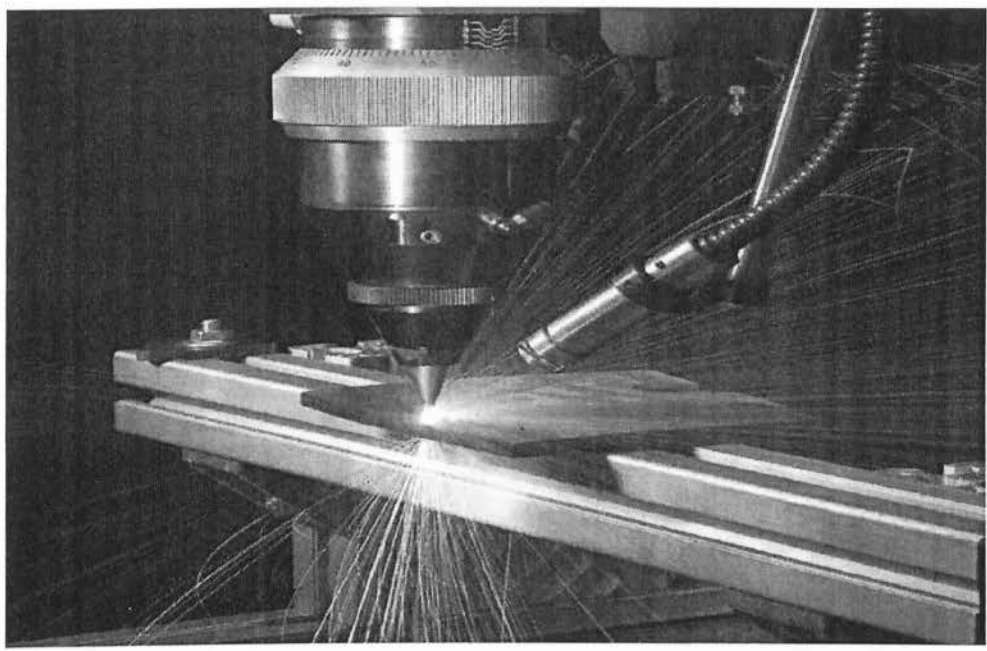




**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**

**LASER ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΥΤΩΝ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**



**Επιβλέποντες Καθηγητές:**

**ΛΙΒΕΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΜΑΡΑΝΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ**

**ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ ΔΙΟΝΥΣΗΣ**

**Σπουδαστής:**

**ΑΜ: 34617**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2011**

## Ευχαριστίες

Με την περάτωση της πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που η βοήθεια τους ήταν σημαντική τόσο στον ψυχολογικό τομέα όσο και στην ολοκλήρωσης της, η οποία συνδυάζεται με το πτυχίο μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους, Κρητικό Νικόλαο και Κοσμά Σπυρίδων που η βοήθεια τους στην διάρκεια των εξαμήνων ήταν σημαντική καθώς και την φίλη και συνάδελφο Μετσιοπούλου Ειρήνη η οποία με την επιμέλεια της βοήθησε τα μέγιστα στο να καταρτίσω ένα σωστό πρόγραμμα και χρονοδιάγραμμα.

Επίσης τους καθηγητές μου Δ. Μαράντη και Ι. Λιβέρη για την αμέριστη βοήθεια τους, την υπομονή τους και την άριστη συνεργασία που επέδειξαν προς το πρόσωπο μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ψυχολογική και οικονομική στήριξη που πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Στους γονείς μου Δημήτρη και Θεοδώρα.

## Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, με θέμα LASER ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΥΤΩΝ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ, θα αναπτύξουμε στα πρώτα κεφάλαια τις γενικές αρχές του φωτός καθώς επίσης και τις γενικές αρχές που διέπουν τα laser. Θα προσπαθήσουμε να ταξινομήσουμε, σύμφωνα πάντα με τα σωστά κριτήρια και να δώσουμε κάποια παραδείγματα από τα πιο αντιπροσωπευτικά είδη laser κάθε κατηγορίας.

Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή για να κατανοήσουμε, την έννοια του φωτός και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, τις έννοιες τις αυθόρμητης και εξαναγκασμένος εκπομπής, και των χαρακτηριστικών της δέσμης laser.

Στο 2ο κεφάλαιο περιγράφουμε την αρχή λειτουργίας των Laser καθώς επίσης και των διάφορων κατηγοριών που αυτά χωρίζονται.

Στο 3ο κεφάλαιο, που αποτελεί και το δεύτερο μέρος της πτυχιακής, αναφέρουμε την χρήση των laser και συγκεκριμένα δυο εξ αυτών (διοξειδίου του άνθρακα και του Nd:YAG ) στην κατεργασία υλικών, και σε άλλες όχι και τόσο διαδεδομένες εφαρμογές.

Στο 4ο κεφάλαιο που αποτελεί και το τελευταίο της παρούσας πτυχιακής, αναφέρουμε τις επιπτώσεις που υφίσταται ο ανθρώπινος οργανισμό κατά την έκθεση του στην ίδια την ακτινοβολία. Τέλος αναφέρουμε τα μέτρα προστασίας που πρέπει να εφαρμόζονται κύριος από τις βιομηχανίες σε επίπεδο προσωπικού για την αποφυγή τυχών ατυχημάτων που σχεδόν πάντοτε έχουν δυστυχεί αποτελέσματα μιας και σε επίπεδο παραγωγής και ειδικά βιομηχανικής παραγωγής τα laser είναι υψηλής ισχύος.

## Πρόλογος

Ασφαλώς όλοι έχουμε δει παλιές ταινίες με διαστημόπλοια και μάχες με laser όπως και διάφορα comics. Έχουν περάσει πάνω από 40 χρόνια που ο Orson Wells εκφώνουσε από το ραδιόφωνο τον πόλεμο των κόσμων με την εισβολή κάποιων πλασμάτων από τον Άρη στη γη με laser.

Και φτάνουμε τελικά μέχρι σήμερα που όλα αυτά έγιναν πραγματικότητα. Τα βλέπουμε παντού γύρω μας από τα μέρη που πάμε για διασκέδαση μέχρι την καθημερινή μας οικιακή χρήση, από την ιατρική μέχρι και την τεχνολογική έρευνα, από τον πόλεμο μέχρι και την ειρήνη.

Η ανακάλυψη των ακτινών laser ήταν για τον άνθρωπο το θαυματουργό επίτευγμα για την πραγματοποίηση των μεγαλύτερων επιθυμιών του. Παρέχουν ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών με εκπληκτικά και τέλεια αποτελέσματα συμβάλουν σημαντικά στην μείωση του χρόνου και του χώρου λειτουργίας οργάνων, συσκευών και άλλων εξαρτημάτων με τα οποία δουλεύουμε και εξυπηρετούμε χωρίς να γίνεται πάντοτε φανερή και απτή η ύπαρξη τους.

Όσο και να μην θέλουμε να το παραδεχτούμε τα laser έχουν μπει για τα καλά στη ζωή μας και ακόμα αναμένεται μια ραγδαία εξέλιξη χωρίς σταματημό για το καλό της ανθρωπότητας.

Ευχαριστώ τους καθηγητές

κ. Λιβέρη Ιωάννη  
κ. Μαράντη Δημήτρη

Τσουκαλάς Διονύσης

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	4
Πρόλογος.....	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	8
1.1 Γενικά για την ακτινοβολία Laser.....	8
1.2 Φως.....	9
1.3 Κβαντική θεωρία και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.....	10
1.4 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	19
1.5 Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή , απορρόφηση.....	20
1.6 Αναστροφή πληθυσμών και ενίσχυση φωτός.....	22
1.7 Μηχανισμοί διέγερσης του ενεργού μέσου.....	24
1.8 Χαρακτηριστικά του laser(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation- ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). .....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	31
Αρχές λειτουργίας και ιδιότητες των laser.....	31
2.1 Περιγραφή της λειτουργίας Laser.....	31
2.2 Τα κυριότερα μέρη του laser.....	33
2.3 Τύποι Laser. ....	35
2.3.1 Τύποι Laser και οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες: .....	36
2.3.1.2.1 Laser στερεάς κατάστασης.....	37
2.3.1.2.2 Laser αερίων.....	44
2.3.1.2.3 Υγρών χρωστικών.....	54
2.3.1.2.4 Χημικά.....	56
2.3.1.2.5 Διοδικά laser.....	58
2.3.1.2.6 Laser ακτινών X.....	64
2.3.1.2.7 Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	68
Εφαρμογές στην βιομηχανία.....	68
3.1 Αλληλεπίδραση δέσμης laser και υλικού.....	68
3.2 Επεξεργασία υλικών.....	70
3.2.1 Γενικά.....	70
3.3 Συγκόλληση.....	73
3.3.1 Βασικές παραμέτρους της συγκόλλησης με laser.....	77
3.3.2 Ποιότητα συγκόλλησης με λέιζερ. ....	80
3.3.3 Ατέλειες στη συγκόλληση με λέιζερ.....	81
3.3.4 Παραδείγματα συγκόλλησης με λέιζερ.....	83
3.4 Κοπή.....	85
3.4.1 Βασικές παράμετροι κοπής με laser.....	89
3.4.2 Ποιότητα κοπής.....	92
3.4.3 Παραδείγματα κοπής με δέσμη laser. ....	93
3.5 Διάτρηση.....	94
3.6 Επεξεργασία επιφάνειας.....	99
3.6.1 Γενικά.....	99
3.6.2 Θέρμανση επιφάνειας.....	99
3.6.3 Λιώσιμο επιφάνειας.....	101
3.6.4 Επίστρωση επιφάνειας.....	101
3.6.5 Κραματοποίηση επιφάνειας.....	102

3.7 Εγγραφή επιφάνειας με laser.....	102
3.7.1 Γενικά.....	102
3.7.2 Εγγραφή με απομάκρυνση υλικού.....	102
3.7.3 Εγγραφή λόγω αλλαγής της μορφολογίας της επιφάνειας.....	103
3.7.4 Εγγραφή με μάσκα.....	104
3.7.5 Απευθείας εγγραφή με το laser.....	104
3.8 Άλλες εφαρμογές των laser στην βιομηχανία.....	106
3.8.1 Γενικά.....	106
3.8.2 Μετρήσεις αποστάσεων.....	106
3.8.2.1 Συμβολομετρικές μέθοδοι.....	106
3.8.2.2 Τηλεμετρία διαμορφωμένης δέσμης.....	108
3.8.2.3 Τεχνικές ήχου παλμών.....	110
3.8.3 Ευθυγραμμίσεις μηχανών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.....	110
3.8.3.1 Μέθοδος λειτουργίας.....	110
3.8.3.2 Εργαλειομηχανές οριζοντίου ή καθέτου άξονα κατεργασίας.....	111
3.8.3.3 Ευθυγραμμίσεις αξόνων –οπών.....	113
3.8.3.4 Κυλινδρομηχανές- Ραουλομηχανές.....	114
3.8.3.5 Μονάδες ηλεκτροπαραγωγής για ευθυγράμμιση των στροβίλων.....	114
3.8.4 Χρήση laser σε εργαλειομηχανές.....	115
3.8.4.1 Ανεστραμμένη φρέζα.....	116
3.8.4.2 Δράπανο.....	116
3.8.4.3 Πλάνη.....	117
3.9 Εφαρμογές στην ιατρική.....	117
3.9.1 Γενικά.....	117
3.9.2 Χειρουργική και Νευροχειρουργική.....	117
3.9.3 Οφθαλμολογία.....	118
3.9.4 Δερματολογία.....	119
3.9.5 Γυναικολογία.....	120
3.9.6 Γαστρεντερολογία.....	120
3.9.7 Ωτολαρυγγολογία.....	121
3.9.8 Ουρολογία.....	121
3.9.9 Κυτταρολογία.....	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	124
Προστασία από την χρήση laser.....	124
4.1 Γενικά.....	124
4.2 Κίνδυνοι από την χρήση laser.....	124
4.2.1 Θερμική αλληλεπίδραση.....	125
4.2.2 Φωτομηχανική αλληλεπίδραση.....	127
4.2.3 Φωτοχημική αλληλεπίδραση.....	127
4.2.4 Αποδόμηση βιολογικών ιστών από την ακτινοβολία laser.....	128
4.3 Τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας Laser.....	129
4.4 Δέσμη Laser και οφθαλμός.....	130
4.5 Δέσμη laser και δέρμα.....	132
4.6 Άλλοι κίνδυνοι.....	135
4.7 Ταξινόμηση laser.....	136
4.7 Μέτρα ασφαλείας.....	138
4.7.1 Τεχνικά μέτρα ασφαλείας.....	138
4.7.2 Μέτρα ασφαλείας σε επίπεδο οργάνωσης της παραγωγής.....	142
4.7.3 Ατομική προστασία.....	143
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	147

### 1.1 Γενικά για την ακτινοβολία Laser

Η τεχνολογία laser και οι αντίστοιχες κατεργασίες με δέσμη laser έχουν βρει σημαντική ανταπόκριση στην βιομηχανία και παρουσιάζουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών τα οποία τους προσδιορίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές διεργασίες.

Η αποδοτικότητα των διεργασιών με δέσμη laser εξαρτάται κυρίως από τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες του υλικού και όχι από τις μηχανικές (αντοχή σε θραύση, όριο θραύσης, σκληρότητα, όρια διαρροής). Κατά συνέπεια υλικά τα οποία είναι δύσκολο να κατεργαστούν με συμβατικές μεθόδους, όπως για παράδειγμα υψηλής σκληρότητας χάλυβας, κεραμικά υλικά, γυαλί, πλαστικά και σύνθετα υλικά, και διαθέτουν τις κατάλληλες θερμικές ιδιότητες, μπορούν να κατεργαστούν πολύ πιο αποτελεσματικά με μια δέσμη laser. Επίσης, στις διεργασίες με δέσμη laser η απαραίτητη για την διεργασία ενέργεια μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας και κατά συνέπεια δεν αναπτύσσονται δυνάμεις μέσω της επαφής εργαλείου υλικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απουσία σημαντικών προβλημάτων που παρουσιάζουν οι συμβατικές διεργασίες αφαίρεσης υλικού, όπως είναι η φθορά, η θραύση, οι ταλαντώσεις κατά την διάρκεια της διεργασίας και οι παραμορφώσεις στα στοιχεία των εργαλειομηχανών.

Ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο υψηλός βαθμός ευελιξίας. Ουσιαστικά το ίδιο σύστημα κατεργασίας και το ίδιο το <<εργαλείο>> δηλαδή η δέσμη laser, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πληθώρα διεργασιών όπως είναι η διάτρηση, η κοπή, η χάραξη, η συγκόλληση, και η θερμική επεξεργασία, με την ίδια προετοιμασία <<setup>> του ίδιου συστήματος laser, μιας και οι διαφορετικές διεργασίες μπορούν να εκτελεστούν μεταβάλλοντας μόνο κάποιες κοινές παραμέτρους. Επίσης εξαιτίας του πολύ μικρού μεγέθους του στίγματος της δέσμης άλλα και της δυνατότητας διαχείρισης της κατανομής ισχύος της δέσμης, οι διεργασίες με δέσμη laser χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους.

Ο σκοπός των διεργασιών αφαίρεσης υλικού με δέσμη laser είναι η μεγιστοποίηση του ποσοστού αφαίρεσης υλικού, εξασφαλίζοντας βέλτιστη ποιότητα και διαστασιολογική ακρίβεια προκειμένου να παραχθεί οικονομικά ένα υψηλής ποιότητας εξάρτημα ή προϊόν. Η αφαίρεση υλικού με δέσμη laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, αεροπορική βιομηχανία, μικροεπεξεργασία, χειρουργική, η δημιουργία τρισδιάστατων απεικονίσεων κτλ. Αυτές οι εφαρμογές όμως είναι σε διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης και βιομηχανικής εκμετάλλευσης. Μερικές από αυτές δεν έχουν εκμεταλλευτεί είτε επειδή δεν προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με ανταγωνιστικές διεργασίες, είτε επειδή δεν είναι ακόμα επαρκώς θεμελιωμένες για βιομηχανική χρήση. Η βιομηχανική χρήση μερικών βασικών διεργασιών με δέσμη laser εξαρτάται επίσης από την περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση των πηγών δέσμης laser χαμηλού κόστους. Η τεχνολογία των lasers προσφέρει διαφορετικές μεθόδους δημιουργίας μιας δέσμης τόσο συ-



νεχούς κύματος όσο και παλμικής, με μήκος κύματος που κυμαίνεται από κλάσματα έως δεκάδες μm.

Ανάλογα με τον μηχανισμό που διέπει την επίδραση της δέσμης laser στο υλικό, οι διεργασίες με δέσμη laser μπορούν να διαχωριστούν σε διεργασίες αφαίρεσης υλικού, συνένωσης ή προσθήκης υλικού, και διεργασίες τροποποίησης των ιδιοτήτων ενός υλικού. Η διαδικασία αφαίρεσης υλικού με δέσμη laser αποτελεί μια εξαιρετικά καθιερωμένη οικογένεια διεργασιών. Κατά τη διάρκεια της επίδρασης της δέσμης στο υλικό, ορισμένη ποσότητα της ακτινοβολούμενης ενέργειας απορροφάται από το υλικό γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών κοντά στην περιοχή του στίγματος της δέσμης με συνέπεια την τοπική εξασθένηση, την τήξη ή και ακόμα την εξαχνωση του υλικού. Ανάλογα με το υλικό που υποβάλλεται σε επεξεργασία, την ισχύ την δέσμης laser, το μέγεθος του στίγματος της δέσμης, και την ταχύτητα σάρωσης, σε περίπτωση σχετικής κίνησης μεταξύ δέσμης και του υλικού, τα αποτελέσματα που προκαλούνται από τη δέσμη στο υλικό μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τα φαινόμενα που προκαλούνται σε :

- **Μηχανικά αποτελέσματα:** Σε περίπτωση μικρών και μέσων τιμών έντασης laser σε συνδυασμό με υψηλές ταχύτητες σάρωσης, η άνοδος της θερμοκρασίας στην επεξεργαζόμενη επιφάνεια είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του υλικού. Κατά συνέπεια, το επεξεργαζόμενο υλικό θερμαίνεται τοπικά και οι σύνδεσμοί των μορίων του υλικού εξασθενούν.
- **Αποτελέσματα αλλαγής φάσης:** Όταν η ένταση της δέσμης laser είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε να ανυψώσει τη θερμοκρασία της ακτινοβολούμενης επιφάνειας του υλικού πάνω από το σημείο τήξης του ή και του σημείου εξαχνωσης.
- **Φυσικές-χημικές αλληλεπιδράσεις:** Ανάλογα με το βοηθητικό υλικό που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε διεργασία, το οποίο και την επηρεάζει, μπορούν να πραγματοποιηθούν φυσικό-χημικές αντιδράσεις μεταξύ του βοηθητικού υλικού και του προς επεξεργασία κομματιού. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ενεργοποίηση φαινομένων, όπως το κάψιμο, η συγκόλληση κτλ.

## 1.2 Φως

Από πολύ παλιά, στους αρχαιότερους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη <<φύση >> του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνοων συζητήσεων, διαφωνιών, επιχειρημάτων και αντεπιχειρημάτων. Το φως ήταν και είναι μια βασική αιτία της ύπαρξης ζωής στον πλανήτη μας. Ας μην ξεχνάμε ότι τα φυτά, με την φωτοσύνθεση, μετατρέπουν την ενέργεια που παρέχεται από το φως του ήλιου σε χημική ενέργεια την οποία στην συνέχεια την χρησιμοποιούν για την ανάπτυξη τους. Το φως είναι αυτό που κάνει ορατά τα αντικείμενα που βρίσκονται στον πλανήτη μας, τη Γη και το σύμπαν. Με τη βοήθεια του φωτός <<επικοινωνούμε >> με τα άστρα και τους πλανήτες του ηλιακού

μας συστήματος αντλώντας χιλιάδες πληροφορίες για τη σύστασή τους. (αυτό επιτυγχάνεται με φασματοσκοπικές μεθόδους.)

Πρώτη οι έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατύπωσαν αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε σωματιδιακή φύση του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβόλουσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης. Σε αυτήν ακριβώς τη σκέψη, δηλαδή τη σωματιδιακή φύση του φωτός, στηρίχτηκε πολύ μεταγενέστερα ο Newton για να διατυπώσει με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός.

Το αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865 όταν ο Maxwell αναπτύσσοντας τη μεγαλειώδη θεωρία του απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή συναντάμε τον Max Planck ο οποίος χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα. Στην πιο σύγχρονη εποχή ο Einstein, χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Κλείνοντας αυτή τη γενική αναφορά στο φως θα πρέπει να αναφέρουμε, ότι τα σημαντικά φαινόμενα που εμφανίζονται όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η εκπομπή ακτινοβολίας από θερμά σώματα αναλύονται παρακάτω, καθώς επίσης ότι στις μέρες μας πιστεύουμε στην διπλή φύση του φωτός, πιο συγκεκριμένα πιστεύουμε ότι συμπεριφέρεται σαν κύμα και σαν σωματίο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως είναι η συμβολή, περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση – εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

### 1.3 Κβαντική θεωρία και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Στην διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα πραγματοποιήθηκε μια ριζική αλλαγή στην άποψη και στην αντίληψη των φυσικών επιστημόνων για τη φύση της ύλης και του φωτός. Η κβαντομηχανική πέτυχε να λύσει το μεγάλο πρόβλημα για την φυσική κατάσταση στον κόσμο των μικροσωμάτιων της ύλης και η κυματομηχανική κατάφερε να λύσει και να εκφράσει με ακριβείς μαθηματικούς τύπους και εξισώσεις την δυαδική κατάσταση της ύλης.

Υπήρχαν και επικρατούσαν δυο ξεχωριστές θεωρίες τις οποίες αποκαλούμε κλασικές. Η μια είναι η ατομική θεωρία του Δημόκριτου και η άλλη είναι οι αντιλήψεις του Dalton για τα άτομα, που περιέγραφαν την ύλη με συνδυασμούς των βασικών σωματιδίων της ύλης, και οι θεωρίες των πεδίων που περιέγραφαν την συμπεριφορά τους σε χώρο και χρόνο χωρίς καμία αναφορά στις σωματιδιακές τους ιδιότητες.

Αυτές οι δύο όμως θεωρίες δεν μπορούσαν να καλύψουν και να εξηγήσουν μια σειρά από φαινόμενα όπως είναι η ακτινοβολία του μέλανος σώματος και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Έτσι λοιπόν στις αρχές του αιώνα μας αναπτύχθηκε μια ριζικά διαφορετικής αντίληψης θεωρία για τα μικροσωμάτια της ύλης και της θεωρίας των πεδίων. Αυτή η θεωρία που έδωσε μια άλλη διάσταση στην εξήγηση του φωτός είναι η κβαντική μηχανική (quantum mechanics) και η κυματομηχανική (wave mechanics).

Οι διάφορες μορφές ακτινοβολούμενης ενέργειας 'όπως οι κοσμικές ακτίνες, το ορατό φως, οι υπεριώδεις ακτινοβολίες και τα ραδιοκύματα είναι γνώστες με την κοινή ονομασία ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Όταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επιδρά με την ύλη τότε έχει σαν αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας στις διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, έτσι η κλασική σκέψη της συνεχούς εκπομπής ακτινοβολίας δεν μπορούσε να καλύψει όλο το φάσμα των φαινομένων που εμφανίζονταν.

Η προσπάθεια που έγινε από τους φυσικούς για να εξηγηθούν και τα τελευταία φαινόμενα καθώς επίσης και οι έρευνες του Max Plank γύρω από το μέλαν σώμα, οδήγησαν τον ίδιο σε μια επαναστατική για την εποχή θεωρία. Η θεωρία γνωστή σαν ασυνεχή εκπομπή και απορρόφησης ακτινοβολίας περιγράφει την διαδικασία εκείνη που λαμβάνει χώρα πάνω στην επιφάνεια ενός υλικού σώματος κατά την έκθεση του σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το σώμα απορροφά κάποια από τα ποσά ενέργειας κάποια άλλα απλώς ανακλώνται και κάποια άλλα ποσά απλώς διαπερνούν το σώμα.

Αντίθετα με τα άλλα σώματα το μέλαν σώμα απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία και επίσης κατά την θέρμανση του ακτινοβολεί όλη την απορροφούμενη ακτινοβολία προς το περιβάλλον με το οποίο βρίσκεται σε θερμική ισορροπία.

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε την εκπεμπόμενη ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας του μέλανος σώματος χρησιμοποιούμε τον τύπο του Stefan Boltzmann

$$E = \sigma * T^4$$

όπου

T: η απόλυτη θερμοκρασία

$\sigma$ : μια παγκόσμια σταθερά

Η ενέργεια αυτή δεν εκπέμπεται σε μια μόνο και μοναδική συχνότητα, ούτε είναι και ομοιογενώς κατανομημένη σε όλο το φάσμα της ακτινοβολίας αλλά για κάθε θερμοκρασία υπάρχει ένα μήκος κύματος όπου η ακτινοβολούμενη ενέργεια είναι μέγιστη και το μέγιστο αυτό μετατίθεται σε χαμηλότερα μήκη κύματος αυξανόμενης της θερμοκρασίας.

Η μη ολοκληρωτική κάλυψη των φαινομένων αυτών από την κλασική θεωρία οδήγησε τον PLANK σε μια νέα ριζοσπαστική ιδέα η οποία κάνει λόγο για την ασυνεχή εκπομπή ενέργειας από το μέλαν σώμα, δηλαδή υποστηρίζει ότι το σώμα εκπέμπει ενέργεια αλλά σε πακέτα, όχι συνεχόμενα. Αυτά τα πακέτα τα ονόμασε QUANTA (KBANTA) ενέργειας (στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σαν κβάντο ορίζουμε το φωτόνιο).

