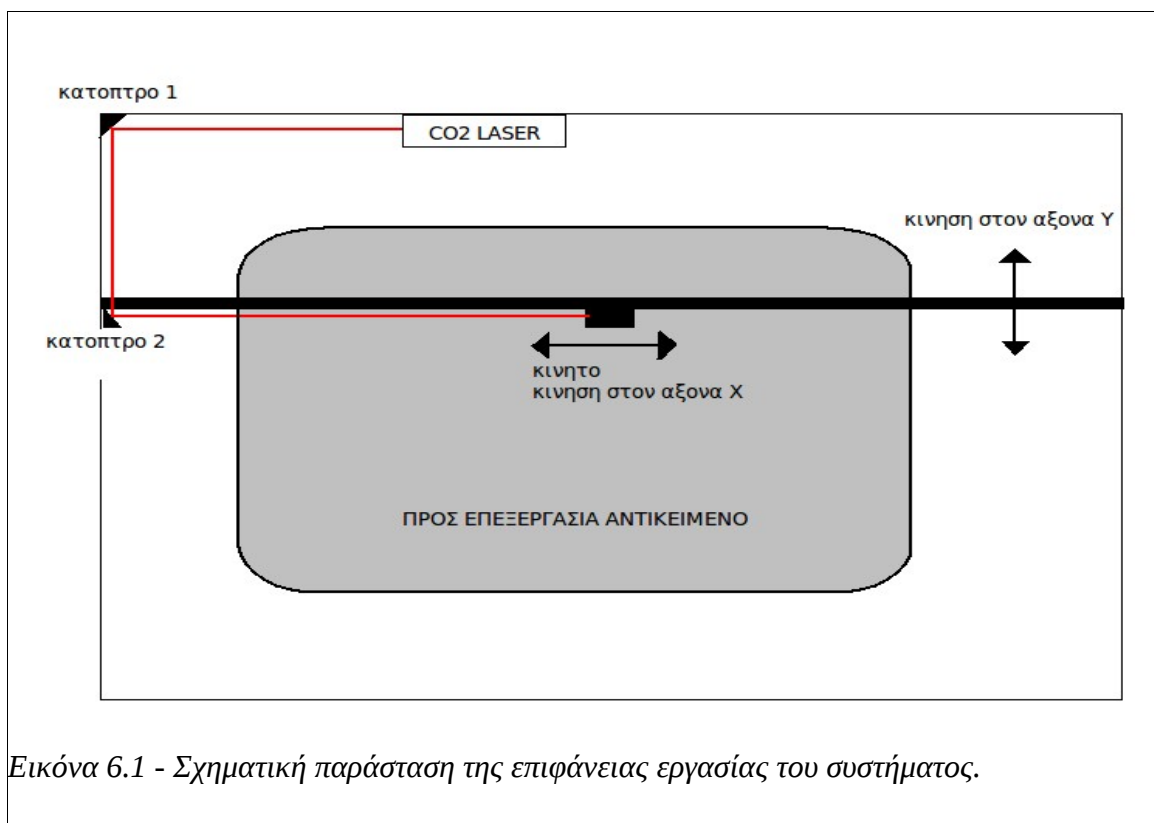
Πραγματοποιήσαμε επισκέψεις σε χώρους εργασίας που κυρίως περιλαμβάνουν βιοτεχνίες κατεργασίας διάφορων υλικών όπως μέταλλα, ξύλο, plexiglas κτλ. Στου περισσότερους χώρους, σαν πρώτη εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε την πλήρη εναρμόνιση με τα διεθνή πρότυπα των μηχανημάτων. (τεχνικά μέτρα ασφάλειας) Τα συστήματα laser εισάγονται κυρίως από εταιρίες αμερικανικών συμφερόντων για αυτό και υπόκεινται στις διατάξεις του ANSI. Τα μηχανήματα που μπορέσαμε να δούμε, ήταν όλα “κλειστού τύπου”. Με τον όρο αυτό εννοούμε ότι όλο το σύστημα και το υλικό προς επεξεργασία περικλείεται μέσα σε προστατευτικά καλύμματα από ειδικό υλικό που σταματάει την ακτινοβολία του laser.

Η ασφάλεια που εξασφαλίζεται κατασκευαστικά σε αυτά τα συστήματα δεν είναι απόλυτη. Χαρακτηριστικά, στα εγχειρίδια των μηχανημάτων περιγράφεται ότι μπορούν να αφαιρεθούν τα προστατευτικά καλύμματα έτσι ώστε να μεγαλώσει η επιφάνεια εργασίας. Οποιαδήποτε τροποποίηση μπορεί να γίνει εύκολα, χωρίς να υπόκειται σε κανένα έλεγχο ασφαλείας και προφανώς χωρίς την ευθύνη της κατασκευάστριας εταιρίας. Ελλείψει ελέγχου ασφαλείας μετά από τέτοιου είδους τροποποιήσεις μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρούς τραυματισμούς και επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων.

Ακόμα παρατηρήθηκε η έλλειψη εκπαίδευσης από τους χειριστές των μηχανημάτων όσον αφορά τα μέτρα ασφαλείας, είτε τα ατομικά είτε αυτά που αφορούν την ελεγχόμενη περιοχή και τα μέτρα οργάνωσης. Εκφράστηκαν φόβοι και απορίες από τους εργαζομένους για την ασφαλή χρήση των συστημάτων, τις τυχόν επιπτώσεις που θα έχει η έκθεσή τους στην ακτινοβολία, την αποτελεσματικότητα των μοναδικών μέτρων ασφαλείας που είχαν στην διάθεσή τους, δηλαδή τα γυαλιά, και γενικά για τους κινδύνους που υπάρχουν. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ακόμα και στοιχειώδη μέτρα ασφαλείας δεν ακολουθούνταν όπως η χρήση γυαλιών

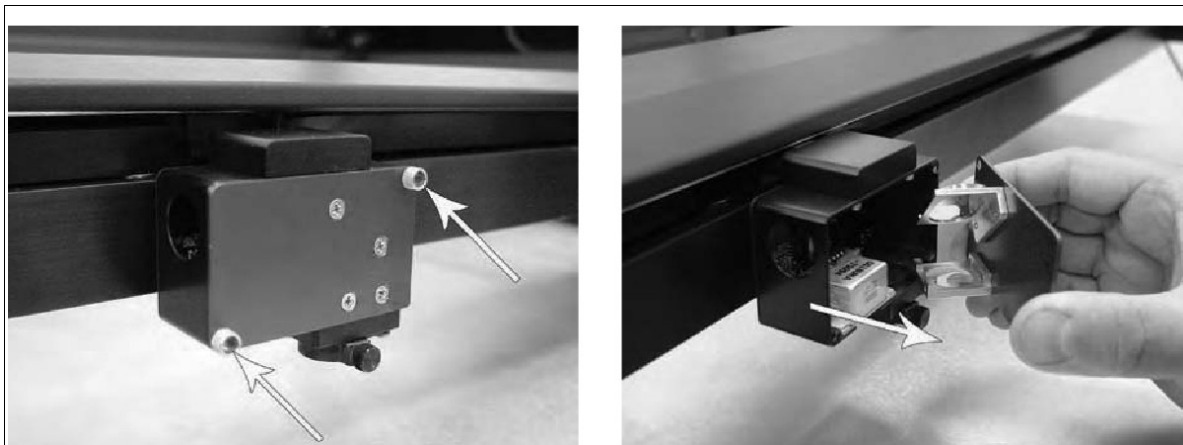
και η καθαρότητα του χώρου από υλικά που μπορούν να αναφλεχθούν με την έκθεσή τους στην δέσμη. Δεν υπήρχαν χωρίσματα ασφαλείας που απομονώνουν τον χώρο εργασίας του συστήματος laser, ούτε ειδική σήμανση. Η πυρασφάλεια σε γενικές γραμμές ήταν ικανοποιητική.

Σε μία περίπτωση, σύμφωνα με μαρτυρία του χειριστή του μηχανήματος, παρατηρήθηκε καπνός και αμέσως διακόπηκε η εργασία. Αιτία της διαρροής ήταν η χαλάρωση των βιδών που συγκρατούσαν σταθερό το κάτοπτρο 2 (βλ. Σχήμα). Ελάχιστη μεταβολή στην κλίση του κατόπτρου, έστειλε την δέσμη εκτός του κατόπτρου που βρίσκεται μέσα στο κινητό, όταν το κινητό βρισκόταν στην δεξιά άκρη του άξονα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η δέσμη του τάξης 4, CO₂ laser, να τήξει

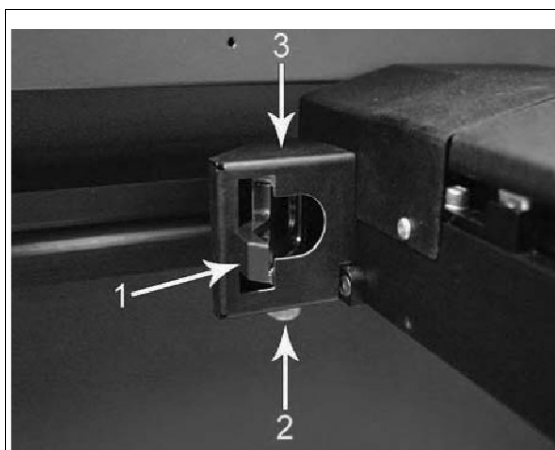


Εικόνα 6.1 - Σχηματική παράσταση της επιφάνειας εργασίας του συστήματος.

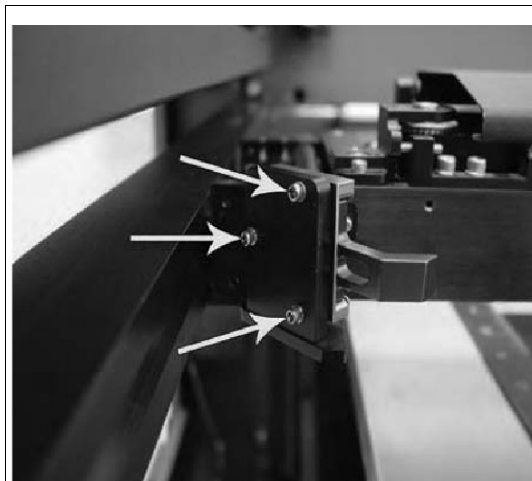
την μπογιά στο μεταλλικό μέρος του κινητού και να προκληθεί η απελευθέρωση του καπνού. Ο διακόπτης κινδύνου που περιλάμβανε το μηχανήμα, απέτρεψε την μεγιστοποίηση της ζημιάς.



Εικόνα 6.2 - Το κινητό μέρος, διακρίνονται το κάτοπτρο 2 και ο φακός εστίασης της δέσμης. Οι φωτογραφίες προέρχονται από το manual του μηχανήματος.



Εικόνα 6.3- Το κάτοπτρο 1. (αγνοήστε τους αριθμούς)



Εικόνα 6.4 - Το κάτοπτρο 1, πίσω όψη.

Στο σύνολό τους, τα μέτρα ασφαλείας που περιγράφονται στο κεφάλαιο 5 πρέπει να τηρούνται, για την αποφυγή κάθε είδους ατυχήματος. Σε πρώτη φάση θα προτείνουμε να τοποθετηθούν τα μηχανήματα σε χώρους καθαρούς από εύφλεκτα υλικά και αν αυτό δεν είναι δυνατό, τον διαχωρισμό της ελεγχόμενης περιοχής λειτουργίας του μηχανήματος με ειδικές κουρτίνες ασφαλείας. Χρειάζεται συχνός έλεγχος συντήρησης του συστήματος γιατί όπως είδαμε, μικρές αποκλίσεις μπορούν να γίνουν επιζήμιες. Πρέπει να τοποθετηθεί κατάλληλη σήμανση. Τέλος πρέπει να υπάρξει μέριμνα για την εκπαίδευση των εργαζομένων στα θέματα ασφαλείας και έλεγχος για την τήρησή τους.

6.2 Επισκέψεις σε συστήματα κοπής και εργαστήρια εντός Ε.Μ.Π.

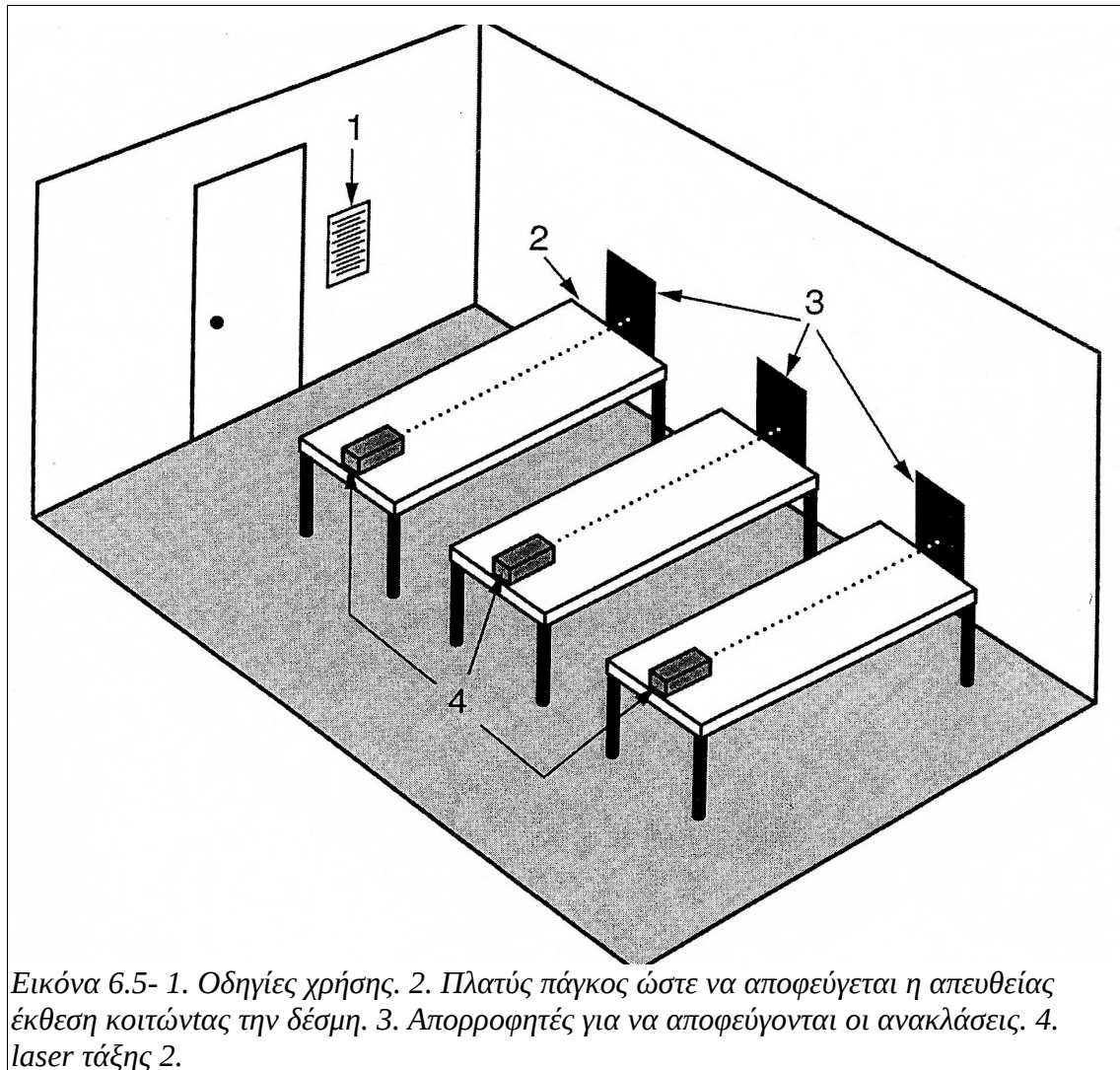
Επισκεφτήκαμε τα εργαστήρια της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Εκεί χρησιμοποιούνται ένα σύστημα κοπής με laser CO₂ εμπορικού τύπου τελευταίας τεχνολογίας (τάξη 4) για κοπή δοκιμίων από plexiglass, ξύλο κτλ και ένα laser CO₂ για κοπή χαρτιού και κατασκευή τρισδιάστατων δοκιμίων με μέθοδο αντίστροφης τομογραφίας. Επίσης χρησιμοποιούνται συστήματα laser He-Ne για ολογραφικές απεικονίσεις, μετρήσεις αποστάσεων κ.α., τάξης 2. Μία γενική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι η απουσία σήμανσης των χώρων.