Ο υπολογισμός αυτών των πακέτων ενέργειας γίνεται με την βοήθεια της παρακάτω σχέσης .

$$E = h * \nu$$

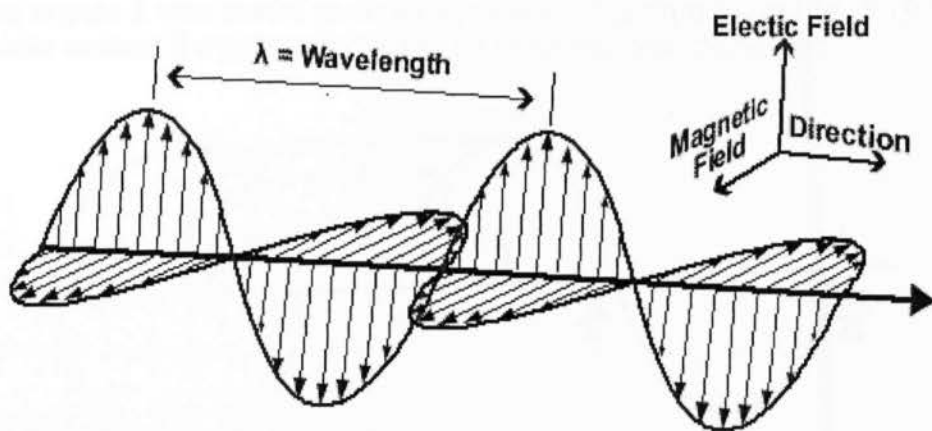
όπου

E : είναι η ακτινοβολούμενη κβαντική ενέργεια

$\nu$  :είναι η συχνότητα

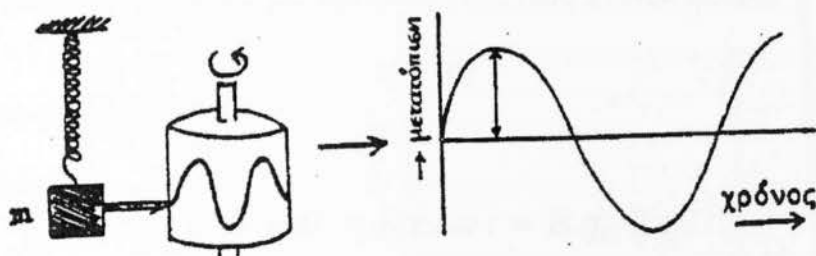
h :είναι η σταθερά του PLANK η οποία ισούται με  $6,6256 \cdot 10^{-27}$

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ουσιαστικά είναι το φως αποτελείται από κύματα ενέργειας που είναι συνδυασμός ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Τα δύο αυτά πεδία διαδίδονται στον χώρο με ταχύτητα που είναι ίση με  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  και η διάταξη τους στον χώρο είναι τέτοια ώστε να σχηματίζουν  $90^\circ$  μεταξύ τους όπως χαρακτηριστικά φαίνεται και στο σχήμα(1).



Σχήμα 1. Μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο χώρο ως συνδυασμό δυο εναλλασσόμενων πεδίων.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεταδίδεται σε ευθεία γραμμή σαν ένα απλό αρμονικό κύμα. Μια σχηματική παράσταση της αρμονικής περιοδικής κίνηση δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί με το ιδανικό ελατήριο στο οποίο έχει προσαρμοστεί μάζα που κινείται αρμονικά χωρίς να χάνει ενέργεια αφού απουσιάζει η τριβή.



Σχήμα 2. Ιδανικό ελατήριο που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση.

Το απλό αρμονικό κύμα έχει την μορφή ημιτονοειδούς καμπύλης.

Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει αυτήν την κίνηση είναι :

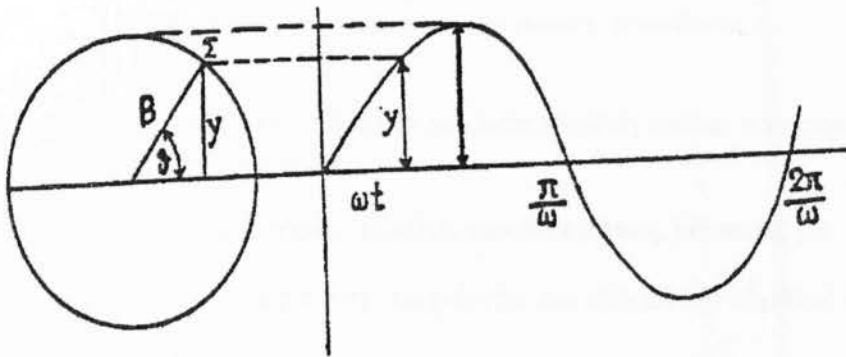
$$y = B \eta \mu \theta$$

Όπου:

$y$  είναι η μετατόπιση με μέγιστη τιμή  $B$

$\theta$  η γωνία που κυμαίνεται από  $0^\circ - 360^\circ$

Για ένα σημείο  $\Sigma$  που κινείται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ( $\theta = \omega t$ ) σε ένα κύκλο ακτίνας  $B$  ο χρόνος για μια πλήρη στροφή είναι  $2\pi/\omega$  sec .



Σχήμα 3. Απλό αρμονικό κύμα που έχει την μορφή ημιτονοειδούς καμπύλης

Ο χρόνος για μια επανάληψη της στροφής γύρω από τον κύκλο θα είναι ο ίδιος. Ο χρόνος αυτός καλείται συχνότητα  $f$  και η μονάδα μέτρησης στο S. I. είναι το hertz με διαστάσεις χρόνου  $\text{s}^{-1}$

Η βασική εξίσωση για την κυματική αρμονική κίνηση είναι :

$$y = B \eta \mu \theta = B \eta \mu \omega t = B \eta \mu 2 \pi f t$$

Ωστόσο μια χρήσιμη σχέση για την φύση του κινούμενου κύματος θα ήταν ο χρόνος  $t$  που απαιτείται για να καλύψει μια ορισμένη απόσταση  $x$  όπου φυσικά

$$x = ct$$

$c$  : ταχύτητα του φωτός

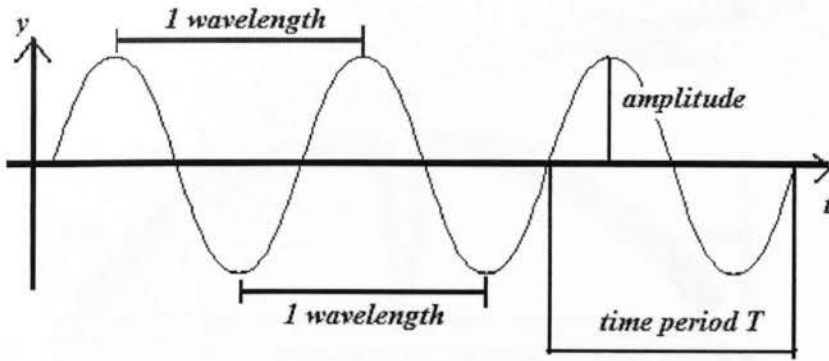
Άρα η σχέση:

$$y = B \eta \mu \theta = B \eta \mu \omega t = B \eta \mu 2 \pi f t$$

Γίνεται

$$y = B \eta \mu 2 \pi f t = B \eta \mu 2 \pi f \frac{x}{c}$$

Το αρμονικό κύμα που σε αυτήν την περίπτωση αντιπροσωπεύει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 4. Αρμονικό κύμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

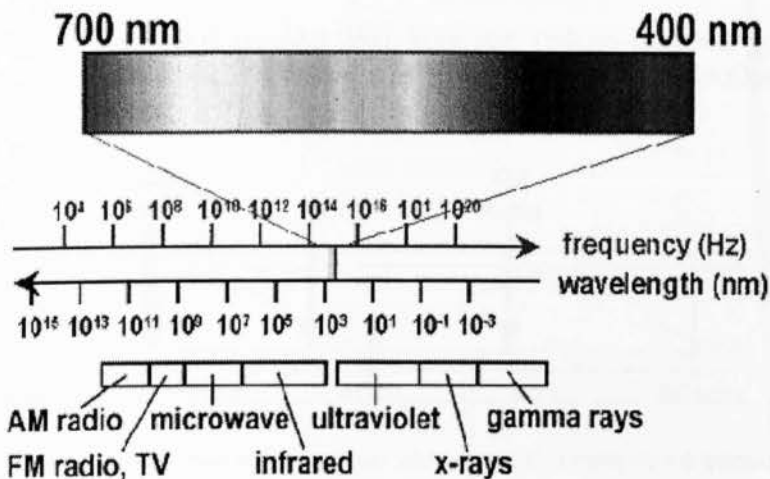
Μια πλήρη περιφορά του κύκλου δίνει στην αναπτυγμένη εικόνα του κύματος την κίνηση από το σημείο α στο σημείο β

Η απόσταση αυτή που χαρακτηρίζει το κύμα καλείται **μήκος κύματος** ( $\lambda$ )

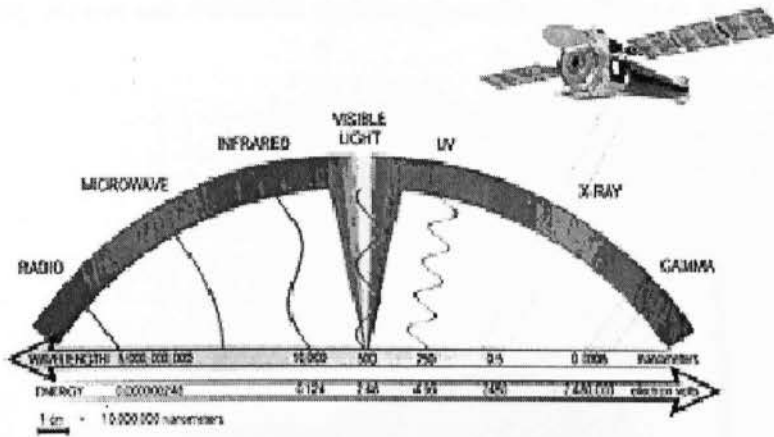
Η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην συχνότητα και στο μήκος κύματος δίνεται από την σχέση:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Στο παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε το μήκος κύματος σε όλο το φάσμα του φωτός. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε, πώς το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.



Εικόνα 1. Σχηματική παρουσίαση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος



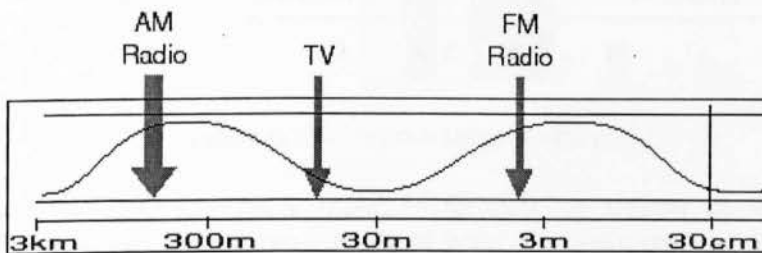
Εικόνα 2. Περιγραφή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Αναλύοντας το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορούμε διακριτά να αναπτύξουμε κάθε μια από τις υποκατηγορίες του.

- Ραδιοκύματα
- Μικροκύματα
- Υπέρυθρο
- Ορατό φως
- Υπεριώδες
- Ακτίνες Χ
- Ακτίνες Γ

### 1.3.1 Ραδιοκύματα

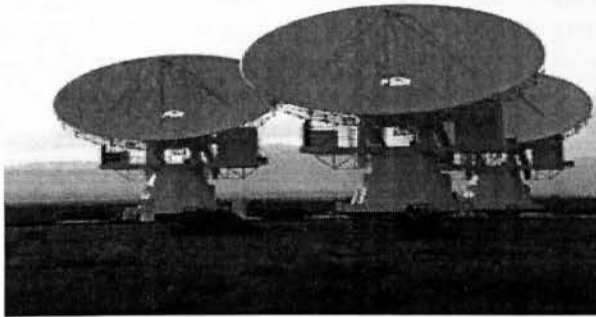
Τα ραδιοκύματα έχουν τα πιο μεγάλα μήκη κύματος, (50cm-1km) και χρησιμοποιούνται από τους ραδιοφωνικούς σταθμούς από τους τηλεοπτικούς σταθμούς και τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας.



Σχήμα 5. Περιοχή των ραδιοκυμάτων μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Λόγω του μεγάλου μήκους κύματος των ραδιοκυμάτων χρησιμοποιούμε μεγάλα παραβολικά τηλεσκόπια για την καταγραφή τυχών ραδιοκυμάτων από κάποιο αστρονομικό αντικείμενο. Για την ανίχνευση σημάτων πολύ μεγάλου μήκους κύματος και για να βελτιώσουν την ποιότητα του σήματος οι επιστήμονες συνδυάζουν πολλά τηλεσκόπια μαζί. Το VLA (Very Large Array) αποτελείται από 27 δέκτες σε σχήμα Y

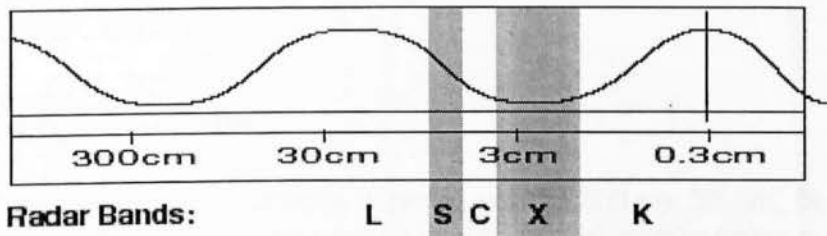
καλύπτει μήκος 36 km και αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα των όσων προαναφέραμε.



Εικόνα 3. Χαρακτηριστικό παράδειγμα διάταξης κατόπτρων για την ανίχνευση ραδιοκυμάτων

### 1.3.2 Μικροκύματα

Τα μικροκύματα έχουν μήκη κύματος που φτάνουν τα μερικά εκατοστά και πιο συγκεκριμένα από 0,1 έως 100 cm που αντιστοιχεί σε συχνότητες μεταξύ 0,3 έως 300 GHz όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω σχήμα.



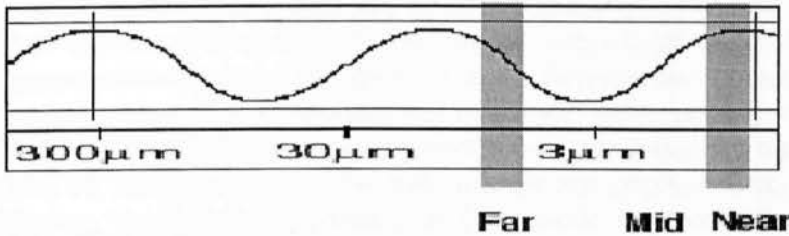
Σχήμα 6. Περιοχή των μικροκυμάτων

Τα μικροκύματα έχουν περισσότερες εφαρμογές σε σχέση με τις άλλες ζώνες ραδιοκυμάτων λόγω του πλούσιου φάσματος τους. Μερικές από τις χρήσεις τους είναι στους φούρνους μικροκυμάτων(καθώς οι μικροκυματικές συχνότητες αντιδρούν με την ύλη), στις τηλεπικοινωνίες(διότι επιτρέπουν την μεταφορά πληροφοριών χωρίς να επηρεάζονται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν την δεδομένη στιγμή), στα radar, σε εφαρμογές Wi-Fi, στο πρότυπο ανταλλαγής αρχείων Bluetooth και τέλος στην κινητή τηλεφωνία.



### 1.3.3 Υπέρυθρο

Το μήκος κύματός τους κυμαίνεται από το 1mm έως τα 700 nm, όπου ξεκινά το ορατό φάσμα. Συνήθως εκπέμπονται από όλα τα σώματα που έχουν κάποια θερμοκρασία. Τα σώματα με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία εκπέμπουν περισσότερες υπέρυθρες και αντίστροφα τα σώματα που απορροφούν περισσότερες υπέρυθρες αυξάνεται η θερμοκρασία τους. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την ταλάντωση των σωματιδίων από τα οποία αποτελείται, η οποία θερμική τους ενέργεια. Οι υπέρυθρες ακτίνες μπορούν να γίνουν αντιληπτές από ορισμένους οργανισμούς, όπως οι σκύλοι και τεχνητά με θερμικές κάμερες. Στην τελευταία συνήθως με μπλε και άσπρο συμβολίζεται το θερμό σημείο, ενώ με πράσινο και κόκκινο το ψυχρό σημείο. Αυτές οι κάμερες χρησιμοποιούνται και για τον εντοπισμό εμπύρετων ατόμων στα αεροδρόμια, όπως στην πανδημία γρίπης του 2009.



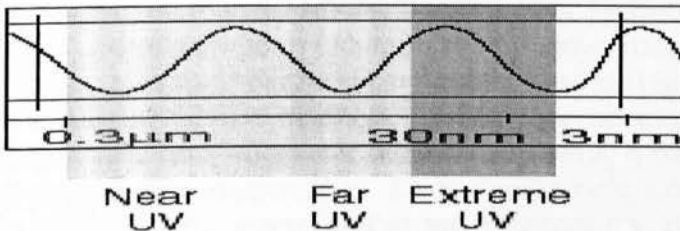
Σχήμα 7. Περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας.

### 1.3.4 Ορατό φως

Το ορατό φως αποτελεί ένα πολύ μικρό κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το λέμε ορατό και είναι σημαντικό για εμάς σε σχέση με τα υπόλοιπα μέρη του φάσματος διότι τα μάτια μας είναι «σχεδιασμένα» να βλέπουν σε αυτά τα μήκη κύματος. Η περιοχή του φάσματος που αντιστοιχεί στο ορατό φως κυμαίνεται από 700nm – 400nm ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ )

### 1.3.5 Υπεριώδη ακτινοβολία

Το υπεριώδες (UV) φως κυμαίνεται περίπου μεταξύ 300 και 30 nm, δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι, αλλά από μερικά έντομα όπως η μέλισσα.



Σχήμα 8. Περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας.

Η φασματική περιοχή του υπεριώδους χωρίζεται σε τρία μέρη:

- 1) Κοντινό UV (πολύ κοντά στο ορατό) UV-A

- 2) το μακρινό UV, που είναι και γνωστό σαν UV-B
- 3) πολύ μακρινό UV που είναι γνωστό και σαν UV-C

όσο πιο μακρινό τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια της ακτινοβολίας

### 1.3.6 Ακτίνες Χ

Οι ακτίνες Χ ή ακτίνες Röntgen αποτελούν ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με περιοχή μήκους κύματος μεταξύ 10nm έως 10pm, που αντιστοιχεί σε περιοχή συχνότητας από 30PHz - 30HHz και σε περιοχή ενέργειας 120eV - 120keV. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται μεταξύ των τμημάτων της υπεριώδους ακτινοβολίας και των ακτίνων γ. Η δεύτερη ονομασία της ακτινοβολίας προέρχεται από το όνομα ενός από τους πρώτους ερευνητές της, του Γερμανού φυσικού, Βίλχελμ Ρέντγκεν (Wilhelm Röntgen) που τις ανακάλυψε το 1895. Οι ακτίνες Χ πρωταρχικά χρησιμοποιήθηκαν από την Ιατρική ως διαγνωστικό εργαλείο με τη μορφή της ακτινογραφίας και από τη Φυσική και τη Χημεία με τη μορφή της κρυσταλλογραφίας. Όμως, οι ακτίνες Χ ανήκουν στις ιονίζουσες ακτινοβολίες, αφού η ενέργειά τους είναι ικανή να προκαλέσει τον ιονισμό ατόμων και μορίων. Επομένως παρουσιάζουν κινδύνους, προκαλώντας βλάβες σε ζωντανούς οργανισμούς και όχι μόνο. Οι ακτίνες Χ διαχωρίζονται σε 2 υποκατηγορίες, ανάλογα με το μήκος κύματος, ανάλογα με την συχνότητα και την ενέργεια τους:

1. . «Μαλακές ακτίνες Χ»: 10nm - 100pm, 30PHz - 3HHz, 120eV - 12keV.
2. . «Σκληρές ακτίνες Χ»: 100pm - 10pm. 3 - 30HHz, 12 - 120keV.

Η διάκριση μεταξύ των ακτίνων Χ και ακτίνων γ άλλαξε τις τελευταίες δεκαετίες. Παλαιότερα υπήρχε και 3<sup>η</sup> υποκατηγορία ακτίνων Χ, αλλά αυτές εντάχθηκαν στις ακτίνες γ, γιατί προκαλούσαν πλέον διεγέρσεις και στους ατομικούς πυρήνες.

### 1.3.7 Ακτίνες Γ

Οι ακτίνες γ ανήκουν στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αποτελούν τις ακτίνες με τη μεγαλύτερη συχνότητα, άρα και κατά φωτόνιο ενέργεια του φάσματος. Η ταχύτητα των ακτινών γ στο κενό ισούται με την ταχύτητα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στο κενό και είναι  $c=299.792.458$  m/s. Το μήκος κύματός τους κυμαίνεται στα  $10^{-10}$  έως  $10^{-14}$  m, ώστε να είναι συγκρίσιμο με τη διάμετρο ενός πυρήνα ατόμου. Είναι εξαιρετικά επικίνδυνες ακτίνες, οι οποίες διασπούν τις ουσίες των κυττάρων και μεταλλάσσουν το DNA προκαλώντας θάνατο σε όλους σχεδόν τους οργανισμούς που εκτίθενται σε αυτήν. Προκύπτουν από πυρηνικές αντιδράσεις, όπως η διάσπαση ραδιενεργών πυρήνων, ή στοιχειωδών σωματιδίων. Είναι προϊόν ενός από τους τρεις τρόπους παραγωγής ραδιενέργειας, συγκεκριμένα της διάσπασης γ. Η ακτινοβολία αυτή δεν είναι σωματιδιακής φύσεως σε αντίθεση με τις άλλες δύο. Η ακτίνες γ δεν είναι ραδιοκύματα και γενικά δεν πρέπει να συγχέεται η ραδιενέργεια με τα ραδιοκύματα, το ραδιόφωνο και τα λοιπά. Ταξινομώντας τις σε κατηγορία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρατηρούμε ότι βρίσκονται πάνω από τις ακτίνες Χ. Οι ακτίνες γ παράγονται από ραδιενεργούς πυρήνες και από αστέρια στο διάστημα. Οι ραδιενεργοί πυρήνες

προκύπτουν από ορυκτά με περιεκτικότητα σε ραδιενεργή ουσία ή από απόβλητα πυρηνικών αντιδραστήρων. Επίσης, από την αντίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα, κατά την οποία παράγεται το Ισότοπο του άνθρακα το οποίο περνά στα φυτά κι από εκεί σε όλη την τροφική αλυσίδα. Γενικά, κάθε ουσία, περιέχει ένα ελάχιστο ραδιενεργό ποσοστό της που παράγει ακτίνες  $\gamma$ . Τα αστέρια εκπέμπουν ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος. Κυριότερες πηγές ακτινών  $\gamma$  θεωρητικά είναι οι αστέρες νετρονίων και οι μαύρες τρύπες. Η ανακάλυψη ισχυρής πηγής ακτινών  $\gamma$  από το κέντρο του γαλαξία μας κάνει τους επιστήμονες να υποψιάζονται ότι στο κέντρο του βρίσκεται μια μεγάλη μαύρη τρύπα.

Μερικές από τις εφαρμογές των ακτινών  $\Gamma$ :

Ιατρικές: Χρησιμοποιούνται όπως οι ακτινογραφίες για την απεικόνιση του εσωτερικού του σώματος. Στις ακτινογραφίες χρησιμοποιούνται οι ακτίνες  $X$ , οι οποίες παράγονται εκείνη τη στιγμή από εξωτερική πηγή και διαπερνούν το σώμα. Μία τεχνική που χρησιμοποιεί τις ακτίνες  $\gamma$  είναι το σπινθηρογράφημα, όπου η ακτινοβολία παράγεται από ένα ραδιενεργό υγρό που έχει χορηγηθεί στον εξεταζόμενο. Αποστείρωση: Χρησιμοποιείται στην πλήρη αποστείρωση τροφίμων εξοντώνοντας όλου τους μικροοργανισμούς και διατηρώντας τις θρεπτικές ουσίες. Στην Ραδιοχρονολόγηση: Ο άνθρακας που κυκλοφορεί στους ζωντανούς οργανισμούς είναι το ισότοπο άνθρακας 14 που είναι ραδιενεργό. Αυτό αποθηκεύεται στους ιστούς και μόλις πεθάνει, απολιθωθεί και ανακαλυφθεί, ο οργανισμός εκπέμπει εξαιτίας του άνθρακα ακτίνες  $\gamma$ , οι οποίες εξαρτώνται από τη διάρκεια της απολίθωσης. Εξέλιξη: Η ραδιενεργή ακτινοβολία του διαστήματος, ειδικά πριν το σχηματισμό της ατμόσφαιρας, συνέβαλλε στις μεταλλάξεις των ειδών άρα και στην εξέλιξη.

## 1.4 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ήταν ένα ακόμα φυσικό φαινόμενο που δεν μπορούσαν να εξηγήσουν με ευκολία οι κλασικές θεωρίες. Το φαινόμενο αυτό είναι η εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια στερεών σωμάτων κατά την έκθεση τους στο φως ορισμένων συχνοτήτων.

Ο Lenard το 1902 βρήκε ότι η ανώτατη τιμή της κινητικής ενέργειας των παραγόμενων ηλεκτρονίων δηλαδή των φωτοηλεκτρονίων εξαρτάτε από την συχνότητα  $f$  του φωτός που προσπίπτει στο σώμα και ότι κάτω από μια ορισμένη τιμή συχνοτήτων  $f_0$  δεν παράγονται φωτοηλεκτρόνια.

Πειραματικά έχει διαπιστωθεί ότι για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ισχύουν τα παρακάτω :

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει μόνο όταν η προσπίπτουσα στη μεταλλική επιφάνεια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει συχνότητα μεγαλύτερη ή ίση από μια ορισμένη τιμή. Η τιμή αυτή ονομάζεται οριακή συχνότητα ή διαφορετικά συχνότητα κατωφλίου. Αν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι τέτοια που μπορεί να προκαλέσει εξαγωγή ηλεκτρονίων τότε ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται είναι ανάλογος της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από το μέταλλο γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα με το φωτισμό της επιφάνειάς του (για την ακρίβεια ο χρόνος από το φωτισμό του μετάλλου μέχρι την εκπομπή φωτοηλε-

κρονίων είναι μικρότερος του  $10^{-9}$  s). Η μέγιστη κινητική ενέργεια με την οποία τα φωτοηλεκτρόνια εγκαταλείπουν το μέταλλο είναι γραμμική συνάρτηση της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, εξαρτάται από το έργο εξαγωγής του μετάλλου αλλά είναι ανεξάρτητη της έντασης της ακτινοβολίας.

## 1.5 Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή , απορρόφηση

### 1.5.1 Αυθόρμητη 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.

Ως γνωστό τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα μόνο σε επιτρεπόμενες τροχιές και η πτώση ή η άνοδος από μια τροχιά σε μια άλλη προκαλεί την εκπομπή ή την απορρόφηση ακτινοβολίας σύμφωνα με την εξίσωση

$$E = h * f .$$

Όπου

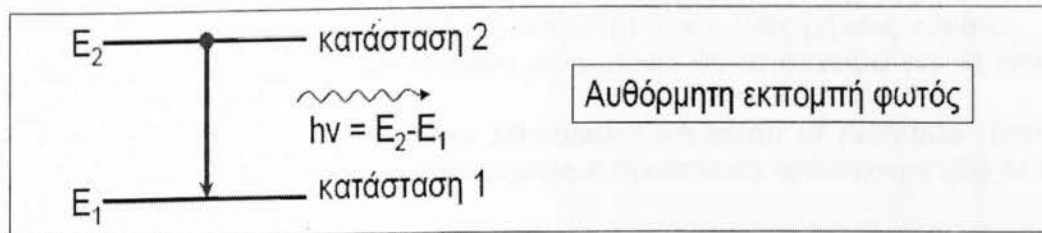
$h$  = σταθερά του Plank

$f$  = συχνότητα

Το ηλεκτρόνιο διατηρεί την τροχιά του λόγω της ηλεκτροστατικής δύναμης που το έλκει προς τον θετικά φορτισμένο πυρήνα και της απωστικής φυγόκεντρου δύναμης που αναπτύσσεται λόγω της περιστροφής του με μεγάλη ταχύτητα.

Η χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση που μπορεί να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση. Όταν ένα άτομο απορροφά ένα φωτόνιο ή ένα κβάντο ενέργειας τότε ένα από τα ηλεκτρόνια μεταπηδά σχεδόν στιγμιαία από μια ενεργειακή κατάσταση σε μια άλλη υψηλότερη. Όταν συμβεί η παραπάνω διαδικασία τότε λέμε ότι το ηλεκτρόνιο είναι σε διεγερμένη κατάσταση.

Για να κατέβει ένα ηλεκτρόνιο από μια υψηλή ενεργειακή θέση σε μια μικρότερη (αντίστροφη διαδικασία ) πρέπει να 'χάσει' ένα κβάντο ενέργειας.



Σχήμα 9. Παράσταση αυθόρμητης εκπομπής

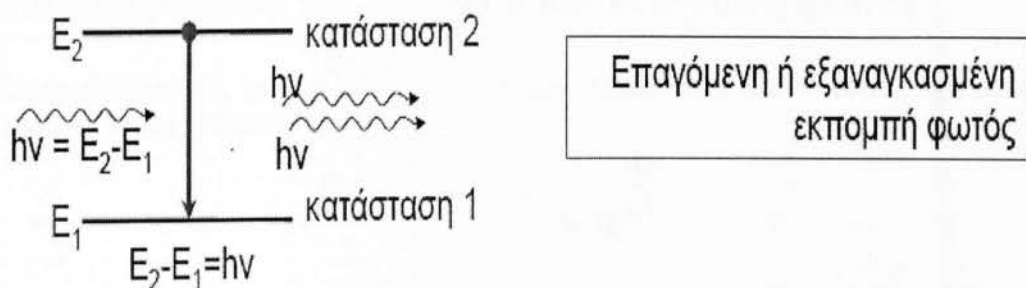
Έστω ότι έχουμε ένα συγκεκριμένο υλικό με δυο ενεργειακά επίπεδα, την θέση 1 με ενεργειακή στάθμη  $E_1$  και την θέση 2 με ενεργειακή στάθμη  $E_2$  και ισχύει ότι  $E_2 > E_1$ . Όταν το μόριο, άτομο βρίσκεται στην θέση 2 τότε έχει την τάση να αποδιεγερθεί και να πάει στην θέση 1 εκπέμποντας ένα φωτόνιο (κβάντο ενέργειας ). Το ποσό της ενέργειας που εκπέμπεται από το άτομο κατά την κίνηση του αυτή ισούται με:

$$f \cdot h = E_2 - E_1$$

Όταν η ενέργεια αποδίδεται με την μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος η διεργασία ονομάζεται **αυθόρμητη εκπομπή**.

### 1.5.2 Εξαναγκασμένη εκπομπή

Στην περίπτωση όπου το άτομο βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση και βομβαρδίζεται από φωτόνια, η συχνότητα και το μήκος κύματος των οποίων είναι ακριβώς το ίδιο με το μήκος κύματος και τη συχνότητα του φωτονίου που θα απελευθερωνόταν από το άτομο κατά την πτώση του από την ενεργειακή στάθμη 2 στην ενεργειακή στάθμη 1. Αυτό το φωτόνιο που προέρχεται από το άτομο είναι πανομοιότυπο με αυτό που το χτύπησε και στην συνέχεια το ξανάστειλε στην θεμελιώδη κατάσταση. Είναι για παράδειγμα σαν ένα μπαλάκι του τένις που χτυπάει στον τοίχο αλλά αντί να αναπηδήσει από τον τοίχο ένα μπαλάκι αναπηδούν δυο κινούμενα κατά την ίδια ακριβώς κατεύθυνση.



Σχήμα 10. Παράσταση εξαναγκασμένης εκπομπής.

Όταν ένα από τα δυο φωτόνια χτυπήσει ένα άλλο διεγερμένο άτομο τότε ένα τρίτο φωτόνιο ελευθερώνεται. Η αλυσιδωτή αντίδραση μπορεί να συνεχίσει να συμβαίνει όσο υπάρχουν τα κατάλληλα είδη ατόμων σε διεγερμένη κατάσταση. Το αποτέλεσμα είναι αρκετό φως το οποίο είναι μιας συχνότητας και ενός μήκους κύματος. Συνοψίζοντας, ο βομβαρδισμός των ατόμων με φωτόνια θα τα διεγείρει για να εκπέμπουν φως.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **stimulated emission of radiation** (διεγερμένη εκπομπή ακτινοβολίας) αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τότε έχουμε ήδη το δεύτερο μισό από την λέξη **la-ser**

Υπάρχει μια βασική διαφορά, διάκριση μεταξύ της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης εκπομπής. Στην περίπτωση της αυθόρμητης εκπομπής το άτομο εκπέμπει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που δεν έχει ορισμένη φασική σχέση με εκείνο που εκπέμπεται από ένα άλλο άτομο και επιπλέον το κύμα μπορεί να εκπεμφθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση αντίθετα στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής η διεργασία επάγεται από το προσπίπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα και έτσι το προσπίπτον κύμα εκτός ότι καθορίζει την διεύθυνση του εκπεμπόμενου βρίσκεται και στην ίδια φάση με αυτό.

### 1.5.3 Απορρόφηση

Στην περίπτωση που το άτομο βρίσκεται στην ενεργειακή θέση 1 (κατώτερο ενεργειακό επίπεδο) και φυσικά είναι το βασικό ενεργειακό επίπεδο του, το άτομο θα παραμείνει σ' αυτό μέχρι να εφαρμοστεί επάνω του ένα εξωτερικό ερέθισμα. Τέτοιο ερέθισμα είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Στην περίπτωση που ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μιας ορισμένης συχνότητας  $f$  πέσει πάνω στο άτομο τότε υπάρχει μια πεπερασμένη πιθανότητα το άτομο να διεγερθεί στο επίπεδο 2. Το ερεθισμένο άτομο όταν θα πέσει από την ενεργειακή στάθμη 2 στην ενεργειακή στάθμη 1 θα απελευθερώσει ενέργεια που θα ισούται με το ποσό της ενέργειας που είχε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Κλείνοντας αυτήν την ενότητα μπορούμε να συνοψίσουμε ότι το laser εκμεταλλεύεται τρία βασικά φαινόμενα που συμβαίνουν όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό. Τα τρία αυτά φαινόμενα είναι η διεργασία της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης εκπομπής και η διεργασία της απορρόφησης.

## 1.6 Αναστροφή πληθυσμών και ενίσχυση φωτός

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

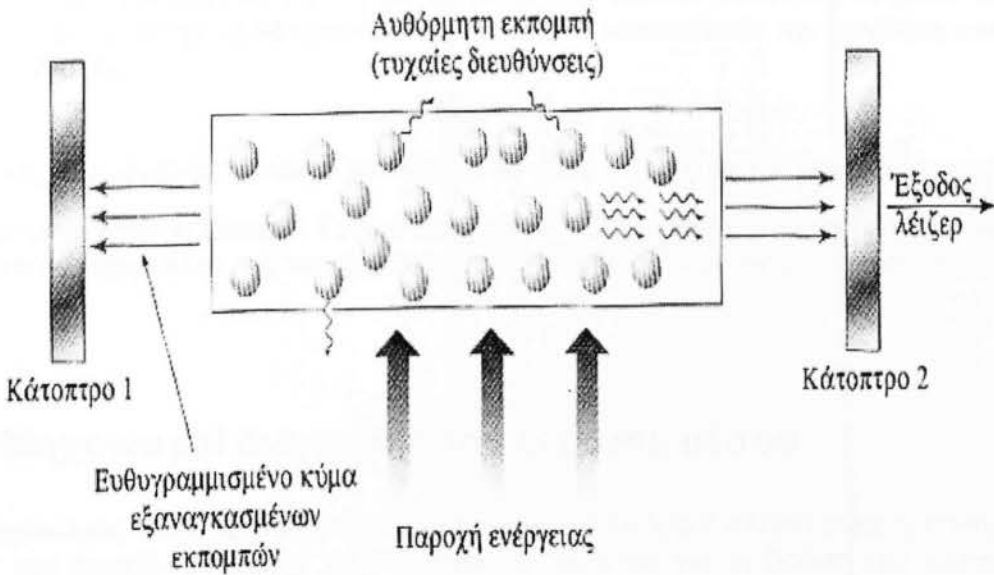
$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-hf}{kT}}$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck  $f$  είναι η συχνότητα του φωτονίου και  $k$  σταθερά του Boltzmann.

Όταν προσπίπτει φως σε ένα σύστημα ατόμων θερμικής ισορροπίας, υπάρχει συνήθως μια καθαρή απορρόφηση ενέργειας, επειδή, σύμφωνα με την κατανομή του Boltzmann υπάρχουν περισσότερα άτομα στην θεμελιώδη στάθμη από ότι σε διεγερμένες (στο δικό μας παράδειγμα είναι η στάθμη 2).

Αν αντιστρέψουμε την κατάσταση, αυτή με διάφορους τρόπους όπως για παράδειγμα υψηλή τάση ή οπτική άντληση, δηλαδή τα περισσότερα άτομα να βρίσκονται στην ενεργειακή κατάσταση 2 τότε δημιουργείται η κατάσταση που λέμε αντιστροφή πληθυσμών. Στην αναστροφή πληθυσμών μπορεί να προκύψει ενίσχυση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Υπό κατάλληλες συνθήκες, ένα και μοναδικό φωτόνιο μπορεί να προκαλέσει μια 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 μεταξύ δυο κατόπτρων όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4. Παράσταση των βασικών μερών ενός laser.

Τα δυο κάτοπτρα είναι ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα της ράβδου. Το οπτικό μήκος της κοιλότητας που δημιουργείται είναι  $d$ , η ανακλαστικότητα του μερικού διαπερατού κατόπτρου είναι  $R$  και η απολαβή έντασης της ράβδου είναι  $G$ . Αρχικά το φως που εκπέμπεται προέρχεται μόνο από φθορισμό ή αυθόρμητη εκπομπή. Αυτή όμως δεν είναι κατευθυντήρα 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 κύκλο στην κοιλότητα η ένταση του πακέτου φωτονίων που σχηματίζεται αυξάνεται κατά  $G^2$  και μειώνεται κατά  $R$ . Αν  $G^2 * R > 1$  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 κατευθυντήριας δέσμης φωτός. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του Laser  $P_0$  είναι το ποσοστό της φωτεινής ισχύος που εξέρχεται μέσω του μερικής διαπερατού κατόπτρου και είναι προσεγγιστικά.

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

Όπου  $N_0$  είναι ο συνολικός αριθμός ατόμων,  
 $V$  ο όγκος του ενεργού υλικού,  
 $h f_{21}$  η ενέργεια του φωτονίου.

Μια δεύτερη προϋπόθεση είναι απαραίτητη για την εκπομπή ακτινοβολίας laser. Εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων, το πακέτο των 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 δυο 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.

$$n\lambda = 2d$$

Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ανακλάσεων, μόνο μήκη κύματος κοντά στις τιμές  $\frac{2d}{n}$  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.

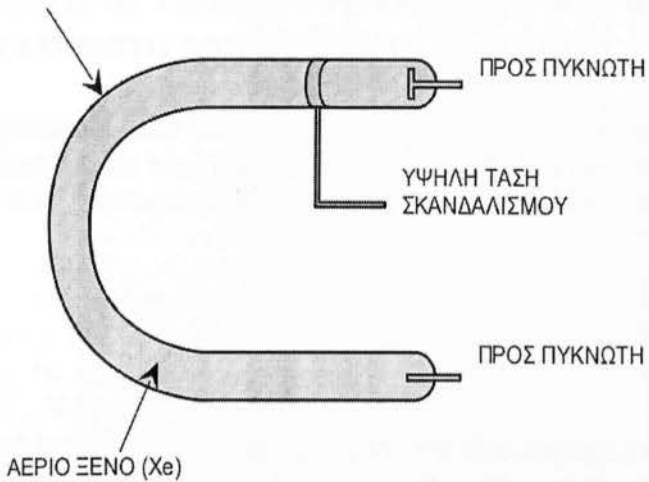
## 1.7 Μηχανισμοί διέγερσης του ενεργού μέσου

Ο μηχανισμός διέγερσης που αναφέρεται και με τον όρο άντληση είναι η πηγή ενέργειας του συστήματος ώστε να επιτευχθεί η αναγκαία για τη δράση του Laser ανατροφή πληθυσμών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι για να επιτευχθεί αυτό.

- I. **Οπτική άντληση – διέγερση με φωτόνια.** Σε πολλά laser όπου το ενεργό μέσο είναι στερεό ή υγρό είναι σύνηθες η απαιτούμενη για τη διέγερση του ενέργεια να προσφέρεται υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολίας, δηλαδή φωτονίων. Οι πλέον κοινές πηγές τέτοιας ακτινοβολίας είναι:
  - Λυχνίες εκκένωσης αερίων χαμηλής ή ακόμα και υψηλής πίεσης όπως για παράδειγμα (ξένο Xe, κρυπτό Kr, ήλιο He)
  - Άλλα laser όπως για παράδειγμα excimer laser, laser αζώτου, διοδικά laser, laser ιόντων αργού.
- II. **Ηλεκτρική διέγερση αερίου.** Στις περιπτώσεις όπου το ενεργό υλικό είναι αέριο πολύ συχνά χρησιμοποιούνται οι ηλεκτρικές εκκενώσεις μέσα στο αέριο αυτό. Τα αέριο του σωλήνα είναι αρχικά σε ουδέτερη ηλεκτρική κατάσταση με τα άτομα ή τα μόρια του αερίου να βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Με την εφαρμογή ενός παλμού υψηλής τάσης και συχνά με επιπλέον βοηθητική θέρμανση της καθόδου παράγονται ηλεκτρόνια τα οποία ευρισκόμενα στη διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου επιταχύνονται, συγκρούονται με άλλα άτομα ή μόρια, τα ιονίζουν ή τους μεταφέρουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας. Η διαδικασία αυτή παράγει άτομα ή μόρια σε διεγερμένες καταστάσεις και είναι δυνατόν να δημιουργηθεί αντιστροφή πληθυσμών. Στην αρχή της εκκένωσης είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί υψηλή τάση ώστε να ξεκινήσει η εκκένωση, ενώ αργότερα μια χαμηλότερη τάση είναι αρκετή για τη διατήρηση της εκκένωσης.
- III. **Διέγερση μέσω κρούσεων με άτομα.** Αποτελεί μια παραλλαγή του προηγούμενου τρόπου διέγερσης, που συναντάται πολύ συχνά στην τεχνολογία laser (όπως για παράδειγμα στα laser He-Ne, laser CO<sub>2</sub>). Όπως και προηγουμένως, ένα αέριο λαμβάνει ενέργεια από τα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται, διεγείρεται και στην συνέχεια την αποδίδει σ' ένα άλλο αέριο μέσω κρούσεων.

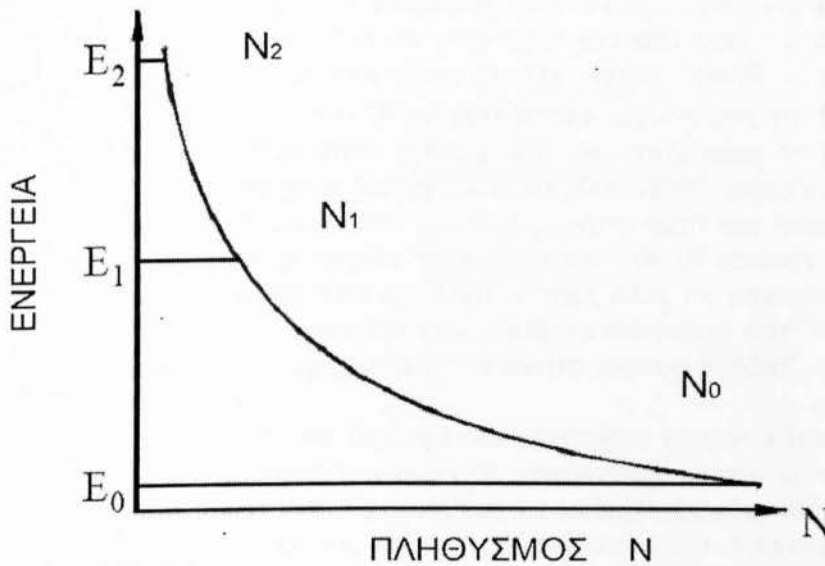


ΓΥΑΛΙΝΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ



Εικόνα 5. Λυχνία εκλάμψεων (flash lamp) ξένου (Xe) σχήματος U

- IV. **Χημική διεργασία.** Κατά τη διέγερση αυτή η απαραίτητη ενέργεια προσφέρεται από χημική αντίδραση ατόμων ή μορίων.
- V. **Διέγερση με ηλεκτρικό ρεύμα.** Κατά τη διέγερση αυτή, που εμφανίζεται στα διοδικά laser η απαραίτητη ενέργεια προσφέρεται από το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το ενεργό μέσο.



Σχήμα 11. Κατανομή Boltzmann για τρεις ενεργειακές στάθμες.

## 1.8 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 τα κάνουν να ξεχωρίζει από τις συμβατικές πηγές φωτός. Αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά είναι:

### 1.8.1 Λαμπρότητα

Η λαμπρότητα δηλαδή η μεγάλη πυκνότητα ισχύος της δέσμης έχει μονάδα μέτρησης  $W/m^2$  (power density ή radiation intensity), όπου σε αυτή την περίπτωση, ιδιαίτερη σημασία παίζει η χρονική εξέλιξη της εξόδου του laser. Όπως θα αναφερθεί στην παρακάτω ενότητα, μία δέσμη laser παρουσιάζει ισχυρή κατευθυντικότητα. Επομένως, η πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρεται όχι μόνο είναι ιδιαίτερα μεγάλη αλλά και σε μία πρώτη προσέγγιση παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την απόσταση. Αντίθετα, σε μία κλασική πηγή όπου έχουμε εκπομπή σε στερεά γωνία  $4\pi$  (εκπομπή προς όλες τις διευθύνσεις), όχι μόνο η πυκνότητα ενέργειας είναι μικρή αλλά και ελαττώνεται πολύ γρήγορα όπως απομακρυνόμαστε από την πηγή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρεται από μία δέσμη laser να είναι τεράστια σε σχέση με οποιαδήποτε κλασική πηγή. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφεύγεται η απ' ευθείας παρατήρηση ενός laser με το μάτι.

Μάλιστα τονίζεται ότι η πυκνότητα ενέργειας από το απλούστερο laser είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου. Για να γίνει αυτό περισσότερο κατανοητό, ας συγκρίνουμε ένα απλό laser ευθυγραμμίσεων He-Ne ισχύος  $5mW$  με τον ήλιο, ο οποίος ακτινοβολεί συνολικά  $3.8 \cdot 10^{26} W$  με πυκνότητα ισχύος στη γη  $1350 W/m^2$ . Η διατομή του laser είναι περίπου  $2mm$  (ακόμα και σε απόσταση  $1m$ ), επομένως η πυκνότητα ισχύος που μεταφέρει η δέσμη του είναι  $1600 W/m^2$ . Δηλαδή, η πυκνότητα ενέργειας από αυτό το απλό laser είναι μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου. Αντίστοιχα, ας συγκρίνουμε το ίδιο laser με λάμπα πυρακτώσεως  $100 W$  (οπτική ισχύ) σε απόσταση  $1m$ . Λόγω της εκπομπής από την λάμπα προς όλες τις κατευθύνσεις, η ακτινοβολία σε απόσταση  $r$  έχει κατανεμηθεί σε σφαίρα επιφάνειας  $4\pi r^2$ . Άρα, η λάμπα των  $100 W$  σε απόσταση  $1m$  προσφέρει πυκνότητα ισχύος  $8 W/m^2$ , 200 φορές μικρότερη από αυτή του laser.

Είναι φανερό επομένως ότι μία δέσμη laser μεταφέρει τεράστια πυκνότητα ενέργειας ή ισχύος αντίστοιχα. Η ιδιότητα αυτή σε συνδυασμό με την κατευθυντικότητα δίνει στο laser τεράστιες δυνατότητες σε σχέση με εφαρμογές μέτρησης απόστασης, αλλά και συστήματα ευθυγράμμισης, καθώς η δέσμη μπορεί να ταξιδέψει πάρα πολύ μακριά. Ταυτόχρονα όμως, η πυκνότητα αυτή ενέργειας, ειδικά η σχετική με εστιασμένες δέσμες από μεγάλα συστήματα laser, προσφέρει τεράστιες δυνατότητες σε κατεργασία υλικών καθώς δίνει την ικανότητα εφαρμογής τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας σε πολύ μικρές διαστάσεις. Σαν παράδειγμα, η εφαρμογή αυτής της πυκνότητας ενέργειας προκαλεί τεράστια αύξηση της θερμοκρασίας άρα και κοπή, διάτρηση ή συγκόλληση ακόμα και μεταλλικών τμημάτων. Οι τεράστιες δυνατότητες φαίνονται ακόμα καλύτερα στην περίπτωση παλμικών laser με πολύ μικρή διάρκεια παλ-

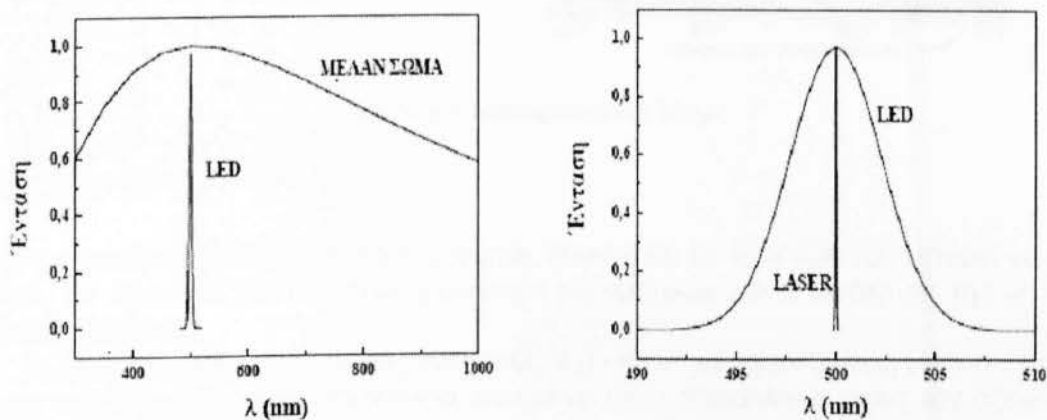
μού (της τάξης 10-15sec). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι πυκνότητες ισχύος είναι τόσο μεγάλες ώστε το σχετιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο υπερβαίνει κατά πολύ αυτό που συγκρατεί τα ηλεκτρόνια στα άτομα.

### 1.8.2 Μονοχρωματικότητα

Η πιο βασική ίσως ιδιότητα της ακτινοβολίας laser είναι η μονοχρωματικότητα της. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $f$  ενισχύεται από το ενεργό μέσο. Αν και καμία φωτεινή πηγή δεν μπορεί να δώσει απολύτως μονοχρωματικό φως τα laser δίνουν την καλύτερη προσέγγιση ως προς αυτό.

Λόγω της αρχής της αβεβαιότητας των κρούσεων και του φαινομένου Doppler η συχνότητα  $f$  έχει μια διαπλάτυνση  $\Delta f$ . Επίσης οι ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης της οπτικής κοιλότητας, οι οποίες βρίσκονται εντός της  $\Delta f$ , θα επιλέξου τελικά τις συχνότητες των laser.

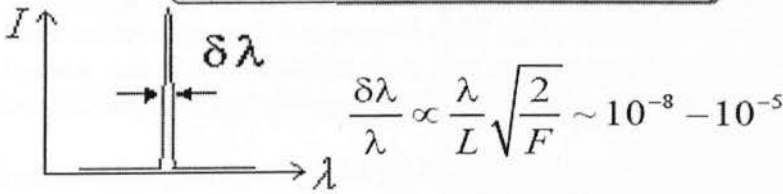
Η φασματική γραμμή εκπομπής από μια πηγή laser είναι ιδιαίτερα λεπτή, μια ιδιότητα την οποία η επιστήμη δεν είχε καταφέρει να επιτύχει με κλασικές πηγές ακόμα και μετά από προσπάθειες πολλών ετών. Για να γίνει κατανοητή η πρόοδος που πέτυχε το laser, η φασματική γραμμή του βρέθηκε να είναι περίπου ένα εκατομμύριο φορές στενότερη από τα καλύτερα αποτελέσματα των κλασικών πηγών.



Εικόνα 6 .Φασματική κατανομή εκπομπής από μέλαν σώμα, LED και LASER.

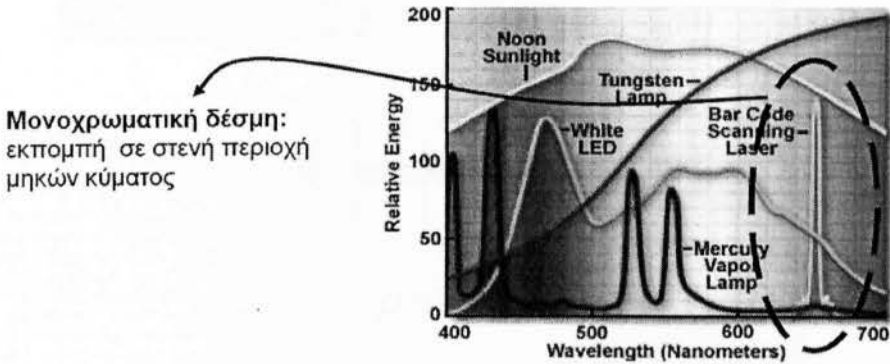
Ένα παράδειγμα πλάτους φασματικής γραμμής εκπομπής κοντά στα 500nm παρουσιάζεται στην εικόνα 6 για μέλαν σώμα (εκπομπή λόγω θερμοκρασίας), LED και LASER, όπου είναι εμφανής η τεράστια διαφορά που επιτυγχάνεται με το LASER. Ταυτόχρονα βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι η πολύ στενή φασματική γραμμή συνοδεύεται από μεγάλο αριθμό φωτονίων, συνδυασμός ιδιοτήτων που ήταν αδύνατος χωρίς το laser.

## μονοχρωματικότητα



Σχήμα 12. Περιγραφή της μονοχρωματικότητας της δέσμης laser

Σε αντίθεση τα φωτόνια μιας πηγής προέρχονται από ένα εύρη φάσμα αποδιεγέρσεων άρα δεν μπορούμε να έχουμε και μονοχρωματικότητα.