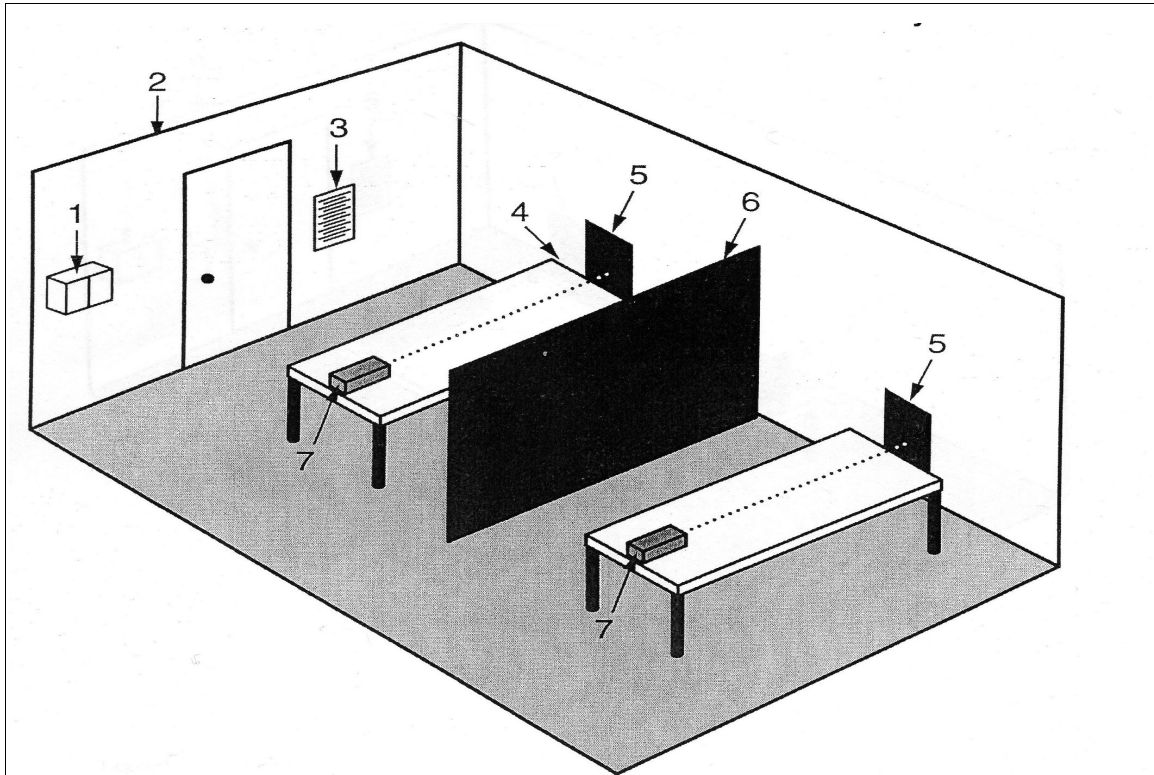
- Στο πρώτο σύστημα χρησιμοποιείται παράλληλα και laser He-Ne, ισχύος εξόδου 5mW ως δέσμη οδηγός. Η ισχύς εξόδου του CO₂ laser είναι στα 50W. Το μηχάνημα κατασκευαστικά περιλαμβάνει σήματα κινδύνου, προστατευτικά καλύμματα και εξαερισμό της επιφάνειας εργασίας. Δεν περιλαμβάνει όμως διακόπτη κινδύνου και δεν συνοδεύεται από τα κατάλληλα γυαλιά προστασίας. Ο χώρος δίπλα από το μηχάνημα είναι γεμάτος με μεταλλικά εργαλεία και μηχανήματα, πιθανές ανακλαστικές επιφάνειες, εάν υπάρξει διαρροή. Διαπιστώθηκε ελλιπής καθαρισμός της επιφάνειας εργασίας με αποτέλεσμα παράγωγα της κοπής μετά από κακή χρήση να έχουν κατακαθίσει στο εσωτερικό της επιφάνειας εργασίας. Αυτό δημιουργεί μεγάλο κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιάς. Κατάλληλα μέτρα πυρασφάλειας δεν υπήρχαν σε κοντινή απόσταση από το σύστημα. Προτείνεται η χωροθέτηση του χώρου όπου λειτουργεί το μηχάνημα, τοποθέτηση σημάτων και πυροσβεστήρα δίπλα στο μηχάνημα. Ακόμα προτείνεται η κατασκευή διακόπτη ασφαλείας στην παροχή ρεύματος και η άμεση προμήθεια γυαλιών με OD= 7+. Το συγκεκριμένο μηχάνημα πρέπει πάντα να λειτουργεί υπό την επίβλεψη του υπευθύνου το εργαστηρίου.

- Το δεύτερο μηχάνημα δίνει ισχύ εξόδου περί τα 7W. Περιλαμβάνει διακόπτη κινδύνου και τα κατάλληλα γυαλιά. Πάραυτα πρέπει να τοποθετηθούν σήματα στην είσοδο του εργαστηρίου και να ληφθούν μέτρα πυρασφάλειας.

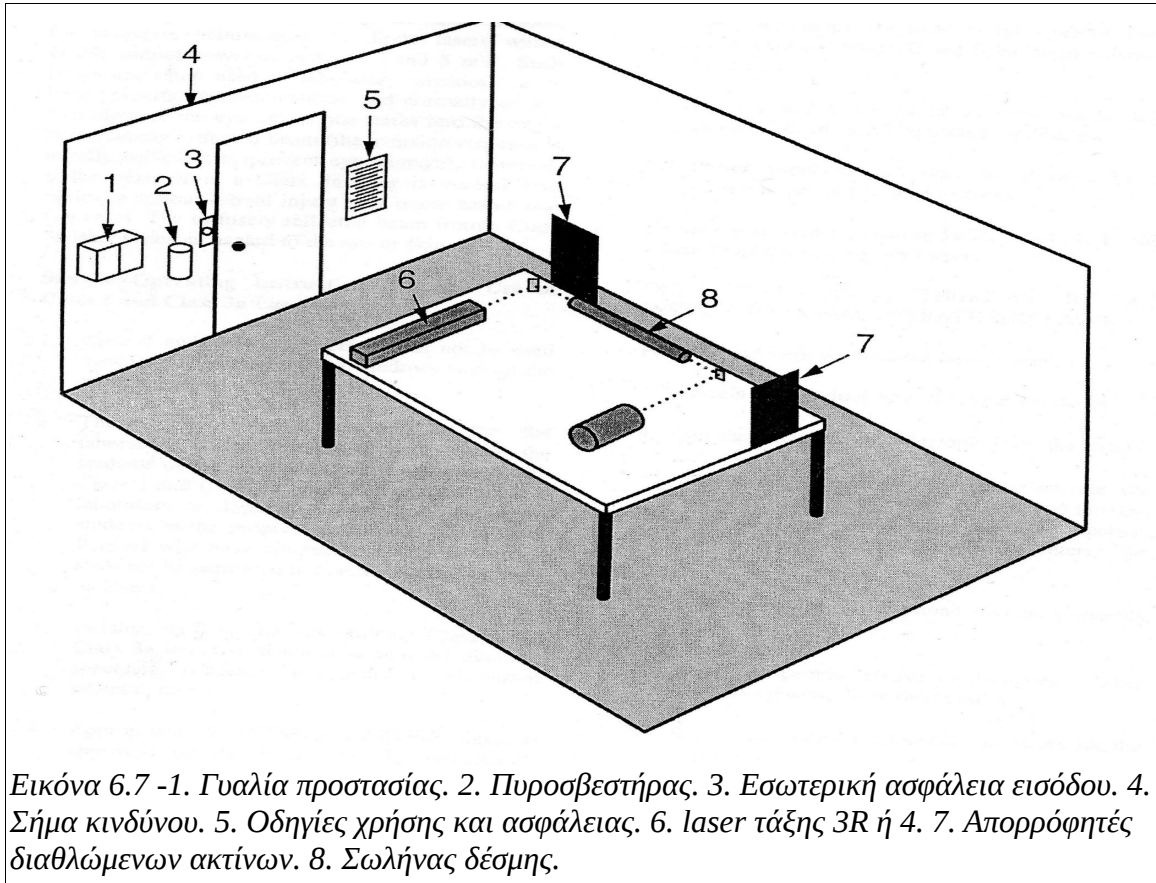
- Τα laser χαμηλής ισχύος, τάξης 2, είναι όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια εργαστηριακής άσκησης προπτυχιακών μαθημάτων. Σε γενικές

γραμμές πρέπει να υπάρχει η κατάλληλη σήμανση και να χρησιμοποιούνται γυαλιά προστασίας με στόχο κυρίως την εκπαίδευση στα θέματα ασφαλείας αλλά και την αποφυγή τραυματισμού σε περίπτωση κακής χρήσης των διατάξεων. Στα παρακάτω σχήματα φαινονται οι προτεινόμενοι χώροι εργαστηρίων, για επιτραπέζιες συσκευές, σύμφωνα με το πρότυπο ANSI-Z136.5 "Safe Use of Lasers in Educational Institutions".





Εικόνα 6.6 - 1. γυαλιά προστασίας. 2. σήμα κινδύνου. 3. οδηγίες χρήσης. 4. Πλάτυς πάγκος. 5. Απορροφήτες. 6. Χώρισμα γυψοσανίδας. 7. Laser τάξης 3M.



Εικόνα 6.7 -1. Γυαλιά προστασίας. 2. Πυροσβεστήρας. 3. Εσωτερική ασφάλεια εισόδου. 4. Σήμα κινδύνου. 5. Οδηγίες χρήσης και ασφάλειας. 6. Laser τάξης 3R ή 4. 7. Απορροφήτες διαθλώμενων ακτίνων. 8. Σωλήνας δέσμης.