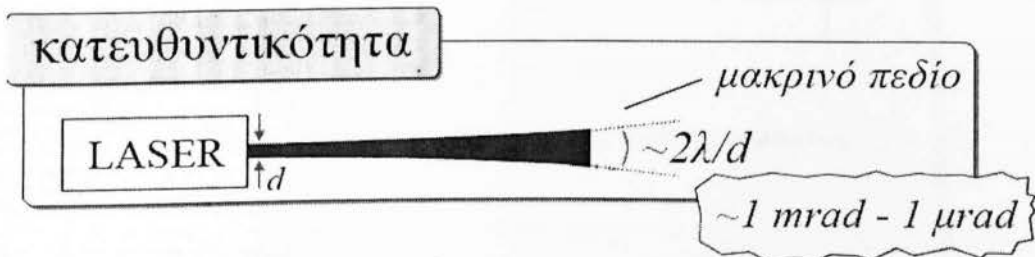
Εικόνα 7. Μονοχρωματική δέσμη

### 1.8.3 Κατευθυντικότητα

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του φωτός laser είναι ότι η δέσμη του μπορεί να ταξιδέψει, να διανύσει μια απόσταση μερικών χιλιομέτρων και η απόκλιση της να είναι μερικά εκατοστά.

Ο λόγος που η δέσμη φωτός ενός laser έχει τόσο μικρή απόκλιση είναι ότι τα φωτόνια που την αποτελούν είναι αυτά που είναι τόσο παράλληλα προς τον άξονα του σωλήνα laser ώστε να μπορούν να παραμείνουν μέσα σε αυτό για όσο διάστημα απαιτεί η διαδικασία ενίσχυσης.

Η απόκλιση συνηθίζεται να εκφράζεται σε mrad. Δηλαδή ένα mrad σημαίνει ότι η δέσμη έχει απόκλιση 1mm αν μέτρο διαδρομής .



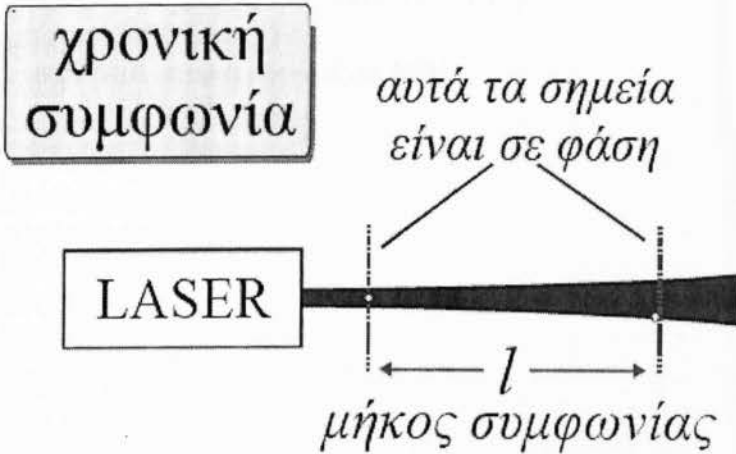
Εικόνα 8 . Περιγραφή της έννοιας της κατευθυντικότητας της δέσμης laser.

### 1.8.4 Συμφωνία φάσης

Είναι η πιο σημαντική ιδιότητα του φωτός laser. Τα φωτόνια που παράγονται ουσιαστικά είναι αντιγραφή από ένα αρχικό μιας και στηρίζομαστε στην διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής δηλαδή είναι ίδια κατά συχνότητα διεύθυνση και φάση, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εκπομπή πανομοιότυπων φωτονίων.

Διεξοδικά μπορούμε να πούμε ότι τα laser ότι έχουν :

#### 1. χρονική συμφωνία



Εικόνα 9. Σχηματική περιγραφή της χρονικής συμφωνίας.

#### 2. χωρική συμφωνία



Εικόνα 10. Σχηματική περιγραφή της χωρικής συμφωνίας.



**Εικόνα 11.** Περιγραφή των διάφορων συσχετισμών που μπορούν να υπάρξουν στη δέσμη φωτός.

- Μπορεί να είναι συνεχούς ή παλμικής εκπομπής
- Να εκπέμπουν από IR έως UV
- Να έχουν ισχύ από μερικά mW μέχρι MW

## Αρχές λειτουργίας και ιδιότητες των laser

### 2.1 Περιγραφή της λειτουργίας Laser

Το laser είναι μια διάταξη που παράγει μια δέσμη σύμφωνου φωτός, κάθε laser έχει μια πηγή ατόμων τα οποία αποτελούν το λεγόμενο ενεργό μέσο. Το ενεργό μέσο μπορεί να είναι ένα αέριο, ένα υγρό ή ένα στερεό(να θυμίσουμε ότι το πρώτο laser που κατασκευάστηκε είχε ένα κρύσταλλο, κρύσταλλος ρουμπινιού). Τα άτομα του μέσου αυτού διεγείρονται σε μετασταθείς καταστάσεις μέσω μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Όταν τα περισσότερα άτομα είναι διεγερμένα ένα μοναδικό φωτόνιο που θα εκπεμφθεί από ένα άτομο που υφίσταται αποδιέγερση, μπορεί να πυροδοτήσει μια «αλυσιδωτή αντίδραση». Το φωτόνιο προσπίπτει σε ένα άλλο άτομο, προκαλώντας εξαναγκασμένη εκπομπή, κ .ο. κ με αποτέλεσμα τη δημιουργία δέσμης φωτός laser, το μεγαλύτερο μέρος του φωτός αυτού διαδίδεται αρχικά σε τυχαίες κατευθύνσεις. Το φως που διαδίδεται όμως κατά μήκος του άξονα του laser αντανακλάται σε δυο παράλληλα κάτοπτρα με κατάλληλη επίστρωση ώστε να ανακλούν επιλεκτικά το φως ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος. Το ένα κάτοπτρο είναι πλήρως ανακλαστικό, ενώ το άλλο μερικώς. Τα ανακλώμενα κύματα ενισχύονται μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ύστερα από κάθε κύκλο ανακλάσεων ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα και δημιουργούν με τον τρόπο αυτό συνθήκες συντονισμού υπό τις οποίες η ένταση του φωτός αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό. Το φως που διαφεύγει από το άκρο του ημιπερατού κατόπτρου αποτελεί τη δέσμη laser.

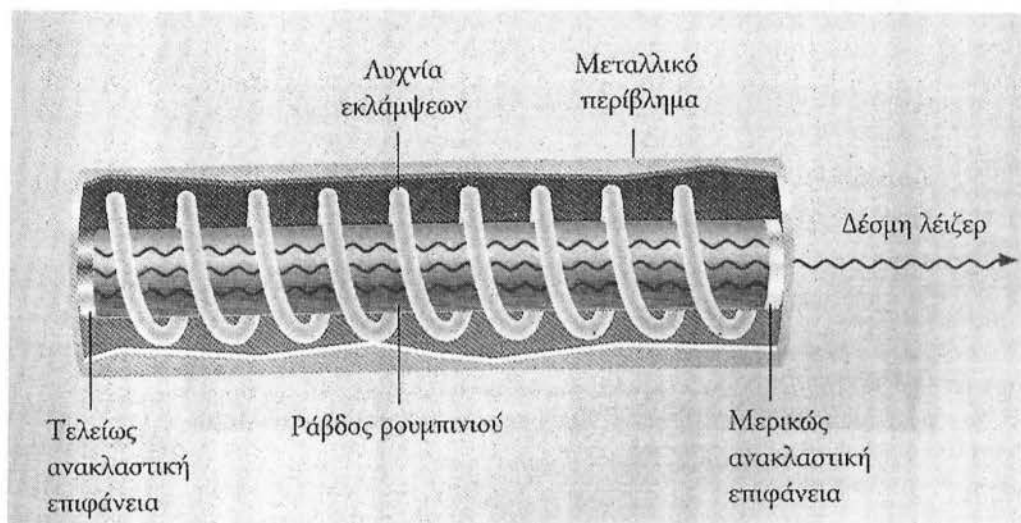
#### ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ



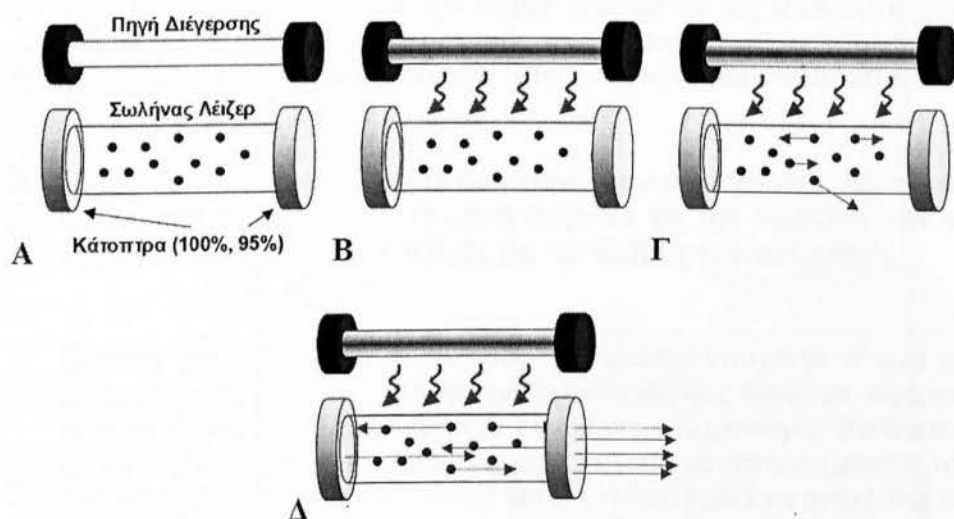
Εικόνα 12. Γενική εικόνα ενός laser

Τα πρώτα laser που αναπτύχθηκαν ήταν τα laser κρυστάλλων και αερίων, και ακολούθησαν τα laser γυαλιού, υγρού, ημιαγωγών, καθώς και τα χημικά laser. Τα σύγχρονα μοντέλα παράγουν δέσμες με μήκος κύματος που εκτείνονται από το υπέρυθρο έως το υπεριώδες.

Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να διακρίνουμε την αρχή λειτουργίας των laser.



Εικόνα 13. Το Ruby laser είναι το πρώτο laser που εφευρέθηκε .

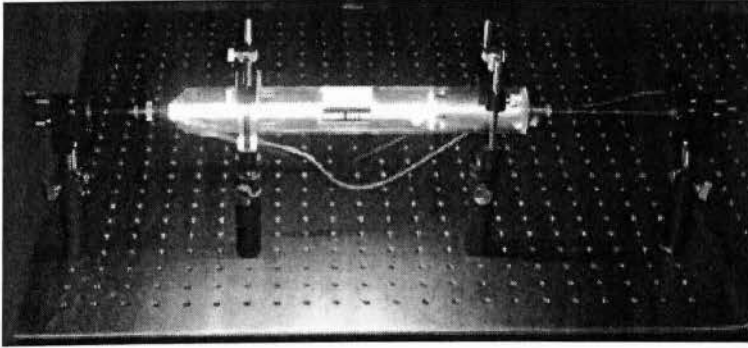


Εικόνα 14. Βήματα λειτουργίας του laser:

- A. Laser σε κατάσταση ηρεμίας.
- B. Η πηγή διέγερσης τίθεται σε λειτουργία
- Γ. Τα άτομα του υλικού απορροφούν ενέργεια, περνούν σε κατάσταση διέγερσης και αρχίζουν να ελευθερώνουν φωτόνια.
- Δ. Τα φωτόνια ανακλούνται μεταξύ των δυο κατόπτρων, απελευθερώνουν άλλα φωτόνια και όταν αυξηθούν αρκετά, τότε μερικά ξεφεύγουν.



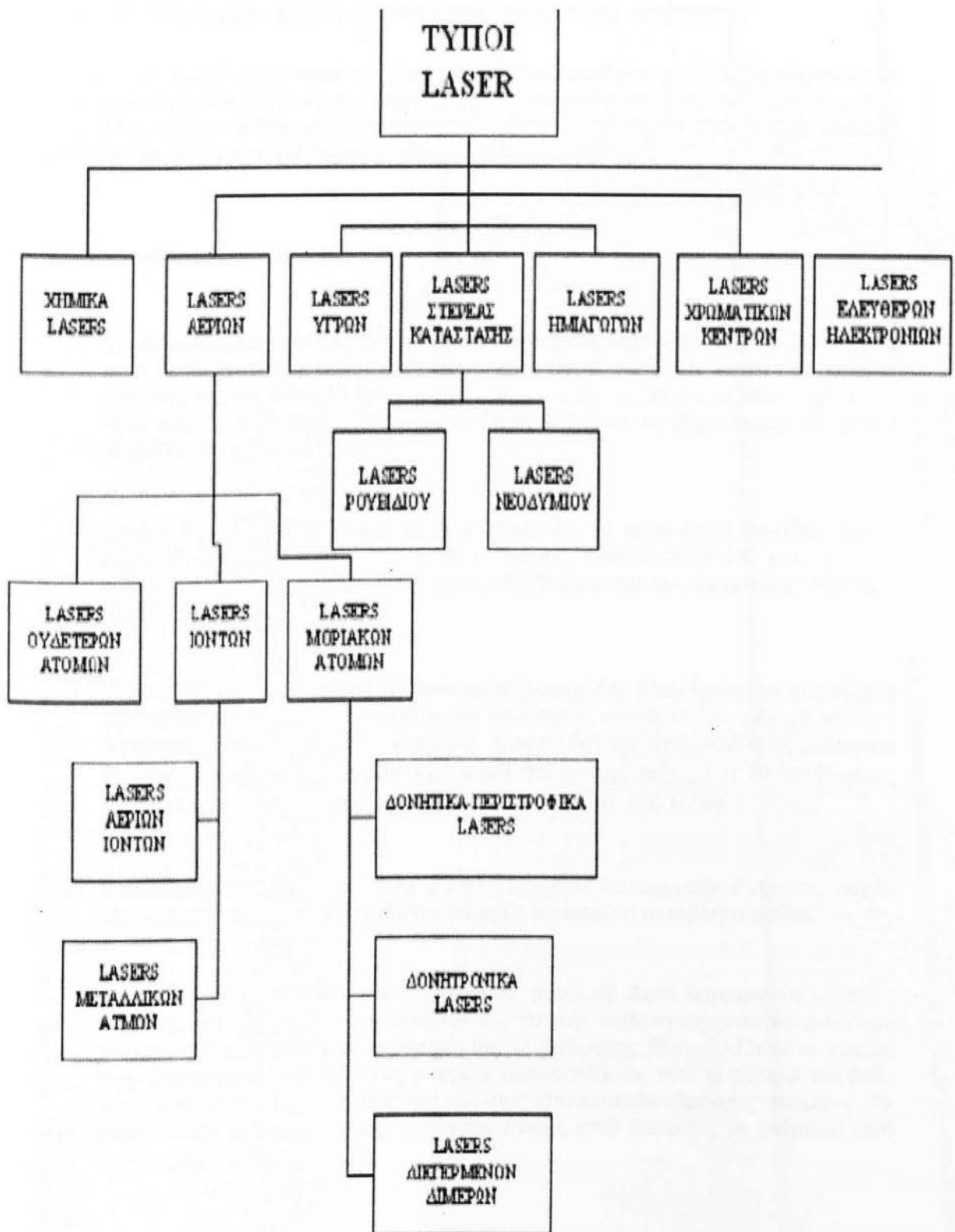
## 2.2 Τα κυριότερα μέρη του laser



- **Ενεργό υλικό εκπομπής:** Περιέχει τα άτομα, μόρια τα οποία αρχικά θα διεγείρονται σχηματίζοντας την δέσμη του laser. Σημαντική προσθήκη για την απόδοση του laser είναι το υλικό να έχει τρεις τουλάχιστον ενεργειακές στάθμες. Το ενεργό μέσο καθορίζει το μήκος κύματος της εξερχόμενης ακτινοβολίας, τη μέθοδο διέγερσης που πρέπει να ακολουθηθεί, την τάξη μεγέθους της εξερχόμενης ισχύος και τέλος την αποδοτικότητα του συστήματος.
- **Πηγή άντλησής:** Είναι εξωτερική πηγή που παρέχει στα άτομα του ενεργού υλικού του laser την απαιτούμενη ενέργεια για την διέγερση των ατόμων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες για την έναρξη των εκπομπών.
- **Οπτική κοιλότητα.** Ο μηχανισμός ανάδρασης επιτρέπει σ' ένα μέρος, της παραγόμενης μέσα στο ενεργό μέσο ακτινοβολίας laser να παραμείνει μέσα σ' αυτό και να αυξηθεί σε ένταση. Συνήθως, ο μηχανισμός ανάδρασης αποτελείται από δυο ευθυγραμμισμένα μεταξύ τους κάτοπτρα (μεταξύ των οποίων βρίσκεται το ενεργό μέσο), ούτως ώστε η ακτινοβολία να ανακλάται από το ένα στο άλλο διασχίζοντας το ενεργό μέσο. Η διάταξη αυτή ονομάζεται οπτική κοιλότητα. Τις περισσότερες φορές το ένα κάτοπτρο 100% ανακλαστικό ενώ το άλλο μερικώς ανακλαστικό (από 10 έως 99%, ανάλογα με τον τύπο του laser). Το μέρος της ακτινοβολίας που διαφεύγει από το ημιπερατό κάτοπτρο αποτελεί την ακτινοβολία laser. Η ανάδραση επιτρέπει στα φωτόνια να διασχίσουν πολλές φορές την οπτική κοιλότητα και να πολλαπλασιασθούν, δηλαδή να ενισχυθεί η ακτινοβολία laser. Εξ αιτίας της γεωμετρίας της οπτικής κοιλότητας μόνο τα φωτόνια που ταξιδεύουν πάνω στον οπτικό άξονα «επιζούν» και ενισχύονται. Αυτό έχει ως συνέπεια την κατευθυντικότητα της δέσμης των ακτινών laser.

- **Συζευκτική έξοδος:** Είναι ο μηχανισμός εξόδου της ακτινοβολίας αποτελείται από ένα ημιπερατο κάτοπτρο. Το μέρος της δέσμης που δεν ανακλάται από το κάτοπτρο αυτό μέσα στο ενεργό μέσο, εξέρχεται της κοιλότητας του laser. Στα laser συνεχούς λειτουργίας (CW) το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται από το ημιπερατό κάτοπτρο και παραμένει μέσα στην κοιλότητα, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό εξέρχεται της κοιλότητας. Αντίθετα, σε μερικά παλμικά laser το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ακτινοβολίας μια συγκεκριμένη στιγμή εξέρχεται της κοιλότητας με τη μορφή ενός παλμού. Γενικά, ο ρόλος της οπτικής κοιλότητας είναι να υποστηρίξει τους τρόπους ταλάντωσης της ακτινοβολίας laser, στους οποίους συγκεντρώνεται τελικά όλη η ενέργεια του laser.

## 2.3 Τύποι Laser.



### 2.3.1 Τύποι Laser και οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες:

Υπάρχουν πολλοί τύποι laser και μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους, και σύμφωνα με το ενεργό μέσο από το οποίο απαρτίζονται. Έτσι λοιπόν οι δυο μεγάλες κατηγορίες είναι: Η κατηγορία που χωρίζει τα laser ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους και η δεύτερη ανάλογα με το ενεργό μέσο.

#### 2.3.1.1 Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας

- **Continuous Waves Laser CW (laser συνεχούς λειτουργίας.)** Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με σταθερό ρυθμό ισχύος της δέσμης. Στα περισσότερα laser μεγάλης ισχύος υπάρχει δυνατότητα καθορισμού της, ενώ στα laser αερίων μικρής ισχύος η ισχύς εξόδου είναι σταθερή εκ κατασκευής και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.
- **Single Pulse Lasers (laser μονού παλμού).** Τα laser αυτά συνήθως έχουν διάρκεια παλμού από μερικές εκατοντάδες microsecond ως μερικά milliseconds. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας αναφέρεται και ως κανονικός τρόπος ή μακρύς παλμός.
- **Single Pulsed Q-Switched ( laser μετατροπής Q).** Είναι εκείνα τα συστήματα στα οποία μια καθυστέρηση εκτός της κοιλότητας επιτρέπει στο ενεργό μέσο να αποθηκεύει το μέγιστο της ενέργειας. Έπειτα ύστερα από συνθήκες βέλτιστου κέρδους, η εκπομπή συμβαίνει με μονό παλμό της τάξης του  $10^{-8}$  s. Η ισχύς των παλμών αυτών συνήθως φτάνει σε επίπεδα  $10^6$  και  $10^8$  W.
- **Παλμικά laser.** Είναι αυτά τα συστήματα που λειτουργούν όπως τα μονού παλμού, με επανάληψη της διαδικασίας με σταθερό ή μεταβλητό ρυθμό.
- **Mode Locked Lasers (laser εγκλειδωσης ρυθμού).** Αυτά λειτουργούν ως αποτέλεσμα των συντονισμένων ρυθμών της οπτικής κοιλότητας οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης δέσμης. Όταν οι φάσεις των διαφορετικής συχνότητας ρυθμών συγχρονίζεται, τότε οι ρυθμοί συμβάλλουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα στενούς επαναλαμβανόμενους παλμούς. Τα laser αυτής της κατηγορίας παράγουν σειρές από παλμούς με διάρκεια από  $10^{-12}$  ως  $10^{-15}$  seconds.

### 2.3.1.2 Ανάλογα με το ενεργό μέσο που χρησιμοποιούν.

Χωρίζονται στα παρακάτω:

- Laser στερεάς κατάστασης (κρυσταλλικά ή γυαλιού )
- Αερίων
- Υγρών
- Χημικά
- Διοδικά
- Χρωματικών Κέντρων
- Ακτινών Χ
- Ελευθέρων Ηλεκτρονίων

#### 2.3.1.2.1 Laser στερεάς κατάστασης

Όπως δηλώνει και ο τίτλος στα laser της κατηγορίας αυτής το ενεργό υλικό είναι στερεό, συνήθως υπό την μορφή προσμίξεων μέσα σε κάποιο υποδοχέα.

Τα άτομα στη στερεά κατάσταση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και αλληλεπιδρούν. Γι' αυτό το εύρος των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των άλλων τύπων laser. Ευρύ φάσμα απορρόφησης σημαίνει πως η προσφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από πηγή φωτός και μάλιστα όχι απαραίτητα Laser.

Το ενεργό υλικό στο laser στερεάς κατάστασης είναι ένα συγκεκριμένο υλικό, όπου όμως έχει γίνει έγχυση άλλου υλικού με τη μορφή ιόντων όπως προείπαμε και παραπάνω. Το ιόν ανήκει συνήθως σε μια από τις σειρές μεταπτώτικων στοιχείων του περιοδικού πίνακα. Τα ιόντα του υλικού πρόσμιξης αντικαθιστούν άτομα του υλικού βάσης και είναι αυτά που παρέχουν τα κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα για τη μεταπήδηση των ατόμων, μορίων. Το υλικό βάσης επηρεάζει λιγότερο το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, καθορίζει όμως τις φυσικές ιδιότητες του ενεργού υλικού, όπως θερμοχωρητικότητα, διαστολή και επομένως τη μέγιστη δυνατή εκπεμπόμενη ισχύ.

Το στερεό ενεργό υλικό που διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία είναι κρύσταλλος ή γυαλί, συνήθως σε σχήμα κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο. Η ενέργεια εισέρχεται από την παράπλευρη επιφάνεια, ενώ η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία laser εξέρχεται από μια από τις βάσεις. Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή laser με παλμούς είναι συνήθως από λάμπες ξένου ή κρυπτού χαμηλής πίεσης. Η προσφερόμενη ενέργεια για εκπομπή συνεχούς laser είναι συνήθως από λάμπες αλογόνου ή υδραργύρου υψηλής πίεσης. Τα τελευταία χρόνια εξελίχθηκε και η τεχνολογία των laser διόδων τα οποία έχουν εφαρμογή και στην προσφορά ενέργειας για Laser στερεάς κατάστασης, επειδή το μήκος κύματος των laser διόδων μπορεί να προσαρμοστεί και να ταιριάζει στο φάσμα απορρόφησης του ενεργού (στερεού) υλικού.

Μερικά από τα πιο γνωστά στερεά laser είναι:

- Laser **ρουβινιού** (ρουμπινίου )

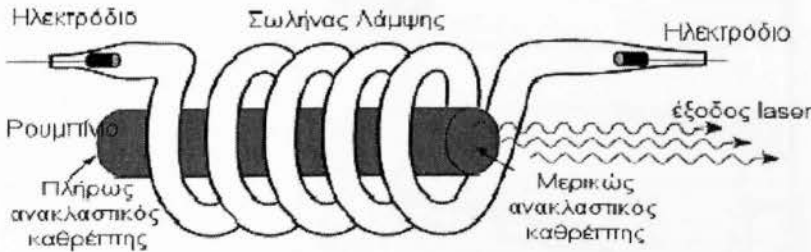
Πρωτοκατασκευάστηκε το 1960. Το ρουβίνιο είναι ένας συνθετικός κρύσταλλος οξειδίου του αλουμινίου ( $Al_2O_3$ ) και είναι περισσότερο γνωστό ως πολύτιμος λίθος. Το

ρουβίνιο υφίσταται έγχυση ιόντων χρωμίου ( $Cr^{+3}$ ) ως πρόσμιξη που αντικαθιστούν άτομα  $Al$  (αλουμινίου). Η παρουσία του χρωμίου είναι που δίνει στο ρουμπίνι το χαρακτηριστικό του βαθύ χρώματος και επίσης τα κατάλληλα διεγερμένα άτομα του χρωμίου είναι αυτά που ευθύνονται για τα ενισχυτικά αποτελέσματα του laser.



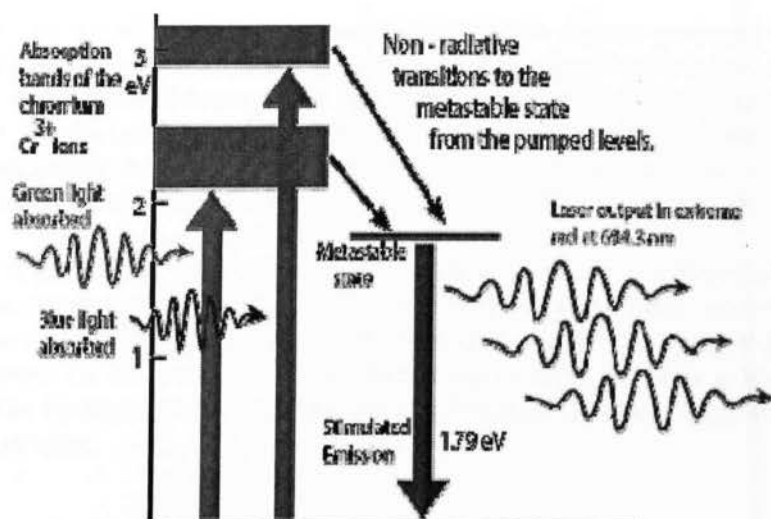
Εικόνα 15. Το πρώτο laser που κατασκευάστηκε (laser ρουμπινίου)

Μια λάμπα ξένον όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα (13) που ακολουθεί παρακάτω προσφέρεται ενέργεια στο ενεργό υλικό και τα ιόντα  $Cr$  απορροφούν μήκη κύματος της περιοχής 500-600nm και μεταβαίνουν στο ενεργειακό επίπεδο  $E_3$ , από το οποίο αποδιεγείρονται «πέφτουν» στο μετασταθερό επίπεδο  $E_2$  χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας, αλλά με δονήσεις που μετατρέπονται σε θερμότητα. Ο χρόνος ημιζωής του  $E_2$  είναι 5ms.