6.3 Εργαστήρια του Τομέα Φυσικής της Σχολής Ε.Μ.Φ.Ε.

Στις πειραματικές διατάξεις των εργαστηρίων η κατάσταση είναι διαφορετική. Διαρροές της δέσμης έχουμε σχεδόν από κάθε οπτικό μέσο. Ειδική σήμανση και πυροπροστασία υπάρχει, επίσης τα ειδικά γυαλιά χρησιμοποιούνται πάντα. Οι περισσότερες διατάξεις βρίσκονται σε επίπεδα χαμηλότερα του ύψους του ανθρώπινου ματιού. Δεν υπάρχουν σαφή χωρίσματα μεταξύ των χώρων των πειραματικών διατάξεων λόγω έλλειψης χώρου συνολικά στα εργαστήρια του κτιρίου, με αποτέλεσμα να λειτουργούν ταυτόχρονα άνω του ενός συστήματος laser ή να υπάρχει αυξημένη κινητικότητα προσωπικού. Τέλος πρέπει να παρατηρήσουμε ότι δεν λειτουργούν οι φωτεινές ενδείξεις “LASER ON” έξω από ορισμένα εργαστήρια και απουσιάζουν πλήρως έξω από άλλα.

- Στη πρώτη πειραματική διάταξη μετρήσαμε με silicon PIN φωτοδίοδο¹⁹ και παλμογράφο, διαθλώμενη δέσμη, ενέργειας παλμού $E = 107,3 \pm 0.1$ mJ. Το laser ήταν CO₂ (10,6μm) παλμικό, με τάση τροφοδοσίας στα $V = 20$ kV. Η διάμετρος της δέσμης μετρήθηκε από το αποτύπωμά της σε χαρτί και με την βοήθεια μικρόμετρου στα $d = 2$ mm. Αυτό μας δίνει μία πυκνότητα ενέργειας:

$$A = \frac{E}{V} = 34,17 \pm 0,01 \text{ J/cm}^2 \quad \text{για έναν μόνο παλμό.}$$

Το laser μπορεί να δώσει 1 έως 10 παλμούς το δευτερόλεπτο, ας υποθέσουμε ότι είναι ρυθμισμένο στον 1pps (pulses per second – παλμοί ανά δευτερόλεπτο). Αυτό μας δίνει για έκθεση ενός δευτερολέπτου:

$$E_{\text{exp}} = \frac{A}{t} = 34,17 \text{ W/cm}^2$$

Το αντίστοιχο MPE που μας δίνεται από τα διεθνή πρότυπα ίσο με $0,6 \text{ W/cm}^2$ για 10s στο μάτι. Η δόση μας είναι 2 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από το MPE. Είναι προφανές ότι η εργασία χωρίς γυαλιά γεννά τεράστιους κινδύνους για τα μάτια του προσωπικού του εργαστηρίου. Ακόμα προτείνεται η τοποθέτηση κατάλληλων εμποδίων της δέσμης στα σημεία πίσω από τις διαθλαστικές επιφάνειες όπου θα σταματούν της διαθλώμενες ακτίνες. (βλ. Εικόνα 6.7)

¹⁹ Η φωτοδίοδος αυτή μας δίνει απόδοση 0,4 στα 10.6μm. Για την συγκεκριμένη, μάλιστα, η μετατροπή των V σε J γίνεται με διαίρεση διά του 9.4. Η μέτρηση του παλμογράφου μας ήταν 403,53 mV

- Στην δεύτερη διάταξη μετρήσαμε απευθείας την δέσμη ενός παλμικού Nd:YAG (στα 266 nm) με θερμικό ενεργόμετρο και παλμογράφο. Η διάμετρος της δέσμης αρχικά είναι $w_0 = 2$ mm και στο σημείο που ενδιαφερόμαστε (διάδρομος εργαστηρίου) είναι στα $w = 3$ mm. Η βαθμονόμηση του οργάνου μας υποδεικνύει ότι διαιρώντας δια παράγοντα 5,5 μετατρέπουμε την ένδειξη του παλμογράφου σε mJ ενέργεια παλμού με σφάλμα μέτρησης $\pm 1,0$ mJ. Η διάρκεια παλμού στα 6ns και η χρόνος μεταξύ τους 1s . Οι μετρήσεις μας συναρτήσε της τάσης εισόδου το laser φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Τάση εισόδου (V)	Ενέργεια παλμού. (mJ)	Πυκνότητα ενέργειας για έκθεση 1s ($\times 10^3$ J/m ²)
900	56,9	80
870	34,2	48
850	35,8	51
820	23,1	33
800	19,3	27
770	10,5	15
750	9,7	14

Για το μήκος κύματος αυτό, το MPE είναι στα 30 J/m² για το μάτι και για το δέρμα. Αυτό μας δείχνει ότι ο διάδρομος του εργαστηρίου δεν είναι ασφαλής. Χρειάζεται να ληφθούν παραπάνω μέτρα ασφαλείας, όπως χωρίσματα του χώρου, χρήση γαντιών και προστατευτικών του δέρματος. Κυρίως πρέπει να διασφαλιστεί η εκκένωση του χώρου κατά την διάρκεια λειτουργίας του laser. Θα υπολογίσουμε ακόμα την NOHZ για το συγκεκριμένο laser. Με χρήστη του τύπου (5.1), για άνοιγμα δέσμης στα 1,5 mrad και για ενέργεια παλμού 56,9 mJ έχουμε:

$$NOHD = \frac{2}{\theta} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} = \frac{2}{1,5 \text{ mrad}} \sqrt{\frac{56,9 \text{ mJ}}{\pi 30 \text{ J/m}^2}} = 103,6 \text{ m}$$

Το αποτέλεσμα αυτό μας επιβεβαιώνει το προηγούμενο συμπέρασμα.

- Στην τρίτη διάταξη μετρήσαμε απευθείας δέσμη ενός παλμικού Nd:YAG (532nm) και θα υπολογίσουμε την πυκνότητα ισχύος στα 10m από την πηγή (λόγω της διάταξης του εργαστηρίου η δέσμη μπορεί να διαφύγει απευθείας έξω στον διάδρομο του κτιρίου, αν η πόρτα βρεθεί ανοικτή). Η ενέργεια του παλμού

μετρήθηκε στα $E_p = 100 \text{ mJ}$ με διάρκεια $t_p = 6 \text{ ns}$ και η αρχική διάμετρος της δέσμης είναι $w_0 = 2 \text{ mm}$. Με χρήση του τύπου (2.7) βρίσκουμε την διάμετρο στα $z = 10 \text{ m}$:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right]^{1/2} = 2 \text{ mm} \left[1 + \frac{532 \text{ nm} \times 10 \text{ m}}{\pi \cdot 2^2 \text{ mm}^2} \right]^{1/2} = 2,8 \text{ mm}$$

Αυτό μας δίνει πυκνότητα ισχύος του παλμού:

$$I_p = \frac{E_p / t_p}{\pi r^2} = \frac{100 \text{ mJ} / 6 \text{ ns}}{\pi \times 1,4^2 \text{ mm}^2} = 250 \text{ W / cm}^2$$

Ας υποθέσουμε ότι ένας περαστικός από τον διάδρομο του κτιρίου δέχεται την δέσμη απευθείας στο μάτι (χρόνος αντίδρασης 0.25s) η συχνότητα εκπομπής παλμών είναι στα 10pps οπότε μέχρι να αντιδράσει θα έχει δεχθεί 2-3 παλμούς. Σύμφωνα με τους πίνακες των MPE η μέγιστη επιτρεπόμενη δόση στο μάτι από αυτό το μήκος κύματος είναι $2,5 \text{ mW/cm}^2$ και για τους 3 παλμούς :

$$MPE_{\text{train}} = MPE \cdot N^{-0,25} = 2,5 \cdot 3^{-0,25} \text{ W / cm}^2 = 0,76 \text{ W / cm}^2$$

οπότε ο περαστικός διατρέχει μεγάλο κίνδυνο.

Αν τώρα βρεθεί δίπλα στην πόρτα, στα 3m από την πηγή laser (διάμετρος 2,3 mm) θα δεχθεί δόση ίση με 550 W/cm^2 . Η αυθόρμητη αντίδραση του οργανισμού, δεν θα καταφέρει να “σώσει” το μάτι του περαστικού.

Ακόμα υπολογίζουμε την απόσταση οφθαλμικού κινδύνου

$$NOHD = \frac{2}{\theta} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}} = \frac{2}{1,5 \text{ mrad}} \sqrt{\frac{250 \text{ W/cm}^2}{\pi \cdot 0,76 \text{ mW/cm}^2}} = 323,7 \text{ m}$$

Το αποτέλεσμα μας δείχνει ότι δεν μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί η συγκεκριμένη διάταξη, αν δεν παρθούν άμεσα μέτρα ασφαλείας. Προτείνεται ο αποκλεισμός της δέσμης από την κατεύθυνσή της προς την πόρτα, με ειδικό χώρισμα του χώρου όπου εκτελούνται πειράματα με αυτό το σύστημα laser ή η μεταφορά ολόκληρου του συστήματος σε πιο κατάλληλο χώρο. Οποσδήποτε πρέπει να τοποθετηθεί φωτεινή σήμανση “LASER ON” έξω από την πόρτα του εργαστηρίου.