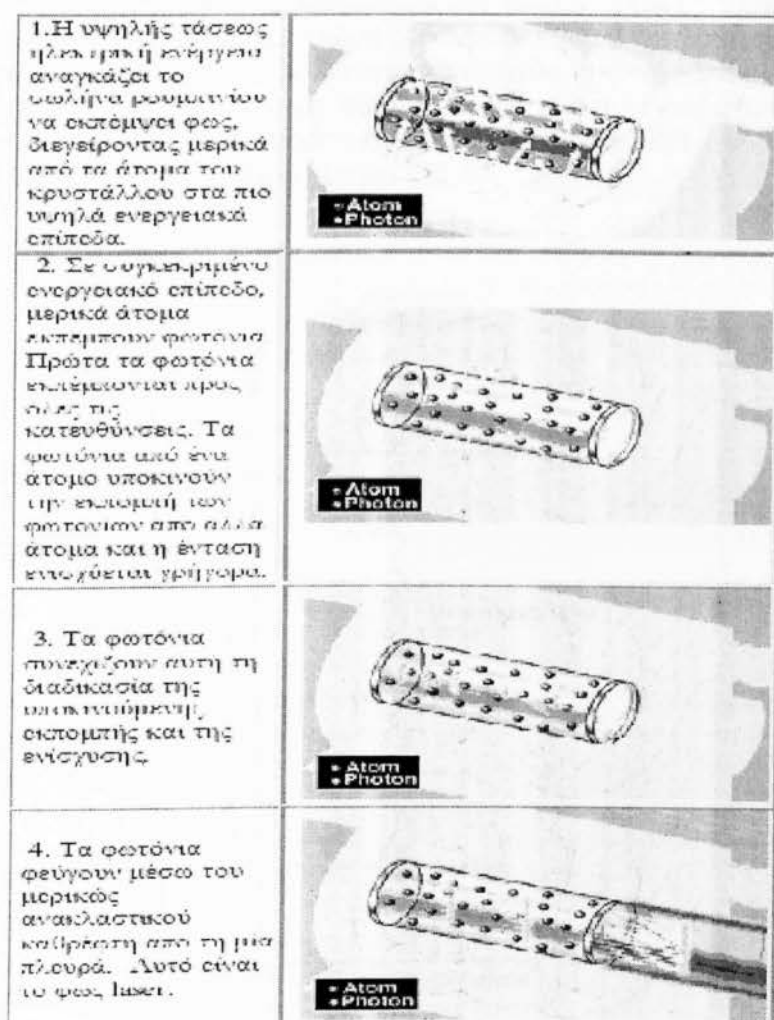


Σχήμα 13. Ο μηχανισμός που προσφέρει ενέργεια ώστε να υπάρξει η αντιστροφή πληθυσμών και το laser να μπορέσει να λειτουργήσει.

Η ράβδος του κρύσταλλου έχει τα άκρα της επίπεδα βερνικωμένα και επικαλυμμένα μ' ένα ανακλαστικό υλικό. Πολλά από τα διεγερθέντα άτομα του χρωμίου αποδίδουν το πλεόνασμα της ανεργίας τους με αυτόματη εκπομπή και το εκπεμπόμενο φως διαφεύγει από τις πλευρές της ράβδου. Πολύ λίγα άτομα θα αποδώσουν το φως προς την κατεύθυνση των άκρων τα οποία είναι διαμορφωμένα κάτοπτρα. Το Laser ρουβινίου είναι τριών επιπέδων και άρα δύσκολο να εκπέμψει συνεχή ακτινοβολία. Η λάμπα ενεργοποίησης φορτίζεται με ειδικό πυκνωτή που εκφορτίζεται για μερικά msec. Επομένως και η διάρκεια των laser (ερυθρών) παλμών του ρουβινίου θα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Τα παραγόμενα φωτόνια αντανακλώνονται από τους καθρέφτες και διασχίζουν το ενεργό υλικό μπρος-πίσω πολλές φορές, αυτοπολλαπλασιάζομενα. Όσα όμως φωτόνια παρεκκλίνουν της παράλληλης προς τον κύριο άξονα πορείας, απορροφώνται από το υλικό της παράπλευρης επιφάνειας. Η ράβδος – ενεργό υλικό – του Laser ρουβινίου μπορεί να έχει διάμετρο από 0,6-2,0cm και μήκος από 7-20cm.



Σχήμα 14. Παρουσιάζει την διέγερση των ατόμων στην ενεργειακή στάθμη 3, καθώς και την διαδρομή που ακολουθούν κατά την αποδιέγερση τους.



Εικόνα 16. Τα στάδια λειτουργίας του laser ρουβινίου συνοπτικά ακολουθούμενα από σχήματα.

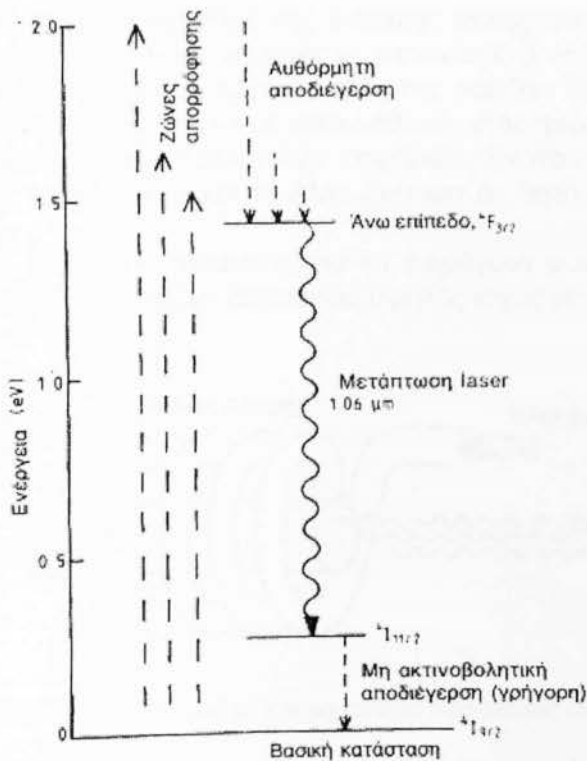
Από τότε που αναπτύχθηκε το laser ρουβινίου έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά συστήματα κρυστάλλων σε συσκευές laser και με κατάλληλη εκλογή του κρυστάλλου μπορούν να παραχθούν δέσμες laser μιας επιθυμητής περιοχής μηκών κύματος.

Τα laser ρουβινίου τα πρώτα χρόνια χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό σε διάφορες εφαρμογές όμως με την αλματώδη εξέλιξη της τεχνολογίας η ευρεία χρήση τους μειώθηκε σημαντικά μιας και laser νέας τεχνολογίας αντικαθιστούν τα παλαιότερα.

Μια νέα τεχνολογίας laser είναι τα laser Nd(νέοδυμίου). Το laser ρουβινίου δουλεύει σαν σύστημα τριών επιπέδων και η απαιτούμενη αντλητική ενέργεια κατωφλίου είναι περίπου μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από αυτήν του laser Nd:YAG συγκρίσιμου μεγέθους. Τα συγκεκριμένα laser έχουν εφαρμογές σε έναν σημαντικό αριθμό επιστημονικών εφαρμογών όπως είναι για παράδειγμα η παλμική ολογραφία και πειράματα τηλεμετρίας.

### • Laser Νεοδυμίου

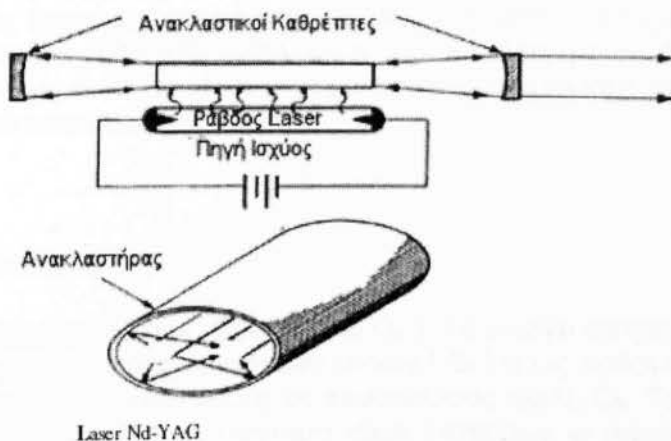
Είναι ο πιο δημοφιλής τύπος στερεάς κατάστασης. Η λειτουργία του στηρίζεται στο ενεργό μέσο το οποίο είναι ένας κρύσταλλος  $Y_3 Al_5 O_{12}$  (YAG : Yttrium Aluminum Garnet ) πολύ απλά μπορούμε να πούμε ότι είναι ένα γυαλί εμπλουτισμένο με  $Nd^{+++}$ . Το ιόν του νεοδυμίου διεγείρεται με έντονη ακτινοβολία, η οποία απορροφάται από 4 ζώνες απορρόφησης, μεταξύ 570 και 900nm. Το ιόν στη συνέχεια αποδιεγείρεται και παράγει ακτινοβολία σε τρία διαφορετικά μήκη κύματος, στα 0,9-1,06, και 1,35μm με τη γραμμή 1,06 να είναι πιο ισχυρή (σχήμα 15).



Σχήμα 15. Ενεργειακό διάγραμμα των μεταπτώσεων του laser Nd:YAG



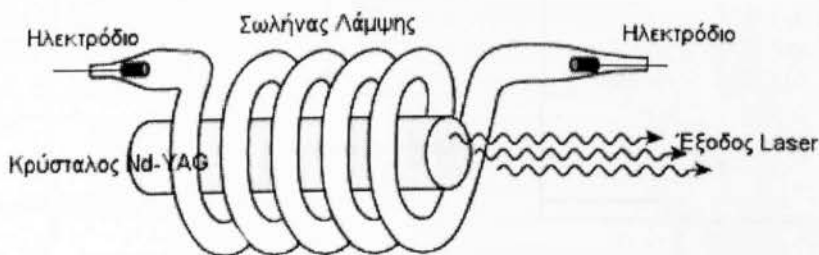
Τα Laser Nd:YAG χρησιμοποιούνται ευρέως σε επεξεργασία υλικών, τηλεμετρία, χειρουργική και σε άλλες ποικίλες εφαρμογές. Για να κατασκευαστεί το συγκεκριμένο laser χρησιμοποιούνται διάφοροι γεωμετρική ανακλαστήρες. Μια από τις πιο απλές είναι η χρήση ενός ελλειπτικού ανακλαστήρα που περιβάλλει την αντλούσα λυχνία και την ράβδο Nd:YAG κατά τέτοιο τρόπο ώστε η λυχνία και ο κρύσταλλος laser να βρίσκονται στις δύο εστίες της έλλειψης αντίστοιχα (εικόνα 17). Η συνηθέστερη λυχνία που χρησιμοποιείται είναι μια λυχνία κρυπτού.



Εικόνα 17. Σχηματική παράσταση ενός τυπικού Nd:YAG laser

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της διάταξης αυτής είναι το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιεί. Η ράβδος laser ψύχεται με απιονισμένο νερό εξαλείφοντας κατά αυτόν τον τρόπο κάθε πιθανότητα καταστροφής της ράβδου λόγω υπερθέρμανσης. Τα άκρα της ράβδου είναι καλυμμένα με ανακλαστικές επιστρώσεις που περιορίζουν τις απώλειες. Τα κάτοπτρα των πολλαπλών επιστρώσεων που χρησιμοποιούνται είναι το ένας πλήρως ανακλαστικό και το άλλο έχει μια αισθητά χαμηλότερη ανακλαστικότητα.

Το laser Nd:YAG έχουν κατασκευαστεί για να παράγουν συνεχή ακτινοβολία στα 1064nm ενώ μπορούν να επιτύχουν ακόμα πιο υψηλές ισχύς με παλμικό τρόπο.



Σχήμα 16. Το Nd:YAG μαζί με τον μηχανισμό προσφοράς ενέργειας.

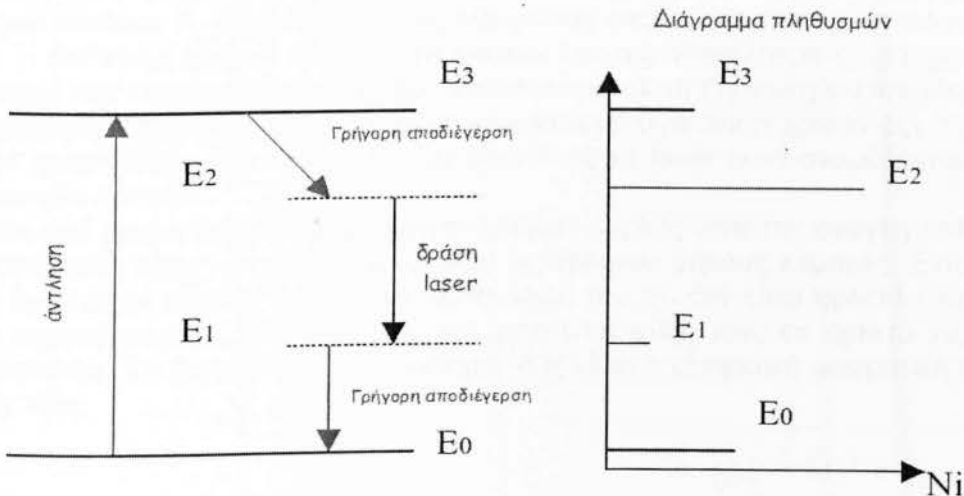
Σημαντικό για την κατασκευή και την λειτουργία ενός laser Nd:YAG είναι η επιλογή της κατάλληλης συγκέντρωσης υλικού πρόσμιξης. Γενικά οι βέλτιστες ράβδοι laser για τέτοια συστήματα πρέπει να έχουν συγκεντρώσεις Nd της τάξης 0,5 έως 0,8 %. Η

τελική επιλογή βασίζετε σε πολλούς παράγοντες του συστήματος όπως ο λαμπτήρας, η πόλωση και η απόκλιση των ακτινών.

Το Laser Nd:γυαλί έχει μεγαλύτερες διαστάσεις από το Laser Nd:YAG. Το γυαλί εξ' αιτίας του πολύ χαμηλότερου σημείου τήξης μπορεί να αναπτυχθεί πολύ πιο εύκολα από το YAG. Το μειονέκτημα που παρουσιάζει το γυαλί είναι ότι η θερμική αγωγιμότητα του είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μικρότερη από του YAG έτσι πρέπει να λειτουργούν σε παλμικό καθεστώς. Με βάση την απαραίτητη προϋπόθεση λειτουργίας του laser γυαλιού (παλμική λειτουργία) μπορούμε να αντικαταστήσουμε το laser Nd:YAG σε διάφορες εφαρμογές του. Η πιο σημαντική εφαρμογή του laser γυαλιού είναι σαν ενισχυτής laser στα συστήματα υψηλής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα πειράματα σύντηξης. Πληροφορικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι ένα laser γυαλιού έχει κατασκευαστεί να αποδίδει παλμούς ισχύς κορύφωσης μεγαλύτερη από 20 TW και ολική ενέργεια περίπου 15 KJ.

- **Laser αλεξανδρίτη**

Το laser αλεξανδρίτη (Alexandrite,  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ). Το ενεργό στοιχείο στο laser αυτό είναι το χρώμιο με την μορφή τρισθενών ιόντων ( $\text{Cr}^{3+}$ ) ως πρόσμιξη σε περιεκτικότητες από 0,01 έως 0,4% κατά βάρος σε κρυστάλλους  $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ . Το laser λειτούργησε για πρώτη φορά το 1973 ως σύστημα τριών επιπέδων με μήκος εκπομπής τα 680 nm. Λίγα χρόνια αργότερα ανακαλύφθηκε ότι σε λίγο μεγαλύτερα μήκη κύματος 720-800nm το laser δούλευε εξίσου καλά ως σύστημα τεσσάρων επιπέδων και μάλιστα μεταβλητού μήκους κύματος. Έτσι έχουμε ένα laser στερεάς κατάστασης μεταβλητού μήκους κύματος. Τα laser αλεξανδρίτη μπορούν να λειτουργούν είτε κατά τρόπο συνεχής επιτυγχάνοντας μέση ισχύ περίπου 20Watt ή παλμικά με ενέργεια αρκετών joule ανά παλμό.



Σχήμα 17. Ενεργειακό διάγραμμα και διάγραμμα πληθυσμών συστήματος τεσσάρων επιπέδων.

- **To laser Ti :Sapphire**

Στο laser αυτό τρισθενή ιόντα τιτανίου ( $\text{Ti}^{3+}$ ) αντικαθιστούν μερικά άτομα Al μέσα

στο πλέγμα του κρυστάλλου  $\text{Al}_2\text{O}_3$  σε περιεκτικότητα 0,1%κατα βάρος, δημιουργώντας το ενεργό υλικό  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ . Η δράση αυτή στο ενεργό υλικό δείχθηκε για πρώτη φορά το 1892. Τα laser αυτής της κατηγορίας λειτουργούν παλμικά ή κατά συνεχή τρόπο. Τα  $\text{Ti:Sapphire laser}$  είναι μεταβλητού μήκους κύματος (όπως και το laser του αλεξανδρίτη) και παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατότητα μεταβολής μήκους κύματος από όλα τα μέχρι σήμερα γνωστά laser, 660-1180nm.

- **To laser Cr:LiSAF και Cr:LiCaF**

Τα ενεργά υλικά των laser αυτών είναι οι κρύσταλλοι Cr:LiSrAlF (ή LiSAF) και Cr:LiCaF (ή LiCaF σε συντομία) αντίστοιχα. Οι κρύσταλλοι αυτοί παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τον κρύσταλλο του  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ . Έτσι πρώτων έχουμε μεγαλύτερους χρόνους ζωής του άνω επιπέδου της μετάβασης laser καθιστώντας δυνατή την άντληση του με παλμικές λυχνίες εκκενώσεις, δεύτερων ο LiSAF έχει φασματική περιοχή απορρόφησης (άντλησης) από 300 ως 720nm και είναι δυνατόν να αντληθεί ακόμα και με μικρού κύματος διοδικά laser. Τα μειονεκτήματα είναι αρκετά έτσι η χρήση τους έχει ουσιαστικά καταργηθεί.

Η εκπομπή του είναι στην περιοχή των 800 ως 1050 nm με στενότερο φασματικό εύρος από τον κρύσταλλο  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ . Επιπλέον οι κρύσταλλοι LiSAF είναι δυνατό να κατασκευάζονται σε μεγαλύτερα μεγέθη, επιτρέποντας έτσι επίτευξη μεγαλύτερων ισχύων εξόδου από το σύστημα laser. Ο κρύσταλλος LiCaF λειτουργεί σε σχετικά μικρότερα μήκη κύματος και εκπέμπει στην περιοχή των 700 με 900nm.

- **Τα laser χρωματικών κέντρων (color center laser)**

Η έκθεση κρυστάλλων αλκαλικών αλογονιδίων σε ισχυρή ακτινοβολία, όπως για παράδειγμα ακτίνων X, δημιουργεί εστίες ανωμαλίας στο σώμα του κρυστάλλου (defects). Η ανάπτυξη τέτοιων τοπικών ανωμαλιών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή, τη διαταραχή των ενεργειακών ζωνών του κρυστάλλου και τη δημιουργία επιπρόσθετης απορρόφησης, η οποία εκφράζεται με το χρωματισμό (εμφάνιση χρώματος) στο σώμα του κρυστάλλου. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος τα laser αυτά ονομάζονται laser χρωματικών κέντρων.

Τα laser χρωματικών κέντρων αναπτύχθηκαν κυρίως από την ανάγκη κάλυψης με ακτινοβολία laser και μπορούν να είναι μεταβλητού μήκους κύματος. Εντούτοις όμως δεν έτυχαν ευρείας χρήσης και αυτό λόγω του ότι δεν είναι αρκετά σταθερά, έχουν σχετικά μικρούς χρόνους ζωής και απαιτείται ψύξη τους σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι η εξαιρετική φασματική καθαρότητα τους.

- **Τα laser σπάνιων γαιών**

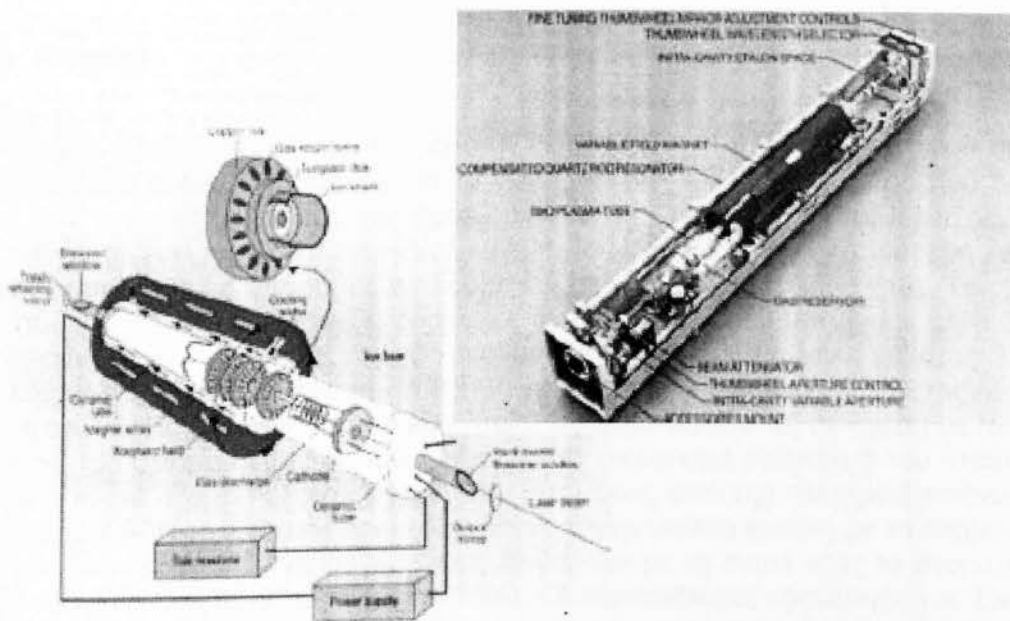
Τα laser των σπάνιων γαιών χόλμιο (Ho Holmium) έρβιο (Er, Erbium) και θούλιο (Th, Thulium), αν και ανακαλύφθηκαν και μελετήθηκαν την ίδια χρονική περίοδο στις αρχές του 1960 με τα laser νεοδυμίου εντούτοις παρέμειναν για αρκετά χρόνια στην αφάνεια. Αυτό ίσως συμβαίνει γιατί εμφανίζουν μικρότερες αποδόσεις απ' ότι τα laser

νεοδυμίου ή γιατί δεν είχαν ευρεθεί ακόμα εφαρμογές γι' αυτά. Στις μέρες μας πάντως χρησιμοποιούνται αρκετά στους τομείς της ιατρικής και της τηλεμετρίας.

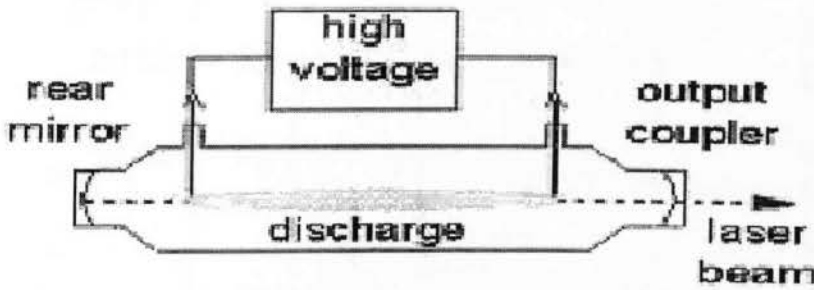
### 2.3.1.2.2 Laser αερίων

Τα περισσότερα από τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα είναι δυνατόν να παράγουν ακτινοβολία laser όταν βρεθούν στην αέρια κατάσταση και κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Επίσης πάρα πολλά μόρια, ιδιαίτερα αυτά με μικρό αριθμό ατόμων έχουν χρησιμοποιηθεί ως ενεργά υλικά και έχει δειχθεί η ύπαρξη δράσης laser σε αυτά. Η πίεση του αέρα είναι συνήθως μερικά mbar. Αυτό υπαγορεύεται από το γεγονός ότι στα laser αερίου συχνά χρησιμοποιούμε την ηλεκτρική εκκένωση για την άντληση. Μεγάλες πιέσεις θα είχαν σαν αποτέλεσμα τη δυσκολία εκκίνησης της εκκένωσης και επιπλέον τη δημιουργία φασματικής διαπλάτυνσης των μεταβάσεων, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο.

Τα laser αερίων εμφανίζουν πολλά πλεονεκτήματα. Το ενεργό τους υλικό είναι ιδιαίτερα ομογενές, είναι συστήματα σχετικής καλής απόδοσης και παράγουν δέσμες laser καλής οπτικής ποιότητας. Παρουσιάζουν όμως και σοβαρά μειονεκτήματα. Συνήθως έχουν μεγάλο όγκο και απαιτούν ογκώδη τροφοδοτικά με χρήση υψηλών ρευμάτων και τάσεων που τα καθιστά ασύμβατα με τις περισσότερες εφαρμογές και χρήσεις, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη ότι οι σύγχρονες τάσεις είναι για laser μικρού μεγέθους και ηλεκτρικές τροφοδοσίες συμβατές με τα ηλεκτρονικά στερεά κατάσταση.



Εικόνα 18. Συνοπτικά τα μέρη που αποτελούν τα laser αερίων.



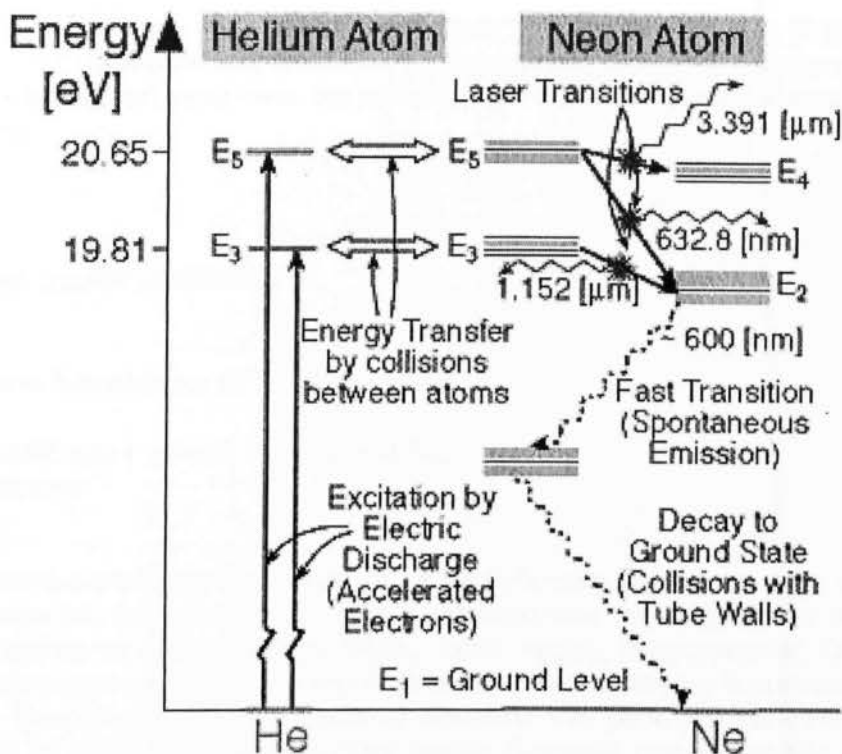
**Σχήμα 18.** Σχηματική περιγραφή του μηχανισμού άντλησης, καθώς και της διάταξης του laser.

Το αέριο περιέχεται σε σωλήνες κατάλληλης διαμέτρου ο οποίος τερματίζεται με δύο παράθυρα κεκλιμένα κατά γωνία Biewster. Τα αέρια laser χωρίζονται σε 4 υπό-ομάδες:

- I. Ατομικά (He-Ne, He-Cd)
- II. Μεταλλικών ατμών (Cu, Au)
- III. Μοριακά (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Χημικά, Μακρινού υπέρυθρου, Excimer )
- IV. Ιοντικά (Ar<sup>+</sup> , Kr<sup>+</sup> )

### **I. Ατομικά**

Το επόμενο χρονικά βήμα στην εξέλιξη των laser ήταν η κατασκευή ενός laser αερίων ουδετέρων ατόμων, συγκεκριμένα το laser He-Ne( ηλίου-νέου) μπορεί να θεωρηθεί σαν τυπικό παράδειγμα της κατηγορίας αυτής. Ήταν το πρώτο laser αερίου που τέθηκε σε εφαρμογή. Το ενεργό υλικό είναι το Νέον (Ne) που έχει τέσσερα ενεργειακά επίπεδα όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω σχήμα (18). Τα δύο μετασταθερά ενεργειακά επίπεδα δρουν ως άνω επίπεδα, ενώ υπάρχουν άλλα δυο που δρουν ως κάτω επίπεδα. Δηλαδή έχουμε τρία εκπεμπόμενα μήκη κύματος: λ54, λ52, λ32. Η παρουσία του αερίου He βοηθά για δύο κύριους λόγους, ο πρώτος λόγος είναι η απευθείας διέγερση του Ne είναι πολύ λιγότερο αποδοτική σε σχέση με το He (περίπου 1:200) και ο δεύτερος λόγος είναι ότι το ενεργειακό επίπεδο 5 του ηλίου είναι πολύ κοντά στο αντίστοιχο 5 του νέου. Επομένως από την ηλεκτρική εκκένωση (περίπου 2000 V) τα αποσπώμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται κυρίως με τα άτομα He τα οποία διεγείρονται και με συγκρούσεις διεγείρουν με τη σειρά τους τα άτομα του Ne (αναλογία: He ~ 85-90%, Ne ~ 10-15%). Οι περισσότερες εφαρμογές του Laser He-Ne βασίζονται στο ορατό κόκκινο λ52 που έχει και τη μεγαλύτερη ένταση. Το μήκος κύματος που εκπέμπει είναι 632,8nm που αντιστοιχεί σε μια ενεργειακή μετάπτωση μεταξύ των δύο απάνω κβαντικών επιπέδων Ne.



Σχήμα 19. Περιγραφή ενεργειακών επιπέδων του laser He-Ne

Η ενεργεία μεταφέρεται στην επάνω ενεργειακή στάθμη του Ne μέσω κρούσεων με τα μετασταθή άτομα He και έτσι δημιουργείται η απαιτούμενη αντιστροφή πληθυσμού στο Ne παράγοντας ακτινοβολία laser. Το κόκκινο laser He-Ne είναι από τα πιο διαδεδομένα και πολυχρησιμοποιημένα. Όσον αφορά την λειτουργία του έχει άριστες τιμές για έναν αριθμό παραμέτρων, εξαιτίας των πολύπλοκων διεργασιών που συνεισφέρουν στη διέγερση και αυτοδιέγερση των επιπέδων του. Αυτά τα laser τα οποία ταλαντώνονται στην κόκκινη μετάπτωση, χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές όπου χρειάζεται μικρή ισχύς ορατής δέσμης για παράδειγμα ευθυγραμμίσεις ανάγνωση χαρακτήρων, μετρολογία, ολογραφία, μνήμες κασετών βίντεο. Η ισχύς εξόδου είναι μικρή (0,5 έως 100 mW). Η εκπομπή του laser σε μήκος κύματος 543,5nm είναι πράσινη το οποίο έχει μέχρι πέντε φορές την διαφάνεια των κόκκινων laser με την ίδια ισχύς παραγωγής. Η εκπομπή στην κόκκινη περιοχή είναι στα 632,8nm. Η κίτρινη παραγωγή είναι στα 594,1nm αντιστοιχεί στις γραμμές νατρίου και σε διάφορες χρωστικές ουσίες φθορισμού. Το πορτοκαλί χρώμα laser είναι στα 611,9nm είναι περίπου 35% πιο ορατό από την κόκκινη παραγωγή στα ίδια επίπεδα ισχύος.

Εκτός από τα laser He-Ne υπάρχουν και άλλα laser ουδέτερων ατόμων που καλύπτουν τα περισσότερα από τα ευγενή αέρια (Kr κρυπτό Ar αργό Xe ξένο). Συνήθως λειτουργούν στο κόκκινο ή στο κοντινό υπέρυθρο (1-10  $\mu\text{m}$ ) μήκος κύματος. Τα laser ουδέτερων ατόμων δεν αντιπροσωπεύονται αποκλειστικά από τα ευγενή αέρια. Ειδικότερα αναφέρουμε την κλάση των laser μεταλλικών ατόμων (Pb μόλυβδος Cu χαλκός Au χρυσός Ca ασβέστιο Sr στρόντιο, Mn μαγγάνιο). Από αυτά το πιο σπουδαίο είναι το laser Cu το οποίο ταλαντώνεται στο πράσινο περιοχή του φάσματος όπου η αποδοτικότητα του είναι αρκετά υψηλή και στο κίτρινο. Λειτουργούν σε παλμικό καθεστώς, με μέση ισχύ περίπου 40W και η επαναληπτικότητα είναι περίπου

στα 15KHz δίνουν πρακτικά την πιο αποδοτική πράσινη πηγή laser. Η χρήση τους είναι κυρίως σε υποθαλάσσιες επικοινωνίες και ανίχνευση υποβρύχιων αντικειμένων, μιας και το θαλασσίνο νερό είναι σχετικά διαπερατό και για μερικές εφαρμογές στην φωτοχημεία.

## II. laser ατμών μετάλλων

Τα laser αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες.

- I. Σα ουδέτερα ( χαλκού Cu, χρυσού Au)
- II. Ιονισμένα

Στα laser αυτά ο σωλήνας είναι γεμάτος με ένα αδρανές αέριο π.χ. νέον και μια μικρή ποσότητα του καθαρού μετάλλου π.χ. χαλκού που για να βρεθεί σε κατάσταση ατμών θα πρέπει να επικρατούν συνθήκες, πολύ υψηλής θερμοκρασίας. Ο σωλήνας είναι κατασκευασμένος από υλικό ιδιαίτερα ανθεκτικό σε αυτές τις θερμοκρασίες (π.χ. αλουμίνια). Ένα κομμάτι καθαρού χαλκού εισάγεται στο μέσο του σωλήνα ο οποίος μετά γεμίζει με αέριο νέον. Εφαρμόζεται υψηλό δυναμικό στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα και η θερμοκρασία αυξάνει πολύ, ξεπερνώντας τους 1083°C, σημείο τήξης του χαλκού, που αρχίζει να εξατμίζεται. Έξω από τον σωλήνα μετράται θερμοκρασία της τάξης του 1400-1500°C. Καθ' όλη τη διαδικασία, μικρό ποσοστό των ατόμων Cu ιοντίζεται και κινείται προς το αντίθετο ηλεκτρόδιο. Το σύνολο του ατμού ψύχεται και μετατρέπεται σε στερεό μέταλλο. Μετά από εκατοντάδες ώρες λειτουργίας το Laser πρέπει να ανανεωθεί με άλλο κομμάτι χαλκού. Στα ηλεκτρόδια εφαρμόζονται παλμοί υψηλού δυναμικού και τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του αερίου Cu (το ενεργό υλικό) που διεγείρονται στα (2) επιθυμητά ενεργειακά επίπεδα. Εκπέμπονται 2 ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ένα πράσινο ( $\lambda=511\text{nm}$ ) και ένα κίτρινο ( $\lambda=578\text{nm}$ ). Το Laser ατμών χαλκού λειτουργεί μόνον κατά παλμούς, επειδή τα δυο χαμηλά ενεργειακά επίπεδα (μετά την εκπομπή) είναι μετασταθερά, δηλαδή έχουν μακρύ χρόνο ημιζωής και λήγει πολύ σύντομα η συνθήκη της αντιστροφής πληθυσμών. Κάθε παλμός laser διαρκεί περί τα 100ns.

Τα Laser ατμών χαλκού βρίσκουν εφαρμογή:

- ως πηγή ενέργειας για Laser χρωστικής
- για φωτισμό αντικειμένων στη φωτογράφιση μεγάλης ταχύτητας (πχ μιας σφαίρας όπλου )
- στην ιατροδικαστική για ταυτοποίηση δακτυλικών αποτυπωμάτων και ανίχνευση ειδικών χημικών στοιχείων στον τόπο εγκλήματος: φωτίζεται ένα δείγμα και εξετάζεται ο φθορισμός του. Βοηθά ο ισχυρός παλμός Laser
- στη φωτοδυναμική θεραπεία ειδικό φάρμακο χορηγείται στον καρκινοπαθή και το φως Laser καταστρέφει επιλεκτικά καρκινικά κύτταρα (όσα έχουν απορροφήσει το φάρμακο)

- στο εμπλουτισμό ουρανίου ( $^{235}\text{U}$ ): το φυσικό ουράνιο περιέχει πολύ μικρή ποσότητα  $^{235}\text{U}$ . Με το Laser χαλκού είναι δυνατός ο επιλεκτικός ιοντισμός μόνο του  $^{235}\text{U}$  και η συλλογή του σε ηλεκτρικά φορτισμένες πλάκες.

Το laser ατμών χρυσού έχει πολλά στοιχεία και ιδιότητες κοινά με το laser χαλκού και η εκπομπή του είναι στο κόκκινο με μήκος κύματος ίσο με 628nm

Άλλα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στα laser είναι (Sn κασσίτερος, Pb μόλυβδος, Zn ψευδάργυρος, Cd κάδμιο). Από αυτά τα πιο διαδεδομένα είναι εκείνα που χρησιμοποιούν ατμούς Cd. Αντίθετα προς τα laser αερίων ιόντων στα laser μεταλλικών ατμών υπάρχουν δύο εντελώς διαφορετικές δραστηριότητες άντλησης.

Η πρώτη είναι ο ιοντισμός Penning και ο δεύτερος είναι ο ιοντισμός Φορτίου. Άρα απαιτείται μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος και ηλεκτρική ισχύς ανά μονάδα μήκους. Όσον αφορά την χρήση τους τα laser He-Cd είναι ελκυστικά για πολλές εφαρμογές όπου απαιτείται μια μπλε ή UV δέσμη μέτριας ισχύος όπως για παράδειγμα στα τηλεομοιοτυπικά συστήματα και σε πειράματα Raman και φθορισμού.

### III. Laser αέριων μορίων

Κατά την μέχρι τώρα ανάλυση των ειδών Laser η δημιουργία της δέσμης laser βασίζονταν στη μεταπήδηση ηλεκτρονίων μεταξύ διαφορετικών κύριων ενεργειακών επιπέδων.

Στα μόρια όμως, τα κύρια ενεργειακά επίπεδα υποδιαιρούνται και σε ενεργειακά επίπεδα ταλάντωσης-δόνησης, το καθένα των οποίων υποδιαιρείται και σε ενεργειακά επίπεδα περιστροφής. Τα επίπεδα ταλάντωσης-δόνησης σχετίζονται με την ταλάντωση των ατόμων γύρω από μια θέση ισορροπίας μέσα στο μόριο. Τα επίπεδα περιστροφής σχετίζονται με την περιστροφή του μορίου στο χώρο. Εφόσον πρόκειται για υποδιαιρέσεις, οι ενεργειακές διαφορές μεταξύ τους είναι πολύ μικρότερες και το laser που δημιουργούν έχει μεγάλο μήκος κύματος, συνήθως στην περιοχή του υπέρυθρου.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι τα laser αυτά ανάλογα με τον τύπο της μετάπτωσης που χρησιμοποιούν μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες.

1. Δονητικά – περιστροφικά. Ταλαντώνονται στο μέσο και στο μακρύ υπέρυθρο μήκος κύματος.
2. Δονητρονικά (δονητικά – ηλεκτρονιακά). Το μήκος κύματος της ταλάντωσης πέφτει στην ορατή UV ακτινοβολία
3. Καθαρά περιστροφικά laser. Το μήκος κύματος πέφτει στο μακρό υπέρυθρο.

Τα πιο ισχυρά και αποδοτικά laser μοριακών αερίων είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το άζωτο ( $\text{N}_2$ ) τα οποία θα αναφέρουμε διεξοδικά παρακάτω.

- **Laser  $\text{CO}_2$  (διοξειδίου του άνθρακα)**

Το laser διοξειδίου του άνθρακα έχει μήκος κύματος ίσο με 10,6μm βρίσκεται δηλαδή

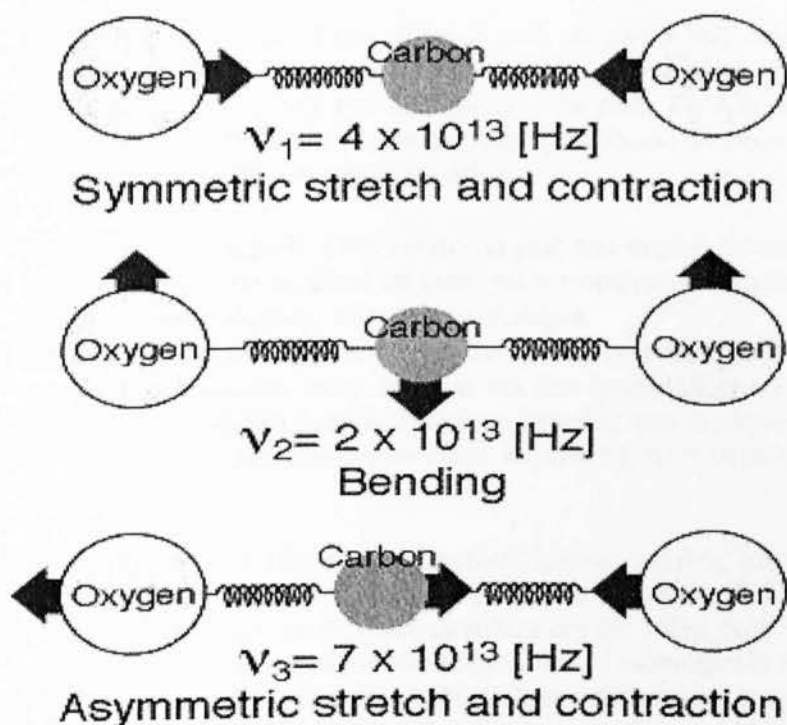


στην μακρινή περιοχή του υπέρυθρου. Το laser CO<sub>2</sub> μπορεί να αποδώσει μια δέσμη ισχύος μερικών Watt έως 25 KWatt και ακόμα μεγαλύτερη. Η δέσμη εστιάζεται στην επιφάνεια με μικρή εστιακή απόσταση και διάμετρο περίπου στα 100μm και η μέγιστη ένταση της δέσμης στην επιφάνεια μπορεί να πλησιάσει ακόμα και τα 100 MW/cm<sup>2</sup>. Αποτελεί το πιο διαδεδομένο laser στην βιομηχανία. Επιπλέον αποδίδει περισσότερη ενέργεια από άλλα είδη laser (περίπου 15%), γεγονός που του προσδίδει ακόμα ένα οικονομικό πλεονέκτημα.

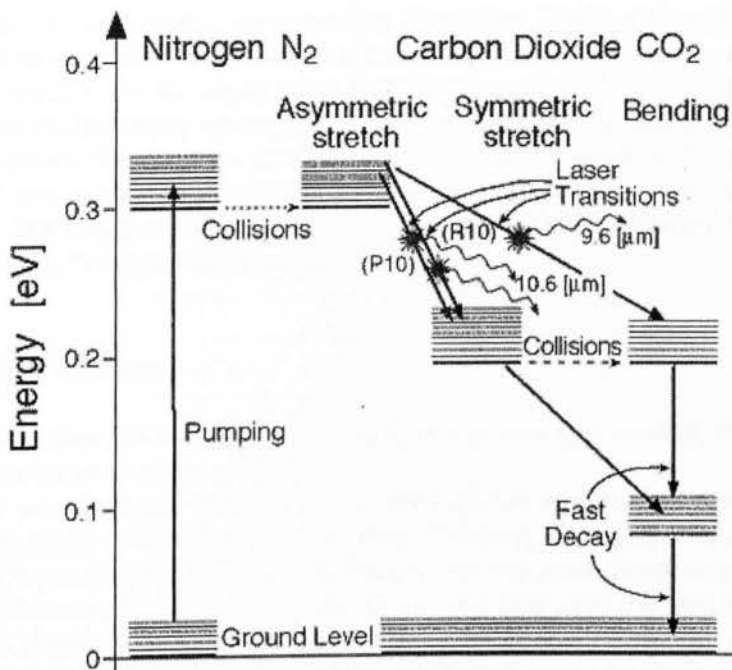
Το ενεργό μέσο και δω είναι ένα μίγμα CO<sub>2</sub> N<sub>2</sub> He τα δύο τελευταία μόρια αυξάνουν την αποδοτικότητα της συσκευής: ( N<sub>2</sub> (άζωτο) και He,) η αναλογία των οποίων εξαρτάται από τον μηχανισμό διέγερσης και το είδος της λειτουργίας (π.χ. συνεχής). Το μόριο του CO<sub>2</sub> παρουσιάζει τρεις δυνατούς τρόπους ταλάντωσης-δόνησης:

- Τον συμμετρικό(κατά μήκος του άξονα του επιμήκους μορίου) με συχνότητα  $f_1$
- Τον με κάμψη(σε διεύθυνση κάθετη ως προς τον άξονα) με συχνότητα  $f_2$
- Τον ασύμμετρο(όπως ο πρώτος τρόπος αλλά με διαφορετική κατεύθυνση) με συχνότητα  $f_3$

Η αποδιέγερση που δημιουργεί την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του Laser, ξεκινά από υψηλό ενεργειακό επίπεδο του τρίτου τρόπου και καταλήγει σε έναν από τους άλλους δύο. Επειδή κάθε ενεργειακό επίπεδο ταλάντωσης-δόνησης υποδιαιρείται σε επίπεδα περιστροφής, οι μεταπηδήσεις είναι κάθε φορά πολλαπλές. Η ηλεκτρική εκκένωση στο σωλήνα του laser CO<sub>2</sub> επιταχύνει ηλεκτρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια μεταφέρεται σε συγκρούσεις στα μόρια του N<sub>2</sub> και του CO<sub>2</sub>. Τα μόρια του N<sub>2</sub> βοηθούν τη διαδικασία διέγερσης των CO<sub>2</sub>. Τα μόρια/άτομα He βοηθούν κυρίως στην απομάκρυνση των «ενοχλητικών» ποσών θερμότητας(έχουν ειδική θερμότητα 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του N<sub>2</sub>).



Εικόνα 19. Περιγραφή των τριών τρόπων ταλάντωσης-δόνησης του laser CO<sub>2</sub>



Σχήμα 20. Περιγραφή της διέγερσης και αποδιέγερσης ενός τυπικού laser CO<sub>2</sub>

Τυπική αναλογία αέριων όγκων: 10% CO<sub>2</sub>, 10 % N<sub>2</sub> και 80% He.

Υπάρχουν τρεις τύποι Laser CO<sub>2</sub>:

- Αξονική ροή αερίου. Στην αξονική ροή το μίγμα του αερίου αντλείται από τη μια άκρη του σωλήνα και οδηγείται στην άλλη. Το αέριο CO<sub>2</sub> αντλείται συνεχώς για την διατηρήσει την ροή. Το ήλιο και το άζωτο προστίθενται στο μίγμα για να αυξηθεί η απόδοση. Η παραγωγή ισχύος είναι 40 με 80watt ανά μήκος σωλήνα.
- Εγκάρσια ροή αερίου. Στην εγκάρσια ροή του αερίου τα laser διοξειδίου του άνθρακα είναι σε θέση να επιτύχουν παραγωγή υψηλότερης ισχύος λόγω της αυξανόμενης πίεσης στο σωλήνα.
- Σφραγισμένου σωλήνα. Στις σφραγισμένες συσκευές σωλήνων το αέριο διατηρείται μέσα στον σωλήνα και δεν ξαναγεμίζεται κατά της χρήσης. Η μόνη βασική διαφορά είναι το μέγεθος του σωλήνα. Η παραγωγή ισχύος των σφραγισμένων laser κυμαίνεται από μερικά watt ως και 100 watt.

Η ροή του αερίου και η διεύθυνση της εφαρμοζόμενης υψηλής τάσης μπορεί να είναι κάθετες στον άξονα του σωλήνα, οπότε η ψύξη του μίγματος είναι αποτελεσματικότερη και η εξερχόμενη ισχύς laser πολύ μεγαλύτερη(της τάξης των 10 kWatt), ακόμη και με μεγάλες πιέσεις των αερίων στο εσωτερικό. Η ακτινοβολία από το Laser CO<sub>2</sub> συνήθως είναι συνεχής. Ενώ θεωρούμε ότι τα laser είναι αποτέλεσμα τεχνολογίας, επιστήμονες ανακάλυψαν CO<sub>2</sub> Laser που υπάρχει στη φύση. Μπορεί να δημιουργηθεί αντιστροφή πληθυσμών κάτω από πολύ ειδικές συνθήκες, όπως στην καυ-

τή ατμόσφαιρα (ενεργό υλικό) του πλανήτη Αφροδίτη. Το φως του ήλιου διεγείρει μόρια της ατμόσφαιρας που αποδιεγειρόμενα μπορεί να καταλήγουν σε μετασταθερά ενεργειακά επίπεδα. Αν τα μόρια αυτά διαθέτουν και κατάλληλο «χαμηλό» επίπεδο, το ποσό της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας θα είναι τεράστιο. Μόνο που η ακτινοβολία δεν θα έχει κατευθυντικότητα, αλλά θα διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις στο χώρο. Παρόμοιο στη λειτουργία και τις ιδιότητες είναι και το Laser CO, με μόνη (και σημαντική) διαφορά ότι το αέριό του είναι δηλητηριώδες και επικίνδυνο, ενώ το CO<sub>2</sub> δεν έχει καμία τοξικότητα.

### • Laser N<sub>2</sub> ( Αζώτου )

Και σε αυτό το Laser, το ενεργό υλικό άζωτο μπορεί να έχει συνεχή παροχή ή μπορεί ο σωλήνας του να είναι σφραγισμένος.

Διεγείρεται με ηλεκτρικό παλμό και η ακτινοβολία προκύπτει από μεταπηδήσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης. Βραχείς παλμοί υψηλής τάσης(30-40KV)προκαλούν ηλεκτρική εκκένωση και στιγμιαία αντιστροφή πληθυσμών.

Το Laser αζώτου είναι laser παλμών. Ο χρόνος ημιζωής του ανώτερου «laser» επιπέδου είναι μικρότερος από τον χρόνο του κατώτερου επιπέδου. Η ενίσχυση της ακτινοβολίας μέσα στο σωλήνα είναι τόσο αποδοτική που με μήκος σωλήνα ενός μέτρου δεν θα χρειαζόταν να τον επαναδιασχίσει, αυτό σημαίνει ότι οι καθρέφτες δεν είναι απαραίτητοι. Στην πράξη υπάρχει μόνο ο «πίσω» καθρέφτης με την 100% ανακλαστικότητα.

Το Laser N<sub>2</sub> εκπέμπει στην υπεριώδη περιοχή, είναι απλό και φθηνό. Η ακτινοβολία του δίνει μερικά mJ ανά παλμό, με διάρκεια παλμού της τάξης των ns και πυκνότητα περίπου 1000 Hz.

Μερικές από τις εφαρμογές του Laser N<sub>2</sub> είναι :

- Προσφορά ενέργειας για τη διέγερση Laser χρωστικής
- Φασματοσκοπία υπεριώδους
- Αντοχή υλικών στη θερμότητα
- Μέτρηση φθορισμού υλικών
- Μέτρηση πολύ ταχέων διαδικασιών (φωτογράφιση με βραχείς παλμούς)

### • Laser (διεγερμένων) διμερών (excimer)

Υπάρχει μια οικογένεια Laser πολύ ενδιαφέρουσα και σπουδαία των οποίων η ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα μόριο με πολύ σύντομη ζωή. Αποτελείται από ένα άτομο ευγενούς αερίου (Ar, Kr, Xe) και ένα άτομο αλογόνου (F, Cl, Br, I) τα οποία συνδέονται στην διεγερμένη κατάσταση σχηματίζοντας ένα διεγερμένο διμερές. Το μόριο αυτό υπάρχει μόνο σε διεγερμένη κατάσταση. Όταν αποδιεγερθεί, τα άτομα διαχωρίζονται. Η διεγερμένη κατάσταση διαρκεί περίπου 10ns και η ισχύς εξόδου μπορεί να είναι μέχρι 100W, επαναληπτικότητας μέχρι 1KHz και ηλεκτρικής αποδοτικότητας 1%. Το 85% της ροής φωτός laser μέσα στην κοιλότητα μπορεί να εξελιχθεί σαν χρήσιμη δέσμη, το υπόλοιπο ποσοστό απορροφάται από την κοιλότητα.

Excimer είναι ο συνδυασμός των λέξεων excited και dimmer, δηλαδή ένα μόριο, που αποτελείται από δύο άτομα,(διεγερμένο διμερές), διεγερμένη κατάσταση. Ο όρος αυτός πρωτοπαρουσιάστηκε και πρωτοχρησιμοποιήθηκε το 1960 για να περι-

γράφει ένα διμερές μόριο που βρίσκεται σε δέσμια φάση δηλαδή σε μια ηλεκτρονική διεγερμένη κατάσταση και το οποίο μεταπίπτοντας στη βασική ηλεκτρονική στοιβάδα διασπάται αμέσως. Στην πραγματικότητα ο όρος excimer αναφέρεται σε ένα διεγερμένο ομοιοπολικό μόριο ενώ για τα ετεροπολικά μόρια πολυμερή χρησιμοποιείται ο όρος exciplex.