6.4 Καρτέλα μετρήσεων

Στις επόμενες σελίδες παραθέτουμε τις καρτέλες που συντάξαμε. Οι καρτέλες δίνονται συμπληρωμένες με βάση τις επισκέψεις που πραγματοποιήσαμε και είναι διαμορφωμένες έτσι ώστε να μπορούν να συλλέξουν τις απαραίτητες πληροφορίες, είτε πρόκειται για εργαστηριακή διάταξη είτε για βιομηχανικό σύστημα. Οι τελευταίες δύο καρτέλες αφορούν μία επίσκεψη μας, κατά την διάρκεια συντήρησης δύο συστημάτων διαθλαστικής χειρουργικής.

Καρτέλα ελέγχου ασφάλειας μηχανημάτων LASER

Ημερομηνία: 23/3/10

Σύστημα LASER: CO₂

Μήκος κύματος ακτινοβολίας: 1064 nm

Χρήση: εργαστηριακό

Κατηγορία κίνδυνου: 1 1M 2 2M 3R **3B** 4

Τροφοδοτικό:

Τάση: 20kV

Περιβάλλον λειτουργίας:

Θερμοκρασία: _____ Υγρασία: _____

Ψύξη:

NAI

OXI

(_____)

Δέσμη:

Τρόπος λειτουργίας:

ΣΥΝΕΧΗΣ

ΠΑΛΜΙΚΟΣ

(_____)

Ισχύς κορυφής: 42,93mJ

Δάρκεια παλμού: _____ Χρόνος μεταξύ των παλμών: 1-10pps

Ασφάλεια:

		Σχόλια
Πινακίδες και σήματα κινδύνου - Προειδοποιητικά εισόδου	NAI	Προειδοποιητικό σήμα στην είσοδο του εργαστηρίου
Ελεγχόμενη περιοχή laser	OXI	Η διάταξη είναι τοποθετημένη σε χώρο όπου γίνονται και άλλες εργασίες
Καλύμματα προστασίας.	OXI	
Διακόπτης κινδύνου - διακόπτης δέσμης	NAI	
Συνθήκες φωτισμού για ελαχιστοποίηση του ανοίγματος της κόρης	OK	
Αναγραφή MPE και ατομικών μέτρων προστασίας	OXI	
Προστατευτικά γυαλιά - Προστατευτικά δέρματος	NAI	

Καρτέλα ελέγχου ασφάλειας μηχανημάτων LASER

Ημερομηνία: 24/3/10

Σύστημα LASER: Nd:YAG

Μήκος κύματος ακτινοβολίας: 266 nm

Χρήση: εργαστηριακό

Κατηγορία κίνδυνου: 1 1M 2 2M 3R **3B** 4

Τροφοδοτικό:

Τάση: 220 V

Περιβάλλον λειτουργίας:

Θερμοκρασία _____ Υγρασία: _____

Ψύξη: NAI **OXI**
(_____)

Δέσμη:

Τρόπος λειτουργίας: **ΣΥΝΕΧΗΣ** **ΠΑΛΜΙΚΟΣ**
(_____ Q - switch _____)

Ισχύς κορυφής: (πίσω)

Διάρκεια παλμού: 6ns Χρόνος μεταξύ των παλμών: 1s

Ασφάλεια:

		Σχόλια
Πινακίδες και σήματα κινδύνου - Προειδοποιητικά εισόδου	NAI	Προειδοποιητικό σήμα στην είσοδο του εργαστηρίου
Ελεγχόμενη περιοχή laser	OXI	Η διάταξη είναι τοποθετημένη σε χώρο όπου υπάρχουν πολλές άλλες διατάξεις
Καλύμματα προστασίας.	OXI	
Διακόπτης κινδύνου - διακόπτης δέσμης	NAI	
Συνθήκες φωτισμού για ελαχιστοποίηση του ανοίγματος της κόρης	OK	
Αναγραφή ΜΡΕ και ατομικών μέτρων προστασίας	OXI	
Προστατευτικά γυαλιά - Προστατευτικά δέρματος	NAI	

Καρτέλα ελέγχου ασφάλειας μηχανημάτων LASER

Ημερομηνία: 23/3/10

Σύστημα LASER: Nd:YAG

Μήκος κύματος ακτινοβολίας: 532nm

Χρήση: εργαστηριακό

Κατηγορία κίνδυνου: 1 1M 2 2M **3R** 3B 4

Τροφοδοτικό:

Τάση: _____

Περιβάλλον λειτουργίας:

Θερμοκρασία _____ Υγρασία: _____

Ψύξη:

ΝΑΙ

ΟΧΙ

(υδρόψυκτο)

Δέσμη:

Τρόπος λειτουργίας:

ΣΥΝΕΧΗΣ

ΠΑΛΜΙΚΟΣ

(_____)

Ισχύς κορυφής: 100mJ

Διάρκεια παλμού: 6ns Χρόνος μεταξύ των παλμών: _____

Ασφάλεια:

		Σχόλια
Πινακίδες και σήματα κινδύνου - Προειδοποιητικά εισόδου	OXI	
Ελεγχόμενη περιοχή laser	OXI	Η διάταξη είναι τοποθετημένη σε χώρο όπου υπάρχουν πολλές άλλες διατάξεις. Παρατηρήθηκαν αρκετές ανακλόμενες, από τα οπτικά μέσα της διάταξης.
Καλύμματα προστασίας.	OXI	
Διακόπτης κινδύνου - διακόπτης δέσμης	NAI	
Συνθήκες φωτισμού για ελαχιστοποίηση του ανοίγματος της κόρης		Μέτριος φωτισμός.
Αναγραφή MPE και ατομικών μέτρων προστασίας	OXI	
Προστατευτικά γυαλιά - Προστατευτικά δέρματος	NAI	

Καρτέλα ελέγχου ασφάλειας μηχανημάτων LASER

Ημερομηνία: ___/___/___

Σύστημα LASER: CO₂

Μήκος κύματος ακτινοβολίας: 1064nm

Χρήση: κοπή και χάραξη πλέξιγκλας,

Κατηγορία κίνδυνου: 1 1M 2 2M 3R 3B **4**

Τροφοδοτικό:

Τάση: 220V

Περιβάλλον λειτουργίας:

Θερμοκρασία: _____ Υγρασία: _____

Ψύξη:

ΝΑΙ

ΟΧΙ

(αερόψυκτο)

Δέσμη:

Τρόπος λειτουργίας:

ΣΥΝΕΧΗΣ

ΠΑΛΜΙΚΟΣ

(_____)

Ισχύς κορυφής: 50W

Διάρκεια παλμού: _____ Χρόνος μεταξύ των παλμών: _____

Ασφάλεια:

		Σχόλια
Πινακίδες και σήματα κινδύνου - Προειδοποιητικά εισόδου	ΟΧΙ	
Ελεγχόμενη περιοχή laser	ΟΧΙ	Πολλά μηχανήματα, μεταλλικά εργαλεία και εύφλεκτα υλικά
Καλύμματα προστασίας.	ΝΑΙ	
Διακόπτης κινδύνου - διακόπτης δέσμης	ΝΑΙ	
Συνθήκες φωτισμού για ελαχιστοποίηση του ανοίγματος της κόρης		Μέτριες.
Αναγραφή ΜΡΕ και ατομικών μέτρων προστασίας	ΟΧΙ	
Προστατευτικά γυαλιά - Προστατευτικά δέρματος	ΟΧΙ	

Καρτέλα ελέγχου ασφάλειας μηχανημάτων LASER

Ημερομηνία: 23 / 11 / 09

Σύστημα LASER: Arf excimer

Μήκος κύματος ακτινοβολίας: 193 nm

Χρήση: διαθλαστική χειρουργική

Κατηγορία κίνδυνου: **1 1M 2 2M 3R 3B 4**

Τροφοδοτικό:

Τάση: 220V

Περιβάλλον λειτουργίας:

Θερμοκρασία _____ Υγρασία: _____

Ψύξη: **ΝΑΙ**

ΟΧΙ

(αερόψυκτο)

Δέσμη:

Τρόπος λειτουργίας: **ΣΥΝΕΧΗΣ**
(_____)

ΠΑΛΜΙΚΟΣ

Ισχύς κορυφής: 1.5W

Διάρκεια παλμού: 10 – 20 ns Χρόνος μεταξύ των παλμών: 400Hz

Ασφάλεια:

		Σχόλια
Πινακίδες και σήματα κινδύνου - Προειδοποιητικά εισόδου	ΝΑΙ	Σήματα στην είσοδο του χειρουργείου
Ελεγχόμενη περιοχή laser	ΝΑΙ	
Καλύμματα προστασίας.	ΝΑΙ	
Διακόπτης κινδύνου - διακόπτης δέσμης	ΝΑΙ	Σχεδιάζεται η τοποθέτηση συστήματος, διακοπής της δέσμης σε περίπτωση που ανοίξει η πόρτα κατά την διάρκεια της επέμβασης.
Συνθήκες φωτισμού για ελαχιστοποίηση του ανοίγματος της κόρης	ΟΚ	
Αναγραφή MPE και ατομικών μέτρων προστασίας	ΝΑΙ	
Προστατευτικά γυαλιά - Προστατευτικά δέρματος	ΝΑΙ	Γυαλιά

Συνδέσεις οπτικών μέσων, ανακλαστικές επιφάνειες, διαρροές γενικά.	OK	Ελεύθερη δέσμη για λίγα εκατοστά, όλη η διαδρομή της δέσμης και τα οπτικά είναι εγκλεισμένα μέσα στο μηχάνημα.
Τροποποιήσεις μηχανήματος.	OXI	

Παρατηρήσεις - σχόλια

Διάμετρος δέσμης $w_0=0,68\text{mm}$

Ανιχνευτές διαρροής αερίου

Ανιχνευτές διαρροής της δέσμης

Κίνδυνοι ηλεκτροπληξίας από πρόχειρα τοποθετημένα πολύμπριζα.

Χαρακτηριστικά οργάνων μέτρησης (βαθμονόμηση, σφάλματα κτλ)

Καρτέλα ελέγχου ασφάλειας μηχανημάτων LASER

Ημερομηνία: 23 / 11 / 09

Σύστημα LASER: Arf excimer

Μήκος κύματος ακτινοβολίας: 193 nm

Χρήση: διαθλαστική χειρουργική

Κατηγορία κίνδυνου: 1 1M 2 2M 3R 3B **4**

Τροφοδοτικό:

Τάση: 220V

Περιβάλλον λειτουργίας:

Θερμοκρασία _____ Υγρασία: _____

Ψύξη: **ΝΑΙ**

ΟΧΙ

(αερόψυκτο)

Δέσμη:

Τρόπος λειτουργίας: **ΣΥΝΕΧΗΣ**
(_____)

ΠΑΛΜΙΚΟΣ

Ισχύς κορυφής: 1.5W

Διάρκεια παλμού: 10 – 15 ns Χρόνος μεταξύ των παλμών: 500Hz

Ασφάλεια:

		Σχόλια
Πινακίδες και σήματα κινδύνου - Προειδοποιητικά εισόδου	ΝΑΙ	Σήματα στην είσοδο του χειρουργείου
Ελεγχόμενη περιοχή laser	ΝΑΙ	
Καλύμματα προστασίας.	ΝΑΙ	
Διακόπτης κινδύνου - διακόπτης δέσμης	ΝΑΙ	Σχεδιάζεται η τοποθέτηση συστήματος, διακοπής της δέσμης σε περίπτωση που ανοίξει η πόρτα κατά την διάρκεια της επέμβασης.
Συνθήκες φωτισμού για ελαχιστοποίηση του ανοίγματος της κόρης	ΟΚ	
Αναγραφή MPE και ατομικών μέτρων προστασίας	ΝΑΙ	
Προστατευτικά γυαλιά - Προστατευτικά δέρματος	ΝΑΙ	Γυαλιά

Παράρτημα

Χρήσιμες σχέσεις

Δέσμη laser

Σχέση 2.6	Σελίδα 15	Πυκνότητα ισχύος γκαουσιανής δέσμης laser σε απόσταση z
Σχέση 2.7	Σελίδα 15	Εύρος της γκαουσιανής δέσμης laser σε απόσταση z
Σχέση 2.8	Σελίδα 16	Γωνιακή απόκλιση δέσμης laser για μεγάλες αποστάσεις

$$I(r) = I_0 \cdot e^{\frac{-2r^2}{w(z)^2}}$$

$$w(z) = w_0 \left[1 + \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right]^{1/2}$$

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Όργανα μέτρησης

Σχέση 2.12	Σελίδα 21	Ειδική ανιχνευτική ικανότητα
------------	-----------	------------------------------

$$D' = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{NEP}$$

Διάδοση σε ιστούς

Σχέση 4.5	Σελίδα 49	Πυκνότητα ισχύος της δέσμης laser που διαδίδεται σε πάχος ιστού L
-----------	-----------	---

$$I = I_0^{-aL}$$

Ασφάλεια

Σχέση 5.1	Σελίδα 64	Απόσταση οφθαλμικού κινδύνου για ελεύθερη δέσμη laser
Σχέση 5.6	Σελίδα 80	Οπτική πυκνότητα γυαλιών προστασίας

$$NOHD = \frac{2}{\theta} \sqrt{\frac{P}{\pi MPE}}$$

$$OD = -\log_{10} \tau_\lambda = -\log_{10} \left(\frac{MPE}{E} \right)$$

Παράρτημα 1 – Πίνακες ΜΡΕ

IEC 60825 - 1

Maximum Permissible Exposure (MPE) tables

Exposure time t(s) Wavelength (nm)	10^{-13} to 10^{-9} (< 1 ns)	10^{-9} to 10 (1 ns to 10s)	10 to 10^3 (10 to 1000s)	10^3 to 3×10^4 (1000 to 30,000s)
180 to 302.5	$3 \times 10^{10} \text{ Wm}^{-2}$	30 Jm^{-2} ($30/t \text{ Wm}^{-2}$)		
302.5 to 315		$t \leq T_1$ $C_1 \text{ Jm}^{-2}$ where $C_1 = 5.6 \times 10^3 t^{0.25}$ $t > T_1$ $C_2 \text{ Jm}^{-2}$ where $C_2 = 10^{0.2(\lambda-295)}$ $T_1 = 10^{0.8(\lambda-295)} \times 10^{-15} \text{ s}$	$C_2 \text{ Jm}^{-2}$ where $C_2 = 10^{0.2(\lambda-295)}$	
315 to 400		$C_1 \text{ Jm}^{-2}$ where $C_1 = 5.6 \times 10^3 t^{0.25}$	10^4 Jm^{-2} ($10^4/t \text{ Wm}^{-2}$)	10 Wm^{-2} ($10t \text{ Jm}^{-2}$)

Maximum Permissible Exposure (MPE) at the cornea for direct ocular exposure to laser radiation - UV section.

Exposure time t(s)	10^{-13} to 10^{-11}	10^{-11} to 10^{-9}	10^{-9} to 1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5} to 10	10 to 10^2	10^2 to 10^4	10^4 to 3×10^4
Wavelength (nm)							
400 to 600	$1.5 \times 10^{-4} C_6$ Jm^{-2}	$2.7 \times 10^4 t^{0.75} C_6$ Jm^{-2}	$5 \times 10^{-3} C_6 Jm^{-2}$	$18t^{0.75} C_6 Jm^{-2}$	Retinal photochemical hazard		
					$100C_3 Jm^{-2}$ using $\gamma_p=11mrad$	$1C_3 Wm^{-2}$ using $\gamma_p=1.1t^{0.5} mrad$	$1C_3 Wm^{-2}$ using $\gamma_p=110mrad$
400 to 700 ^d	$1.5 \times 10^{-4} C_6$ Jm^{-2}	$2.7 \times 10^4 t^{0.75} C_6$ Jm^{-2}	$5 \times 10^{-3} C_6 Jm^{-2}$	$18t^{0.75} C_6 Jm^{-2}$	AND ^d		
					Retinal thermal hazard		
					$\alpha \leq 1.5 mrad: 10Wm^{-2}$ $\alpha > 1.5 mrad$ $t \leq T_2$ $18t^{0.75} C_6 Jm^{-2}$ $t > T_2$ $18C_6 T_2^{-0.25} Wm^{-2}$		

Maximum Permissible Exposure (MPE) at the cornea for direct ocular exposure to laser radiation - Visible section.

Exposure time t(s)	10^{-13} to 10^{-11}	10^{-11} to 10^{-9}	10^{-9} to 10^{-7}	10^{-7} to 1.8×10^{-5}	1.8×10^{-5} to 5×10^{-5}	5×10^{-5} to 10^{-3}	10^{-3} to 10	10 to 1000	1000 to 30,000
Wavelength (nm)									
700 to 1050	1.5×10^{-4} $\times C_4 C_6 \text{ Jm}^{-2}$	$2.7 \times 10^4 t^{0.75} C_4 C_6$ Jm^{-2}	$5 \times 10^{-3} C_4 C_6 \text{ Jm}^{-2}$		$18 t^{0.75} C_4 C_6 \text{ Jm}^{-2}$			Retinal thermal hazard $\alpha \leq 1.5\text{mrad}$: $10 C_4 C_7 \text{ Wm}^{-2}$ $\alpha > 1.5\text{mrad}$:	
1050 to 1400	1.5×10^{-3} $\times C_6 C_7 \text{ Jm}^{-2}$	$2.7 \times 10^5 t^{0.75} C_6 C_7$ Jm^{-2}	$5 \times 10^{-2} C_6 C_7 \text{ Jm}^{-2}$			$90 t^{0.75} C_6 C_7 \text{ Jm}^{-2}$		$t \leq T_2$ $18 t^{0.75} C_4 C_6 C_7 \text{ Jm}^{-2}$ $t > T_2$ $18 C_4 C_6 C_7 T_2^{-0.25} \text{ Wm}^{-2}$	
1400 to 1500	10^{12} Wm^{-2}		10^3 Jm^{-2}				$5600 t^{0.25} \text{ Jm}^{-2}$	1000 Wm^{-2}	
1500 to 1800	10^{13} Wm^{-2}		10^4 Jm^{-2}						
1800 to 2600	10^{12} Wm^{-2}		10^3 Jm^{-2}				$5600 t^{0.25} \text{ Jm}^{-2}$		
2600 to 1,000,000	10^{11} Wm^{-2}		100 Jm^{-2}	$5600 t^{0.25} \text{ Jm}^{-2}$					

Maximum Permissible Exposure (MPE) at the cornea for direct ocular exposure to laser radiation - IR section.

Exposure time t(s) \ Wavelength (nm)	< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ to 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ to 10	10 to 1000	1000 to 30,000
180 to 302.5	3 x 10 ¹⁰ Wm ⁻²	30 Jm ⁻²			
302.5 to 315		t < T ₁ : C ₁ Jm ⁻² t > T ₁ : C ₂ Jm ⁻²		C ₂ Jm ⁻²	
315 to 400		C ₁ Jm ⁻²		10 ⁴ Jm ⁻²	10 Wm ⁻²
400 to 700	2 x 10 ¹¹ Wm ⁻²	200 Jm ⁻²	1.1 x 10 ⁴ t ^{0.25} Jm ⁻²	2000 Wm ⁻²	
700 to 1400	2 x 10 ¹¹ C ₄ Wm ⁻²	200C ₄ Jm ⁻²	1.1 x 10 ⁴ C ₄ t ^{0.25} Jm ⁻²	2000C ₄ Wm ⁻²	

Maximum Permissible Exposure (MPE) of skin to laser radiation 180 to 1400nm

Exposure time t(s) \ Wavelength (nm)	10 ⁻¹³ to 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ to 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ to 10 ⁻³	10 ⁻³ to 10	10 to 30,000
1400 to 1500	10 ¹² Wm ⁻²	10 ³ Jm ⁻²		5600t ^{0.25} Jm ⁻²	1000 Wm ⁻²
1500 to 1800	10 ¹³ Wm ⁻²	10 ⁴ Jm ⁻²			
1800 to 2600	10 ¹² Wm ⁻²	10 ³ Jm ⁻²		5600t ^{0.25} Jm ⁻²	
2600 to 1,000,000	10 ¹¹ Wm ⁻²	100 Jm ⁻²	5600t ^{0.25} Jm ⁻²		

Maximum Permissible Exposure (MPE) of skin to laser radiation 1400 to 1,000,000nm.

Aperture diameters for calculating irradiance and radiant energy

Wavelength	Exposure Duration	Aperture diameter for eye irradiance
180 to 400nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	1mm
400 to 1400nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	7mm
1400 to 10^5 nm	$t \leq 0.35$ s	1mm
	$0.35\text{s} < t < 10$ s	$1.5 \times t^{0.375}$ mm
	$t \geq 10$ s	3.5mm
10^5 to 10^6 nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	11mm

Aperture diameters for eye exposure

Wavelength	Exposure Duration	Aperture diameter for skin irradiance
180 to 400nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	3.5mm
400 to 1400nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	3.5mm
1400 to 10^5 nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	3.5mm
10^5 to 10^6 nm	$t \leq 3 \times 10^4$ s	11mm

Aperture diameters for skin exposure

Constants for use in MPE calculations

Parameter	Spectral region (nm)
$T_1 = 10^{0.8(\lambda-295)} \times 10^{-15} \text{ s}$	302.5 to 315
$T_2 = 10$ for $0 < \alpha < \alpha_{\min}$	400 to 1400
$T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha-1.5)/98.5]}$ for $\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}$	400 to 1400
$T_2 = 100$ for $\alpha > \alpha_{\max}$	400 to 1400
$C_1 = 5.6 \times 10^3 t^{0.25}$	302.5 to 400
$C_2 = 10^{0.2(\lambda-295)}$	302.5 to 315
$C_3 = 1$	400 to 450
$C_3 = 10^{0.02(\lambda-450)}$	450 to 600
$C_4 = 10^{0.002(\lambda-700)}$	700 to 1050
$C_4 = 5$	1050 to 1400
$C_5 = N^{-1/4}$ (only applicable if $t_{\text{pulse}} < 0.25\text{s}$)	400 to 10^6
$C_6 = 1$ for $\alpha \leq \alpha_{\min}$	400 to 1400
$C_6 = \alpha/\alpha_{\min}$ for $\alpha_{\min} < \alpha \leq \alpha_{\max}$	400 to 1400
$C_6 = \alpha_{\max}/\alpha_{\min}$ for $\alpha > \alpha_{\max}$	400 to 1400
$C_7 = 1$	700 to 1150
$C_7 = 10^{(0.018(\lambda-1150))}$	1150 to 1200
$C_7 = 8$	1200 to 1400
$\alpha_{\min} = 1.5 \text{ mrad}$	
$\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$	
N is the number of pulses contained within the applicable duration.	

Constants for use in MPE and AEL tables.

NOTE There is only limited evidence about effects for exposures of less than 10^{-9} s for wavelengths less than 400 nm and greater than 1400 nm. The AELs for these exposure times and wavelengths have been derived by calculating the equivalent radiant power or irradiance from the radiant power or radiant exposure applying at 10^{-9} s for wavelengths less than 400 nm and greater than 1400 nm.

Παράρτημα 2 – Σήματα κινδύνου

**Γενικό προειδοποιητικό σήμα κινδύνου από ακτινοβολία laser
καθορισμένο από τα διεθνή πρότυπα:**



Σήμανση χώρων:



Σήμα προειδοποίησης εργασιών επισκευής



Σήμα προειδοποίησης λειτουργίας laser 2ης τάξης.



Σήμα κινδύνου, laser τάξης 3R, 3B, 4.



Σήμα κινδύνου, προειδοποίησης αόρατης ακτινοβολίας.

Φωτεινή Σήμανση:



Σήμανση μηχανημάτων:



Τάξη 1 και 1M:



Τάξη 2 και 2M:



Τάξη 3R:



Τάξη 3B:

**INVISIBLE
LASER RADIATION
AVOID EXPOSURE TO BEAM
CLASS 3B LASER PRODUCT**

**LASER RADIATION
AVOID EXPOSURE TO BEAM
CLASS 3B LASER PRODUCT**

**CAUTION - CLASS 3B LASER
RADIATION WHEN OPEN AND
INTERLOCKS DEFEATED.
AVOID EXPOSURE TO BEAM**

**CAUTION - CLASS 3B
INVISIBLE LASER
RADIATION WHEN OPEN.
AVOID EXPOSURE TO BEAM**

Τάξη 4:

**CAUTION - CLASS 4
LASER RADIATION WHEN OPEN
AND INTERLOCKS DEFEATED
AVOID EYE OR SKIN EXPOSURE TO
DIRECT OR SCATTERED RADIATION**

**INVISIBLE
LASER RADIATION
AVOID EYE OR SKIN EXPOSURE TO
DIRECT OR SCATTERED RADIATION
CLASS 4 LASER PRODUCT**

**LASER RADIATION
AVOID EYE OR SKIN EXPOSURE TO
DIRECT OR SCATTERED RADIATION
CLASS 4 LASER PRODUCT**

**CAUTION - CLASS 4 INVISIBLE
LASER RADIATION WHEN OPEN
AVOID EYE OR SKIN
EXPOSURE TO DIRECT OR
SCATTERED RADIATION**

Ευχαριστίες

Κλείνοντας αυτή την εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Αναπληρώτρια Καθηγήτρια της Σχολής Ε.Μ.Φ.Ε. κ. Μ. Μακροπούλου για την υπομονή, την συνεργασία και την καθοδήγησή της. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερω τον Καθηγητή κ. Α. Σεραφετινίδη για την παραχώρηση του βιβλίου του “Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική” και τον Επίκουρο Καθηγητή Α. Κυρίτση για την βοήθειά του στην αναζήτηση των προτύπων. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τις κυρίες υποψήφιας διδάκτορες του τομέα Φυσικής της Σχολής Δ. Κοτσιφάκη και Ε. Σπυράτου για την βοήθειά τους στα εργαστήρια.