Τα ευγενή αέρια είναι αδρανή και δεν συνδέονται χημικά με ίδια ή άλλα άτομα, τουλάχιστον στη θεμελιώδη κατάσταση. Αν όμως δεχθούν σημαντική ποσότητα ενέργειας και ανέβουν σε ένα διεγερμένο (ιοντισμένο) ενεργειακό επίπεδο, δημιουργούνται οι συνθήκες για συνδέσεις. Καθώς από το μόριο εκπέμπεται ακτινοβολία (laser σε αυτές τις περιπτώσεις), τα άτομα επανέρχονται στη βασική ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή τα άτομα γίνονται πάλι ανεξάρτητα. Επομένως σαν μόριο έχει ένα διεγερμένο ενεργειακό επίπεδο με κάποιο πληθυσμό και ένα θεμελιώδες επίπεδο χωρίς καθόλου πληθυσμό. Δηλαδή, αμέσως με τη διέγερση υπάρχει και αντιστροφή πληθυσμών.

Για τη λειτουργία του Laser excimer έχει βρεθεί πως ο σωλήνας πρέπει να περιέχει:

- πολύ λίγο αλογόνο (π.χ. από HCl, NF<sub>3</sub>)
- λίγο αδρανές αέριο (αργό, κρυπτό ή ξένο)
- σχεδόν 90% νέον ή ήλιον

Η διέγερση γίνεται με σύντομους παλμούς ηλεκτρικής ισχύος ως μερικά MW/cm<sup>3</sup>. Η απόδοση είναι σημαντική ακόμη και χωρίς καθρέφτες. Χρησιμοποιείται όμως ο 100% ανακλών πίσω καθρέφτης. Τα αέρια μέσα στο σωλήνα είναι τοξικά, άρα ο σωλήνας του laser σφραγίζεται καλά μετά την πλήρωσή του. Το excimer laser εκπέμπει στο υπεριώδες και μόνο με βραχύχρονους παλμούς. Η εξερχόμενη ισχύς φτάνει τα 100W. Είναι σχετικά ακριβό. Το excimer laser έχει συμπυκνωμένη ενέργεια και χρησιμοποιείται ως κοπτικό εργαλείο για σχεδόν όλα τα υλικά.

Το παραπάνω είδος laser έχει εφαρμογές σε διάφορα πεδία όπως :

- Άντληση επίλεκτων laser χρωστικών
- Μη γραμμικά φασματοσκόπια
- Υπεριώδη φασματοσκόπια
- Φωτοδιέγερση και φωτοχημεία
- Εμπλουτισμός και διαχωρισμός ισοτόπων
- Εφαρμογές στην ιατρική

Στην βιομηχανία επίσης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως :

- Επεξεργασία υλικών (συγκόλληση κοπή τρυπάνισμα καθαρισμός επιφανειών, σκλήρυνση)
- στην φωτολιθογραφία (πολύ μεγάλη ακρίβεια)
- Εγχάραξη

Εφαρμογή στην ηλεκτρονική

- Επεξεργασία ημιαγωγών και κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, νόθευση

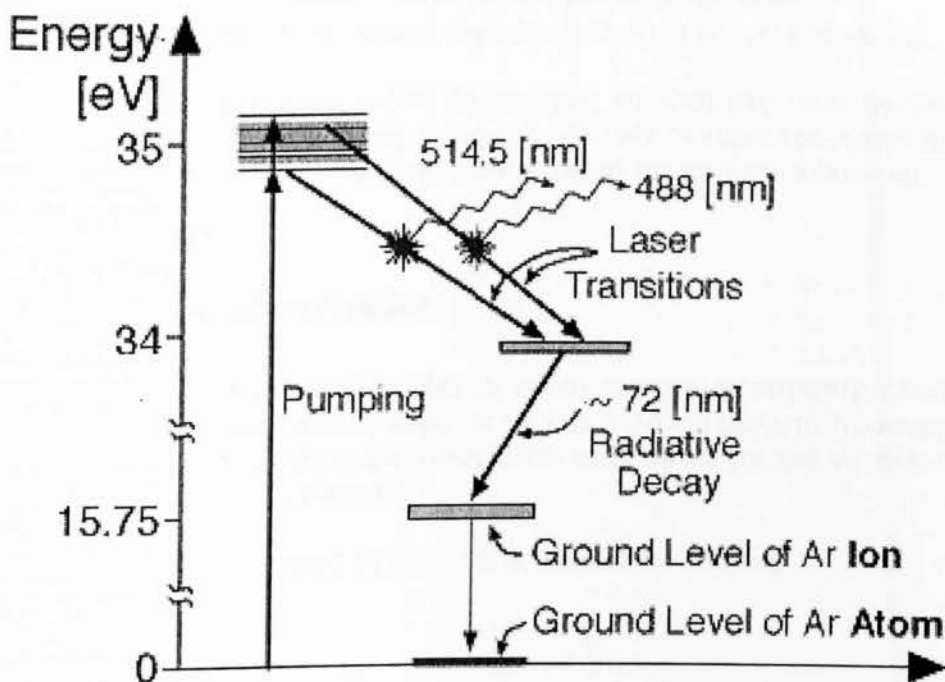
- (doping) ανόπτηση (annealing), ωμικές επαφές και τέλος υπεραγωγιμότητα.
- Επιφανειακή κατεργασία μετάλλων, κεραμικών πλαστικών
- Φωτοχημεία, φωτοκατάλυση παραγωγή  $H_2$  από διάσπαση  $H_2O$
- Ατμοσφαιρική μελέτη και παρακολούθηση.

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα Laser διεγερμένων διμερών είναι ιδανικές πηγές laser γιατί εξασφαλίζουν σχετικά υψηλή μέση ισχύ εξόδου, σταθερότητα της ενέργειας εξόδου με μια μόνο γέμιση του σωλήνα και με εκπομπή στις VUV και UV περιοχές. Παρουσιάζουν μικρή χωρική συμφωνία κάτι όμως που δεν είναι μειονέκτημα γιατί μπορεί να αποφευχθεί η δημιουργία κροσσών άρα η χρήση τους στην λιθογραφία για τύπωση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι ιδανική.

#### IV. Laser αέριων Ιόντων

Ένα ιοντικό laser είναι ένα laser αερίου που χρησιμοποιεί ιονισμένο αέριο ως ενεργό μέσο. Η δράση laser δηλαδή, οφείλεται σε ιόντα. Λόγω του μεγάλου ποσού ενέργειας που απαιτείται για να διεγείρει τις ιοντικές μεταβάσεις που χρησιμοποιούνται στα ιοντικά laser, το ρεύμα πρέπει να είναι μεγάλο.

Τα ιοντικά laser εκπέμπουν μεγάλης ισχύος δέσμη στο ορατό και υπεριώδες (UV) τμήμα του φάσματος. Αυτά τα laser αποτελούνται από ένα σωλήνα πλάσματος και καθρέφτες.



Σχήμα 21. Περιγραφή των ενεργειακών επιπέδων ενός laser αέριων ιόντων.

Τα πιο κοινά είναι τα ιόντα των ευγενών αερίων αργόν ( $Ar^+$ ) και κρυπτόν ( $Kr^+$ ). Ο σωλήνας π.χ. του πρώτου περιέχει αέριο αργό που μετατρέπεται σε πλάσμα. Πλά-

σμα ονομάζεται η κατάσταση της ύλης κατά την οποία τα ηλεκτρόνια είναι αποσπασμένα από τα άτομα ή τα μόρια και συμπεριφέρονται ως ελεύθερα. Το θεμελιώδες ενεργειακό επίπεδο του ιόντος Ar είναι ψηλότερο από το αντίστοιχο θεμελιώδες του ατόμου Ar. Η «χαμένη» αυτή ενέργεια που πρέπει να ξοδευτεί είναι η αιτία της μικρής απόδοσης του Laser Ar<sup>+</sup>.

Τα βασικά μήκη κύματος του Laser Ar<sup>+</sup> είναι ένα μπλε ( $\lambda=0,488 \mu\text{m}$ ) και ένα πράσινο ( $\lambda=0,515 \mu\text{m}$ ), υπάρχουν όμως και δυο υπεριώδη. Από τις ελκυστικές εφαρμογές του Laser Ar<sup>+</sup> είναι η δημιουργία οπτικών εφέ για τέχνη και διασκέδαση, επειδή ήταν το μόνο laser με πολλά χρώματα με αξιόλογη ισχύ (μερικά W). Η συσκευή Laser Ar<sup>+</sup> απαιτεί μεγάλη πυκνότητα ρεύματος ( $100\text{-}500 \text{ A/cm}^2$ ), (επομένως και στενό σωλήνα) και συνεχές δυναμικό μερικών εκατοντάδων Volt.

Παράγονται μεγάλα ποσά θερμότητας, που καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων ψύξης και ανθεκτικών υλικών κατασκευής (οξειδίο βυρηλλίου). Όποιος δουλεύει με laser αργού πρέπει να μην παραλείπει ειδικά μέτρα προστασίας (π.χ. ειδικά γυαλιά).

Τα Laser Ar<sup>+</sup> βρίσκουν εφαρμογή:

- ως πηγή ενέργειας για Laser χρωστικής
- στη διασκέδαση (π.χ. ντισκοτέκ)
- στη γενική χειρουργική (απορρόφηση ενέργειας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος)
- στην οφθαλμολογία (στην αποκόλληση του αμφιβληστροειδή)
- στην τοξικολογία – ιατροδικαστική (μετρήσεις με φθορισμό υλικών)
- στην ολογραφία (επειδή έχει αρκετή ισχύ στο ορατό μέρος του φάσματος)

Το Laser Kr<sup>+</sup> έχει παρόμοιο τρόπο δημιουργίας και ιδιότητες, αλλά ακόμη χαμηλότερη απόδοση και ισχύ εξόδου της τάξης των 100mW. Η κύρια εφαρμογή του είναι στη διασκέδαση (φανταστικά οπτικά εφέ στην περιοχή του κίτρινου-κόκκινου).

### 2.3.1.2.3 Υγρών χρωστικών

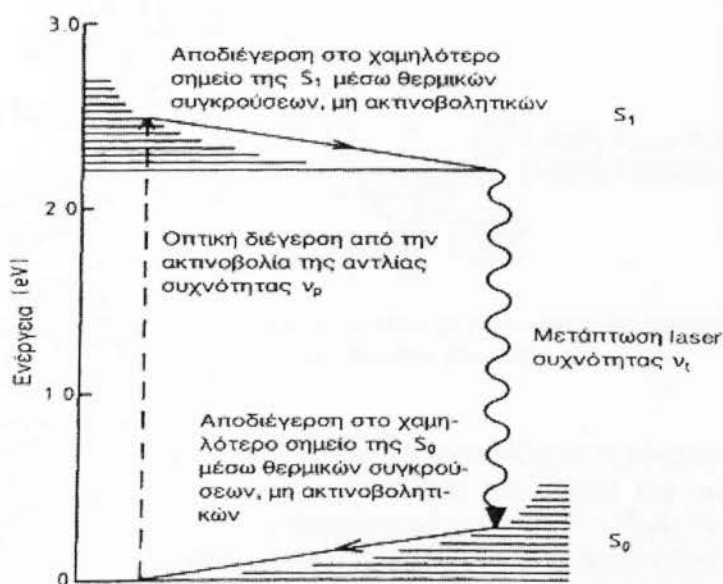
Το Laser χρωστικών μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική συσκευή μετατροπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ενός μήκους κύματος σε ένα άλλο και μάλιστα προσαρμόσιμο κατά το επιθυμητό. Η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία μπορεί να γίνει η προσαρμογή, εξαρτάται από τη χρωστική.

Οι χρωστικές ανήκουν συνήθως σε μια από τις παρακάτω κλάσεις .

1. πολυμεθινικές
2. ξανθικές
3. κουμαρινικές
4. χρωστικές σπινθηριστών

Μόρια χρωστικής (dye) συνήθως είναι οργανικά φθορίζοντα συμπλέγματα, που περιέχουν μεγάλο αριθμό κυκλικών δομών. Το ενεργό υλικό laser χρωστικής είναι

τέτοια μόρια χρωστικής διαλυμένα συνήθως σε αλκοόλη. Από την αλληλεπίδραση των μορίων χρωστικής με το διαλύτη διευρύνεται η ζώνη των ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης και σχηματίζεται ευρεία ζώνη εκπεμπόμενων (αλλά και αναρροφούμενων) συχνοτήτων. Λόγω της επιλεκτικότητας μήκους κύματος της κάλυψης ευρείας φασματικής περιοχής και της απλότητας του το laser οργανικών χρωστικών παίζουν αυξημένα σημαντικό ρόλο σε διάφορα πεδία εφαρμογών.



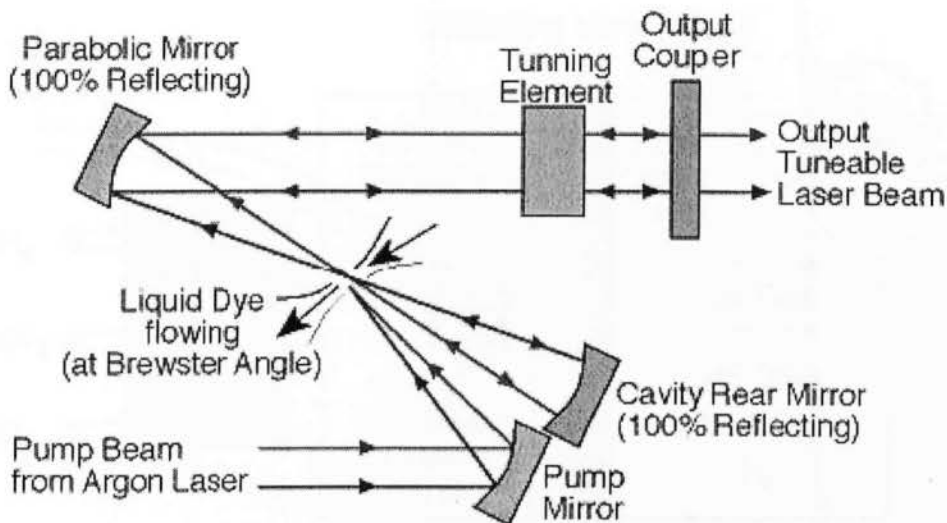
Σχήμα 22. Ενεργειακό διάγραμμα αντλούμενων επιπέδων και παραγωγή ακτινοβολίας

Το διάγραμμα των ενεργειακών επιπέδων στα laser χρωστικών είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο. Ο χρόνος ημιζωής του διεγερμένου επιπέδου είναι σύντομος, επειδή υπάρχουν πολλοί δρόμοι αποδιέγερσης και παράλληλα ο αριθμός συγκρούσεων μεταξύ των μορίων στην υγρή κατάσταση είναι μεγάλος. Με κάθε σύγκρουση διαρρέει ενέργεια από τη διεγερμένη κατάσταση.

Στο Laser χρωστικής η προσφορά ενέργειας γίνεται με οπτική άντληση, φωτισμός με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατάλληλου μήκους κύματος. Η προσφερόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη της εκπεμπόμενης επειδή υπάρχει απώλεια ενέργειας κατά τη διαδικασία της «μεταφοράς». Επομένως τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος είναι μεγαλύτερα των αντίστοιχων της απορρόφησης.

Είναι εφικτή σημαντική ισχύς της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην έξοδο επειδή υπάρχουν πολλά μόρια χρωστικής (ενεργό υλικό), σε σχέση με το μικρό ποσοστό των ιόντων στο ενεργό υλικό των laser στερεής κατάστασης. Απαραίτητες προϋποθέσεις λειτουργίας του laser υγρής κατάστασης είναι να απορροφά έντονα τα μήκη κύματος που προκαλούν τη διέγερσή του και να μην απορροφά τα μήκη κύματος που το ίδιο εκπέμπει.

Ο φωτισμός του ενεργού υλικού μπορεί να γίνει εξωτερικά ή όλου του υγρού που βρίσκεται σε διαφανές δοχείο ή του μέρους του υγρού που κατά τη διάρκεια ροής του περνά από ειδικά διαμορφωμένο ακροφύσιο. Η επιλογή του επιθυμητού μήκους κύματος εξόδου γίνεται με κατάλληλη τοποθέτηση ενός πρίσματος ή ενός πλέγματος.



Εικόνα 20. Σχηματική παράσταση ενός laser χρωστικών με τον απαραίτητο μηχανισμό άντλησης, καθώς και την διάταξη τους στο χώρο.

**Πλεονεκτήματα** του dye Laser είναι η έμφυτη ομοιογένεια, η εύκολη επιλογή του επιθυμητού μήκους κύματος (καταρχήν με επιλογή του είδους του υγρού), η εύκολη απομάκρυνση του περισσού ποσού θερμότητας (με ροή του ίδιου του υγρού), η λεπτή ζώνη εξερχομένων συχνοτήτων και η πολύ μικρή διάρκεια των παραγόμενων παλμών Laser.

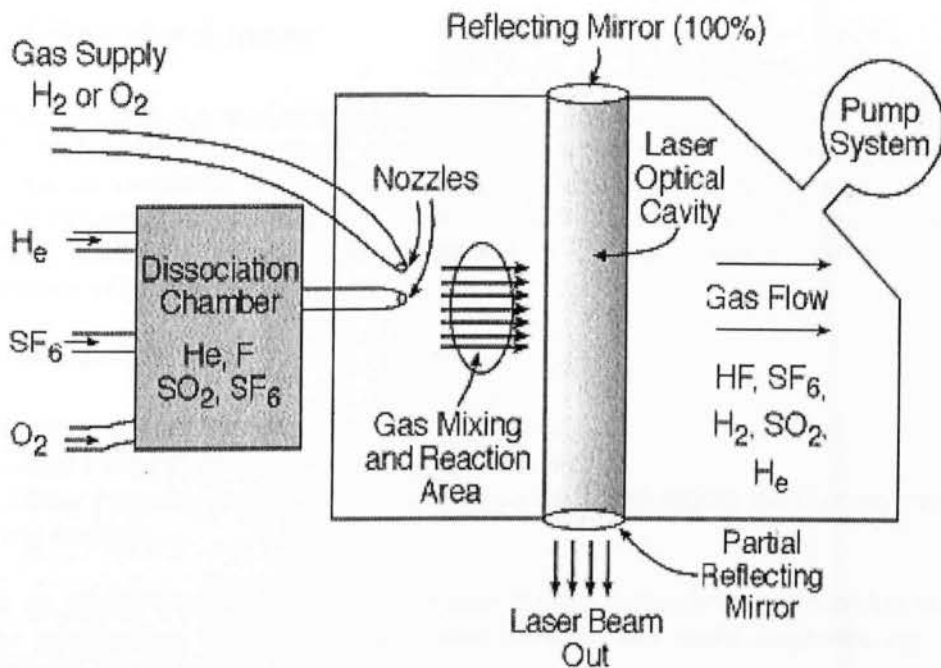
**Μειονεκτήματα** του dye Laser είναι η δύσκολη συντήρηση της συσκευής, η παρουσία-χρήση δεύτερου Laser ως πηγή ενέργειας, ο μικρός χρόνος ζωής της χρωστικής, η χρήση, συχνά τοξικών χημικών και εξατμιζόμενων διαλυτών.

Νέα τεχνολογία οδηγεί προς Laser χρωστικών στερεής κατάστασης. Χαρακτηριστικές εφαρμογές του Laser χρωστικών είναι (α) η καταστροφή καρκινικών όγκων που απορροφούν εκλεκτικά συγκεκριμένα μήκη κύματος (β) η φωτοδυναμική θεραπεία (γ) η κωνιοτοποίηση λίθων στους νεφρούς με κρουστικά κύματα που δημιουργούν οι βραχείς παλμοί του Laser.

#### 2.3.1.2.4 Χημικά

Είναι παράδειγμα συσκευής laser της οποίας η ενέργεια για τη διέγερση του ενεργού υλικού προέρχεται από χημική αντίδραση μεταξύ δύο ατόμων. Ανήκει στην οικογένεια των δυναμικών laser με αέριο, των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην ταχεία εκτόνωση θερμού αερίου υπό πίεση, καθώς περνά σε σχεδόν κενό θάλαμο μέσω ειδικής βελόνας. Η ταχεία εκτόνωση ψύχει το αέριο. Η εκτόνωση είναι ταχύτερη από την αποδιέγερση, επομένως μεσολαβεί κατάσταση διεγερμένων μορίων σε χαμηλή θερμοκρασία, δηλαδή συνθήκη αντιστροφής πληθυσμών. Το αέριο του σωλήνα μπορεί να περνά από πολλές βελόνες ταυτόχρονα προς τον κενό θάλαμο, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση του laser. Οι βελόνες συνήθως τοποθετούνται στην παράπλευρη επιφάνεια του σωλήνα και με διεύθυνση κάθετη προς τον κύριο άξονα.





Εικόνα 21. Διάταξη ενός χημικού laser

Το ενεργό υλικό είναι διατομικό μόριο και οι μεταπηδήσεις γίνονται μεταξύ ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης. Το πιο συνηθισμένο είναι το υδροφθόριο (HF) ή σπανιότερα το φθοριούχο δευτέριο (DF) και το υδροχλώριο (HCl). Εκπέμπουν στην υπέρυθη ζώνη. Ως πηγή υδρογόνου χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες. Φθοριούχο θείο ( $\text{SF}_6$ ) ή φθοριούχο άζωτο ( $\text{NF}_3$ ) χρησιμεύουν ως πηγή φθορίου.

Στα χημικά laser του εμπορίου προστίθεται οξυγόνο για να αντιδράσει με το θείο και να δώσουν μόρια  $\text{SO}_2$ . Στο μίγμα προστίθεται και ήλιον, ίσως και άλλα αέρια, ανάλογα με τον συγκεκριμένο τύπο του laser. Παρόλα αυτά, η συνολική πίεση στο εσωτερικό του laser χαρακτηρίζεται χαμηλή. Τα laser αυτά παράγουν ακτινοβολία στην περιοχή των 3,5 έως 5 $\mu\text{m}$  η οποία είναι ενδιαφέρουσα γιατί είναι μια φασματική περιοχή στην οποία η ατμοσφαιρική διαπερατότητα είναι καλή. Το χημικό laser, έχει μεγάλη ισχύ στην έξοδο και γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση στο laser DF (σε σχέση με το HF) επειδή η ατμόσφαιρα είναι πιο διαφανής στη συγκεκριμένη συχνότητα.

Μειονεκτήματα είναι ότι το δευτέριο είναι ακριβό, το φθόριο αντιδρά πολύ εύκολα με άλλα μόρια και το υδρογόνο θέλει προσοχή για να μην εκραγεί. Στα χημικά laser του εμπορίου εφαρμόζεται δυναμικό περίπου 8KV και σε μερικά προηγείται έκθεση του αερίου σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπεριώδους για να προ-ιοντιστεί και να αυξηθεί η απόδοση της συσκευής.

Τα χημικά laser βρίσκουν εφαρμογή στο στρατιωτικό πεδίο, όπως το εξελιγμένο μέσο-υπέρυθρο (MIRACL, Mid Infra Red Advanced Chemical Laser) σχεδιασμένο να καταστρέφει εχθρικούς πυραύλους στον αέρα (συνεχές Laser ισχύος μέχρι 2 MW και διάρκειας της τάξης του λεπτού). Μπορεί να ακολουθήσει τα ίχνη τους (με τη βοήθεια υπολογιστών) ακόμη και για 50km. Ακόμη μικρότερου μήκους κύματος ( $\sim 1\mu\text{m}$ ) είναι το laser COIL Chemical Oxygen Iodine laser) (χημικό laser ιωδίου οξυγόνου), που χρησιμοποιείται επίσης για στρατιωτικούς σκοπούς.

### 2.3.1.2.5 Διοδικά Laser

Τα διοδικά laser έχουν πολλά κοινά σημεία με τις γνωστές διόδους εκπομπής φωτός LED. Οι διόδοι laser εκπέμπουν σύμφωνο φως μεγάλης έντασης και σχεδόν μονοχρωματικό, σε αντίθεση με τα LED τα οποία εκπέμπουν ασύμφωνο φως με μεγάλο φασματικό εύρος. Τα περισσότερα laser κατασκευάζονται από προσμίξεις ημιαγωγών όπως GaAlAs (Γάλλιο – Αργίλιο – Αρσενικό ) ή από InGaAsP (Ινδίο – Γάλλιο – Αρσενικό και τέλος Φώσφορο)

Καλούνται Laser :

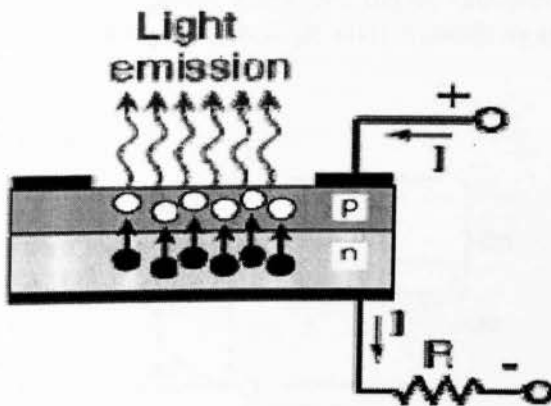
- ημιαγωγών από το υλικό κατασκευής τους,
- Laser επαφής εξαιτίας της ζώνης επαφής p-n
- Laser έγχυσης επειδή το εφαρμοζόμενο δυναμικό εγχύει ηλεκτρόνια στη ζώνη της επαφής.

Είναι τα πλέον διαδεδομένα στο εμπόριο. Χρησιμοποιούνται σε ποικιλία καταναλωτικών προϊόντων, compact disks, Laser printers, bar code scanners και γενικά στην «οπτική επικοινωνία».

Σύντομη υπενθύμιση:

Τα στερεά σώματα χωρίζονται σε τρεις ομάδες:

- Οι μονωτές, μέσα από τους οποίους το ηλεκτρικό ρεύμα περνά πολύ δύσκολα (χαλαζίας, διαμάντι, ρουμπίνιο, πλαστικό)
- Οι αγωγοί, οι οποίοι άγουν πολύ εύκολα το ηλεκτρικό ρεύμα (όλα τα μέταλλα)
- Οι ημιαγωγοί με «ενδιάμεση» απόδοση στη δίοδο του ηλεκτρικού ρεύματος (γερμάνιο Ge, πυρίτιο Si, GaAs, InP, GaAlAs). Η αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς αυξάνεται με την θερμοκρασία, ενώ στους αγωγούς μειώνεται.



Εικόνα 22. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ημιαγωγού

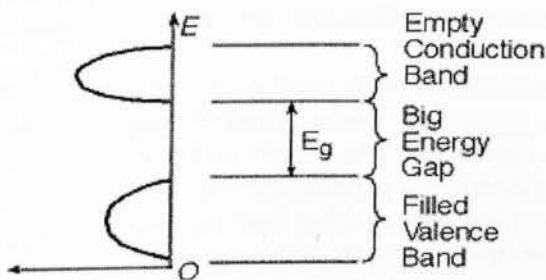
Τα άτομα ή τα μόρια των αερίων έχουν μεταξύ τους μεγάλες αποστάσεις και μπορούν να θεωρηθούν ως ενεργειακά μονωμένα. Με παρόμοια θεώρηση, μεμονωμένες ενεργειακά βρίσκονται και οι προσμίξεις – άτομα ενός υλικού μέσα σε ένα στερεό σώμα. Σε ένα αέριο τα ενεργειακά επίπεδα είναι καλά διαχωρισμένα μεταξύ τους.