Ευχαριστώ επίσης την κυρία Φωτεινή Μούρτα , εργαζόμενη με συστήματα laser για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε και το προσωπικό του ΕΛ.Ο.Τ για την πολύτιμη βοήθειά του στην εύρεση και αξιοποίηση των προτύπων.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους συναδέλφους φοιτητές του Ε.Μ.Π , Α. Άρτα, Δ, Πολύζο, Ν. Νικολάου, Β. Μπίζα, Θ, Κλεφτογιάννη, Κ. Ντρέκη για την βοήθειά τους στις μετρήσεις, στις παρατηρήσεις και στη μορφοποίηση.

Βιβλιογραφία.

- 1 A review of health hazards linked to the use of lasers for stone cleaning, Véronique Vergès-Belmin, Gunter Wiedeman, Lothar Weber, Martin Cooper, Derrick Crump, Raphaël Gouverne, Journal of Cultural Heritage 4 (2003).
- 2 American National Standard for Safe Use of Lasers in Educational Institutions. ANSI Z136.5 -2000
- 3 Aspects of laser safety in surgery and medicine , Alan L McKenzie , Northern Regional Medical Physics Department, Newcastle General Hospital, Newcastle , 1988
- 4 Guidelines For Laser Safety and hazard Assessment. OSHA Instruction PUB8-1.7. Occupational Safety and Health Administration, United States Department of Labor. Washington 1991.
- 5 High Performance Optical Limiter, *F. E. Hernández, S. Yang, V. Dubikovskiy, W. Shensky III, E. W. Van Stryland and D. J. Hagan. School of Optics -CREOL, University of Central Florida, Orlando, Florida 32816-2700*
- 6 Industrial Applications of Lasers, John F. Ready, Academic Press, San Diego, 1997
- 7 International Electrotechnical Commission Standard 60825, Safety of laser products , 2004
- 8 Laser Dermatology, pearls and problems, David J. Goldberg, Blackwell Publishing, Massachusetts, 2008
- 9 Laser Material Processing, William M. Steen, Springer – Verlag London Limited, 2003.
- 10 Laser safety manual, Department of Occupational and Environmental Safety, Case Western Reserve University, 2005
- 11 Laser Safety Manual, H. Ly, University of Western Ontario, 2006
- 12 Laser Safety Training Manual, Richard Baxter, University of Chicago
- 13 Laser Safety, Roy Henderson and Karl Schulmeister, Taylor & Francis Group, New York, 2004
- 14 Light Sources and Laser Safety, Fred Seeber, Camden County College Blackwood, New Jersey
- 15 Protective clothing for use in welding and allied processes ,Patricia Braicovich-

- Ševerdija, Osman Muftić, Proceedings of 2nd International Ergonomics Conference, Ergonomics 2004 Oct.21st-22th,2004, Stubičke Toplice, Zagreb, Croatia .
- 16 Radiation Safety Manual , Harvard University , Boston, 2002
 - 17 The Control of Fire Hazard During Cutaneous Laser Therapy, R. Dave and P.J. Mahaffey ,Bedford Laser Treatment Centre, Bedford Hospital, Bedford, UK , 2002
 - 18 Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων, S.O. Kasap, μετάφραση Θ. Δρίτσας, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2002
 - 19 Αρχές των lasers, O. Svelto, μετάφραση και επιμέλεια Γ.Α. Κουρούκλης, Α.Α. Σεραφεινίδης, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1986
 - 20 ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ LASER, Εργασία στα πλαίσια του μαθήματος «Εφαρμογές των laser στη Βιοϊατρική και το Περιβάλλον», Ομάδα εργασίας: Κουρκουτάς Βασίλης, Κουταλώνης Μάνθος, Λιβιτσάνος Χρήστος, Μανδρίδης Δημήτρης, Μπέικος Μιχάλης, Ορφανουδάκης Θάνος, Τσαρούχας Διονύσης, Φραγκάκης Ιωάννης. Συντονίστρια: Μακροπούλου Μυρσίνη, Αθήνα, 2005
 - 21 Δερματικά Νοσήματα, Διάγνωση και Θεραπεία. Επιμέλεια: Ανδρέας Δ.Κατσάμπας. Εκδόσεις Πασοσιανού. Αθήνα 2007.
 - 22 Εθνική στρατηγική για την υγεία και την ασφάλεια 2010- 2015 , ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Αθήνα 2009
 - 23 Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική, Α.Α. Σεραφεινίδης, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1990
 - 24 Εισαγωγή στην Οφθαλμολογία. Μιχαήλ Ν. Μόσχος. Εκδόσεις Ζήτα. Αθήνα 2008.
 - 25 Εκτίμηση του επαγγελματικού κινδύνου στον τομέα της βιομηχανίας μετάλλου – μεταλλικών προϊόντων (Περίληψη) , ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Αθήνα 2004
 - 26 Ιατρικά lasers, επιστήμη και κλινική εφαρμογή. J.A.S. Carruth and A.L. Mc Kenzie. Μετάφραση και σύγχρονη επιμέλεια Α.Α Σεραφεινίδης και Μ.Ι. Μακροπούλου, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.
 - 26 Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες, Εφαρμογές στην Βιολογία και Ιατρική, Ευάγγελος Ν. Γαζής, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2002
 - 27 Μαθήματα Δερματολογίας και Αφροδισιολογίας. Επιμέλεια – συντονισμός:

- Ανδρέας Δ. Κατσάμπας. Εκδόσεις Π.Χ.Πασχαλίδης. Αθήνα 2007
- 28 Μέθοδοι καταγραφής επαγγελματικών ασθενειών, ΕΝ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, 2008
- 29 Μελέτη εκτίμησης Επαγγελματικού Κινδύνου στον Κλάδο των Τηλεπικοινωνιών, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Αθήνα, 2004
- 30 Οπτική και Λείζερ, οπτικές ίνες και κυματοδηγοί, Μ. Young, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 5η έκδοση, Αθήνα, 2008
- 31 Οπτοηλεκτρονική, μία εισαγωγή, John Wilson and John Hawnes, επιστημονική επιμέλεια Α.Α. Σεραφετινίδης, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2007
- 32 Παπανικολάου, Απόστολος Γ., Ασφαλής χρήση λέιζερ στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΜΠ 2008.
http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/2875/3/papanikolaou_laser.pdf
- 33 Πειραματική μελέτη της δράσης των laser σε οφθαλμικούς ιστούς και βιοπολυμερή, Μυλίωνη Δήμητρα, Διπλωματική εργασία, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ, Αθήνα 2008.
- 34 Προεδρικό διάταγμα υπ αριθμό 82 στο Φ.Ε.Κ 145 της 1ης Σεπτεμβρίου 2010, “Ελάχιστες προδιαγραφές υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (τεχνητή οπτική ακτινοβολία), σε συμμόρφωση με την οδηγία 2006/25/ΕΚ ”
- 35 Σύγχρονη Φυσική, Raymond A. Seway, Clement J. Moses, Curt A. Moyer, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Τρίτη ανατύπωση, Ηράκλειο 2004
- 36 Τυποποίηση σε θέματα υγείας και ασφάλειας της εργασίας, Θεώνη Κουκουλάκη, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Αθήνα, 1999
- 37 Υγιεινή και Ασφάλεια στους Χώρους Εργασίας, Διεθνές Γραφείο Εργασίας και Συμβούλιο Βιομηχανικής Ασφάλειας της Σουηδίας, ελληνική μετάφραση, Αθήνα 1992.

Ιστοσελίδες:

- 1 http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety
- 2 <http://gigapedia.com>

- 3 <http://web.princeton.edu/>
- 4 <http://webstore.iec.ch>
- 5 http://www.ailu.org.uk/laser_technology
- 6 <http://www.asu.edu/radiationsafety/laser/>
- 7 <http://www.clarionsafety.com/>
- 8 <http://www.conformity.com>
- 9 <http://www.ebooksdownloadfree.com>
- 10 <http://www.hatzithomas.gr/gp/lasercut.html>
- 11 <http://www.lase-rshield.com>
- 12 <http://www.lasercutinc.com/>
- 13 <http://www.lasermet.com>
- 14 <http://www.lasershields.com/>
- 15 <http://www.lucidos.co.uk/lasersafety/index.htm>
- 16 <http://www.netfreaks.gr/comments/laser/>
- 17 <http://www.phillips-safety.com>
- 18 <http://www.plexiglas-petropoulos.gr/contents/laser>
- 19 <http://www.rli.com/products/>
- 20 <http://www.troteclaser.com/>
- 21 http://www.troteclaser.com/en-US/laser_systems
- 22 <http://www.vetasa.gr>
- 23 <http://www.yueminglaser.com/laser-machine/>
- 24 <https://www.case.edu>