Τα ηλεκτρόνια όμως ενός ημιαγωγού ανήκουν σε ευρείες ζώνες ενέργειας, κάθε μια εκ των οποίων περιέχει πολλά ενεργειακά επίπεδα. Αυτές οι ζώνες ενέργειας ανήκουν σε ολόκληρο το υλικό και δεν σχετίζονται με μεμονωμένα άτομα. Το εύρος της ζώνης αυξάνεται όταν η απόσταση μεταξύ των ατόμων μειώνεται και η αλληλεπίδραση των γειτονικών ατόμων αυξάνεται.

Οι ενεργειακές ζώνες είναι δύο ειδών:

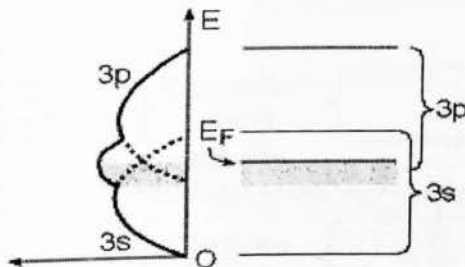
- Η ζώνη σθένους (τα ηλεκτρόνια αυτής της ζώνης είναι «δεμένα» στα άτομα)
- Η ζώνη αγωγιμότητας (τα ηλεκτρόνια αυτής της ζώνης κινούνται ελεύθερα μέσα στο υλικό)

Η απόσταση που χωρίζει τις δυο αυτές ζώνες καλείται «ενεργειακό κενό», επειδή δεν μπορεί να υπάρχουν ηλεκτρόνια με ενέργεια αυτής της ενδιάμεσης περιοχής. Αν κάποιο ηλεκτρόνιο της «κάτω» ζώνης σθένους αποκτήσει πρόσθετη ενέργεια, θα προσπεράσει το κενό και θα φτάσει στη ζώνη αγωγιμότητας. Μόνον εάν υπάρχουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας μπορεί το ηλεκτρικό ρεύμα να διαπεράσει το υλικό. Το ενεργειακό κενό στα υλικά-μονωτές είναι πολύ μεγάλο και δύσκολα περνούν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας.



Εικόνα 23. Παράδειγμα υλικού-μονωτή με μεγάλο ενεργειακό κενό.

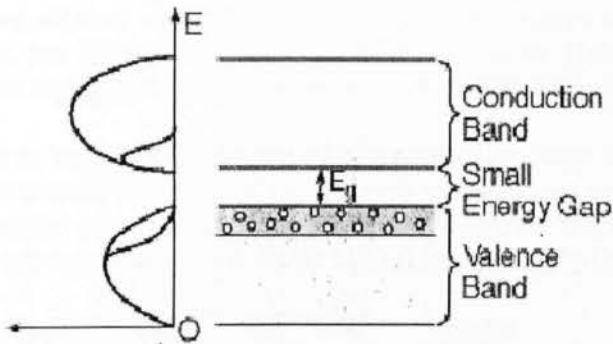
Στα υλικά-αγωγούς οι δυο ζώνες κατά ένα μέρος αλληλεπικαλύπτονται. Ουσιαστικά δεν υπάρχει κενό και τα ηλεκτρόνια με λίγη πρόσθετη ενέργεια άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 24. Παράδειγμα αγωγού όπου το ενεργειακό κενό σχεδόν δεν υπάρχει και η μια περιοχή υπεισέρχεται στην άλλη

Οι ημιαγωγοί βρίσκονται στην ενδιάμεση κατάσταση. Μερικά υλικά άγουν ακόμη και σε θερμοκρασία δωματίου. Όμως γενικά, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο αυξάνεται και ο πληθυσμός της ζώνης αγωγιμότητας.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει τη ζώνη σθένους για να «ανέβει» στη ζώνη αγωγιμότητας, στη ζώνη σθένους μένει-δημιουργείται μια οπή. Οι οπές έχουν συμπεριφορά θετικών φορτίων κινούμενων στη ζώνη σθένους όταν εφαρμοσθεί ηλεκτρικό δυναμικό.



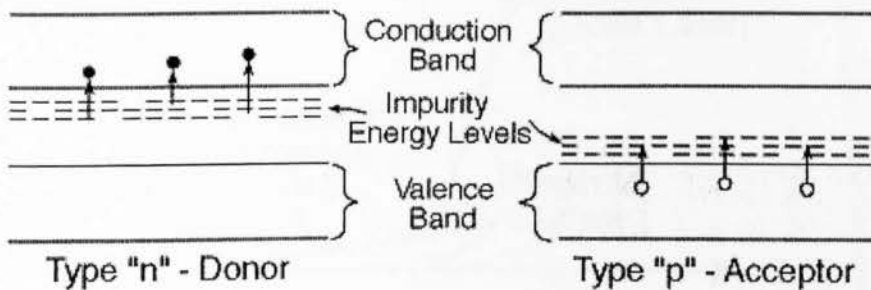
**Εικόνα 25.** Παράδειγμα ημιαγωγού όπου το ενεργειακό κενό είναι πολύ μικρό.

Στη διαδικασία της αγωγιμότητας μετέχουν και τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, και οι οπές της ζώνης σθένους. Για τον έλεγχο του είδους και της πυκνότητας των φορέων φορτίου σε έναν ημιαγωγό, προστίθενται προσμίξεις ουδέτερων ατόμων.

Σε ένα «καθαρό» ημιαγωγικό υλικό η θέση και η απόσταση των ζωνών ενέργειας καθορίζονται από το υλικό. Προσθέτοντας υλικό πρόσμιξης με δικούς του φορείς φορτίων, εμφανίζονται νέα ενεργειακά επίπεδα στο ενεργειακό κενό.

Εάν το υλικό πρόσμιξης περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από το βασικό υλικό, οι επιπλέον φορείς φορτίου είναι αρνητικοί (ηλεκτρόνια) και το υλικό-σύνολο καλείται ημιαγωγός «τύπου n, δότης». Στον ημιαγωγό αυτό τα επιπλέον ενεργειακά επίπεδα βρίσκονται πλησιέστερα στη ζώνη αγωγιμότητας. Με μια μικρή (εξωτερική) προσφορά ενέργειας τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας και διευκολύνεται η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Εάν το υλικό πρόσμιξης περιέχει λιγότερα ηλεκτρόνια από το βασικό υλικό, τα επιπλέον ενεργειακά επίπεδα βρίσκονται πλησιέστερα στη ζώνη σθένους. Με προσφορά εξωτερικής ενέργειας ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους διεγείρονται προς τα πρόσθετα επίπεδα, αφήνοντας πίσω τους «θετικές οπές». Το υλικό-σύνολο καλείται ημιαγωγός «τύπου p, δέκτης».



**Εικόνα 26.** Περιγραφή ημιαγωγού με προσμίξεις που το καθιστούν σε διαφορετικό τύπο.

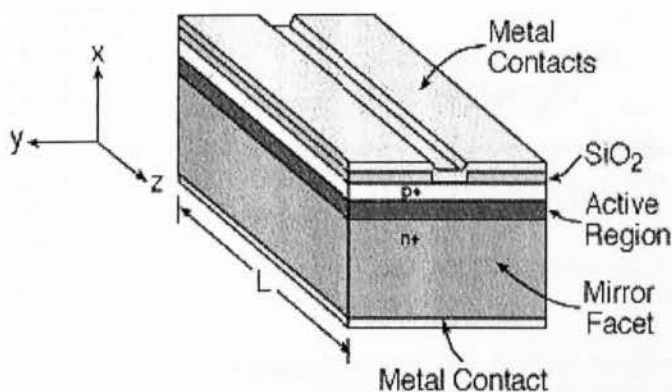
Όταν ένας ημιαγωγός n και ένας ημιαγωγός p έρθουν σε επαφή, σχηματίζεται η επαφή p-n, η οποία άγει το ηλεκτρικό ρεύμα κατά προτίμηση προς τη μία κατεύθυνση.

ση. Αυτή η κατευθυνόμενη αγωγιμότητα είναι το κύριο χαρακτηριστικό στις διόδους και τριόδους της ηλεκτρονικής και ερμηνεύεται με την κατανόηση της διαμόρφωσης των ενεργειακών ζωνών.

Στα laser διόδων, η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με μέγιστη απόδοση όταν η προσφερόμενη ενέργεια (μέσω της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται) είναι περίπου ίση με την ενεργειακή διαφορά μεταξύ ζώνης αγωγιμότητας και ζώνης σθένους. Το ενεργειακό υλικό βρίσκεται στην επαφή p-n και το μήκος του καθορίζεται από τις θέσεις όπου τοποθετούνται οι δυο καθρέφτες.

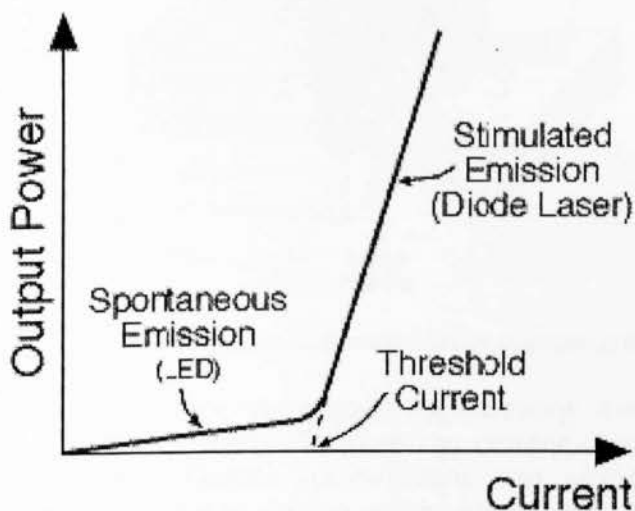
Το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας laser καθορίζεται από τη χημική σύσταση των υλικών p και n, καθώς και από την κρυσταλλική δομή τους.

Αν δεν δημιουργηθεί αντιστροφή πληθυσμών τα φωτόνια παράγονται με αυθόρμητη εκπομπή, δεν έχουμε laser, αλλά δίοδο LED (Light Emitting Diode).



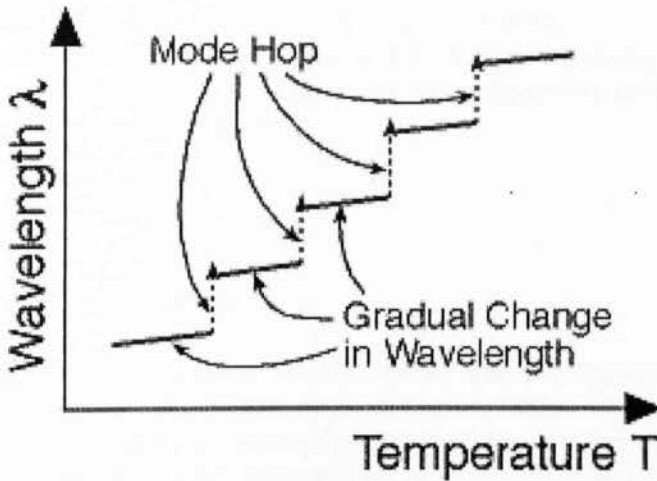
Εικόνα 27. Σχηματική περιγραφή διάταξης ημιαγωγού κατά την χρήση του στο laser.

Όταν η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος περάσει ένα κατώφλι, δημιουργούνται οι συνθήκες για αντιστροφή πληθυσμών και παραγωγή φωτός laser, οπότε η απόδοση της συσκευής αυξάνεται σημαντικά.



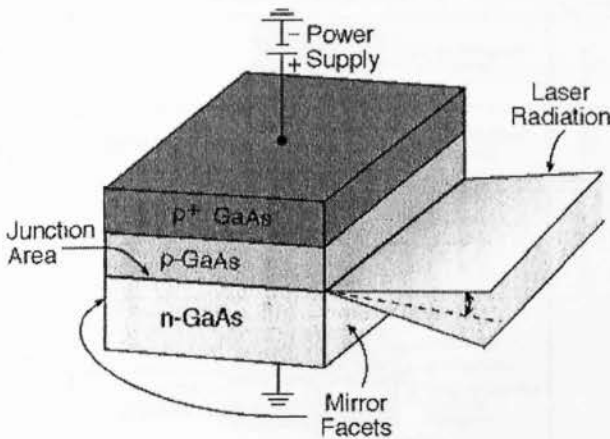
Σχήμα 23. Η αύξηση της ακτινοβολίας όταν προσπεράσουμε το κρίσιμο σημείο.

Πρόβλημα στα laser διόδων είναι η εξάρτηση της τιμής ρεύματος κατωφλίου από τη θερμοκρασία. Όσο περισσότερο ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται στην επαφή p-n, τόσο μεγαλύτερο ποσό θερμότητας παράγεται και τόσο αυξάνεται και η τιμή του ρεύματος κατωφλίου, διαταράσσοντας την ομαλή λειτουργία του laser, μεταβάλλοντας και το μήκος κύματος.



Σχήμα 24. Επίδραση της θερμοκρασίας στην αύξηση του ορίου κατωφλίου.

Η εξερχόμενη δέσμη laser από το ενεργό υλικό της διόδου διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις, σε γωνίες το μέγεθος των οποίων εξαρτάται από τις διαστάσεις της ενεργής περιοχής.



Εικόνα 28. Χαρακτηριστικός τρόπος εξόδου της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

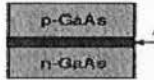

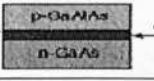

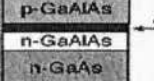

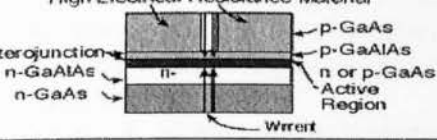
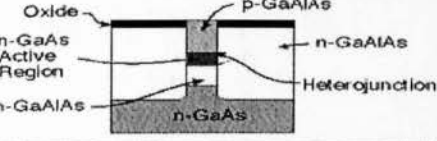
Εξελίχθηκε τεχνολογία για τον περιορισμό της διάχυσης, επιλέγοντας τα υλικά που «αγκαλιάζουν» την ζώνη επαφής. Το υλικό της επαφής είναι συνήθως p-GaAs και αναπτύχθηκαν τα υλικά p-GaAlAs και n-GaAlAs που, κατάλληλα «στρωμένα» στις δυο πλευρές της επαφής, (αλλά και στο κάθετο προς αυτήν επίπεδο) διαμορφώνουν το ενεργειακό κενό (χάσμα) και τον δείκτη διάθλασης της όλης περιοχής με τρόπο που η εξερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία να έχει ελάχιστη γωνία απόκλισης και να παραμένει συγκεντρωμένη στον άξονα διάδοσης.

## Πλεονεκτήματα του Laser διόδων

- Μεγάλη απόδοση
- Υψηλή αξιοπιστία
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (100 χρόνια συνεχούς λειτουργίας)
- Οικονομικό (μαζική παραγωγή και μικρή κατανάλωση ενέργειας)
- Εφικτός ρυθμός δεκάδων GHz (ισοδυναμεί με ταυτόχρονη μετάδοση 5000 τηλεφωνικών κλήσεων σε μια οπτική ίνα)
- Μικρός όγκος και βάρος
- Λεπτή δέσμη συχνοτήτων

## Μειονεκτήματα του laser διόδων

- Ανάγκη εφαρμογής συστημάτων κρυσταλλικής ψύξεως προκειμένου να έχουμε ικανοποιητική λειτουργία με συνεχή παροχή εξόδου laser
- Γενικότερα απαιτείται θερμοστατικός έλεγχος της θερμοκρασίας για να μην επηρεάζεται το εκπεμπόμενο μήκος κύματος και η φωτεινή ένταση εξόδου .
- Πολύ χαμηλό ποσοστό κατευθυντικότητας – συγκεντρωτικότητας δέσμης που οφείλεται στην παρείσφρηση σημαντικής περίθλασης λόγω των μικτών διαστάσεων της ενεργούς ζώνης p-n . Έτσι εδώ αντιμετωπίζουμε ανοίγματα μέχρι και 20° έναντι κλάσματος της μοίρας για τα άλλα laser .
- Σχετικά χαμηλή φασματική καθαρότητα – μεγάλο εύρος ζώνης εκπομπής .

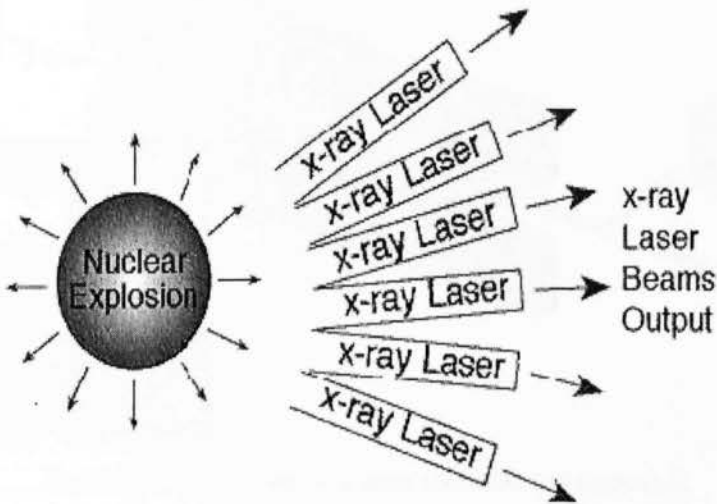
Laser Type	Laser Structure	Radiation Confinement
Homojunction		 <p>A little Confinement in paper plane</p>
Single Heterojunction		 <p>Good Confinement in one side in perpendicular plane (paper)</p>
Double Heterojunction		 <p>Good Confinement in both sides in perpendicular plane (paper)</p>
Gain-Guided Stripe		
Buried Heterojunction (Index-Guided Stripe Geometry)		<p>Good Radiation Confinement in both horizontal and Perpendicular Planes</p>

Εικόνα 29. Μερικά παραδείγματα διοδικών laser.

### 2.3.1.2.6 Laser ακτινών X

Θεωρητικά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία laser μπορεί να έχει μήκος κύματος της περιοχής των ακτίνων X ή γ. Όμως το laser στο ορατό ή στο εγγύς υπέρυθρο δημιουργείται από μεταπηδήσεις ηλεκτρονίων μεταξύ «εξωτερικών» ενεργειακών επιπέδων στα άτομα ή στα μόρια.

Για τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή των ακτίνων X απαιτείται μεταπήδηση πολύ μεγαλύτερης ενεργειακής απόστασης, δηλαδή από τα «εξωτερικά» ενεργειακά επίπεδα προς τα «εσωτερικά». Απαιτείται προσφορά πολύ μεγαλύτερης ενέργειας για τη διέγερση του ενεργού υλικού και μάλιστα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, καθόσον ο χρόνος ημιζωής των διεγερμένων καταστάσεων, είναι πολύ μικρός. Τέτοια ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί από πυρηνική έκρηξη, η οποία θα ήταν ικανή να «οπλίσει» ταυτόχρονα πολλά Laser ακτίνων X.



Εικόνα 30. Πυρηνική έκρηξη που οδηγεί εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο φάσμα των ακτίνων X

Το τεράστιο ποσό ενέργειας εξατμίζει το ενεργό υλικό, το μετατρέπει σε πλάσμα (κατάσταση υλικού όπου ηλεκτρόνια και ιόντα παραμένουν χωριστά) και όταν μερικά από τα «ελεύθερα» ηλεκτρόνια «νιώσουν» την έλξη του θετικού πυρήνα και παγιδευτούν σε εσωτερικές τροχιές, απελευθερώνεται ΗΜΑ ακτίνων X. Η κατάσταση πλάσματος είναι από «φύση της» κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών.

Η διαδικασία είναι σημαντικά αποδοτική και δεν χρειάζονται καθρέφτες για ενίσχυση. Από τη γεωμετρία του όγκου του πλάσματος στο χώρο εξαρτάται η τάση διασποράς της δημιουργούμενης δέσμης Laser.

Στο εργαστήριο Laser ακτίνων X έδωσε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ισχύος TWatt ( $10^{12}$  W) με διάρκεια μικρότερα του ns ( $10^{-9}$  s).

### 2.3.1.2.7 Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου

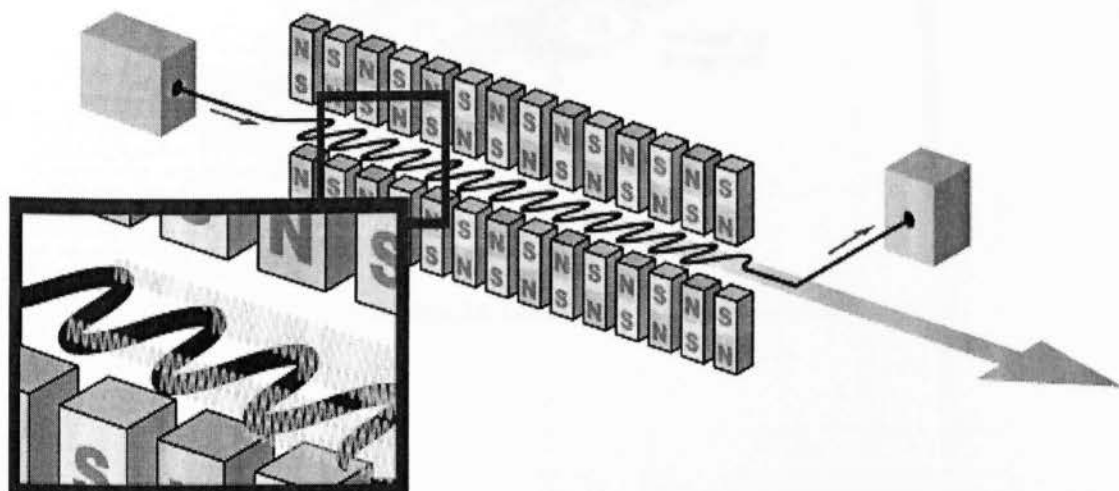
Μέχρι τώρα εξετάσαμε καταστάσεις που τα ηλεκτρόνια είναι δέσμια σε ένα άτομο ή μόριο, καταστάσεις που το ηλεκτρόνιο είναι ελεύθερο και κινείται κατά μήκος μιας αλυσίδας ατόμων σ' ένα συζυγές μόριο διπλού δεσμού (χρωστικών laser) και κατα-



στάσεις που το ηλεκτρόνιο είναι ελεύθερο να κινείται μέσα σε ένα ολόκληρο όγκο του ημιαγωγίμου κρυστάλλου. Τώρα θα εξετάσουμε την περίπτωση όπου τα ηλεκτρόνια κινούνται ελεύθερα διαμέσου ενός περιοδικού μαγνητικού πεδίου και η διεργασία εξαναγκασμένης εκπομπής προέρχεται από την αλληλεπίδραση το ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της δέσμης laser με τα ηλεκτρόνια που κινούνται σε αυτήν την περιοδική δομή.

Το laser ελεύθερου ηλεκτρονίου είναι μια συσκευή υψηλής απόδοσης που εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία οπουδήποτε μήκους κύματος το οποίο εξαρτάται από το σχεδιασμό της συσκευής και όχι από τις ιδιότητες του ενεργού υλικού.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ανήκουν σε δέσμη ηλεκτρονίων και επιταχύνονται σε κενό. Τα ηλεκτρόνια δεν ανήκουν σε άτομα ή μόρια, επομένως μπορούν να μεταπηδούν μεταξύ οποιωνδήποτε ενεργειακών επιπέδων-καταστάσεων.



Εικόνα 31. Περιγραφή ενός laser ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Τα ηλεκτρόνια έχουν ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που κινείται προς την ίδια κατεύθυνση με τα ηλεκτρόνια. Υπάρχει και ειδικά διαμορφωμένο περιοδικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, από σειρά μαγνητών τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις. Σύμφωνα με τη δύναμη Lorenz

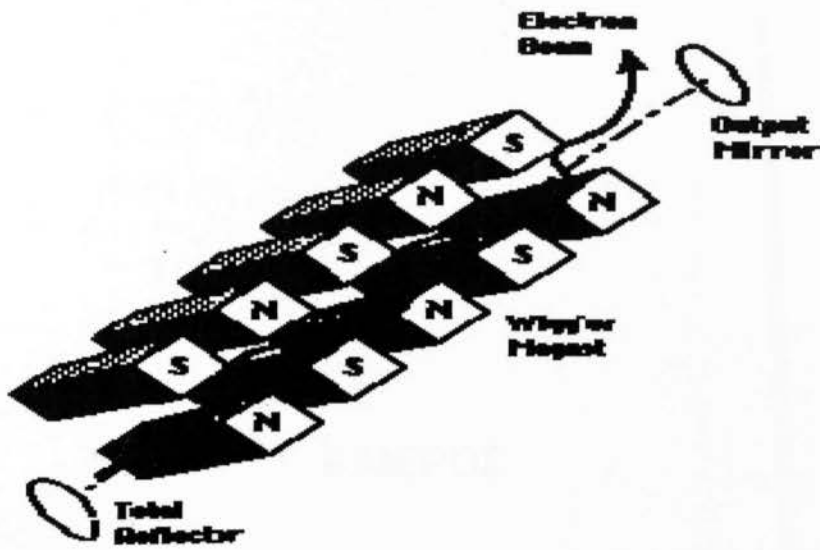
$$F = q * u * B$$

Εάν το μαγνητικό πεδίο (B) είναι κάθετο στην ταχύτητα (u) του φορτίου q (ηλεκτρόνιο), του ασκεί δύναμη F κάθετα στο επίπεδο των u, B. Περιοδικά ασκούμενο μαγνητικό πεδίο μεταβάλλει κατά βήματα τη διεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου, που χάνει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (επιτάχυνση ηλεκτρικού φορτίου → εκπομπή ΗΜΑ). Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος καθορίζεται από την περιοδικότητα του μαγνητικού πεδίου και την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων.

Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια μεταδίδουν μέρος της ενέργειάς τους στο «συμμορφωμένο» ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ειδικότερα στην «ηλεκτρική» συνιστώσα του, εφόσον είναι πολωμένο για να διατηρείται η ταλάντωσή του σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, κάθετο προς το επίπεδο του επιπρόσθετου περιοδικού μαγνητικού πεδίου.

Αρχικά οι εφαρμογές του Laser ελεύθερου ηλεκτρονίου ήταν στον στρατιωτικό τομέα, αλλά σήμερα έχει εφαρμογές και στον ιατρικό τομέα, κυρίως επειδή μπορεί να γίνει επιλογή του μήκους κύματος ώστε να αλληλεπιδρά κατάλληλα με βιολογικούς ιστούς. Υπάρχουν όμως μειονεκτήματα επειδή η συσκευές αυτές απαιτούν ηλεκτρικό

ρεύμα χιλιάδων Ampere και υψηλό δυναμικό χιλιάδων Volt για να επιτευχθούν οι απαιτούμενες ταχύτητες των ηλεκτρονίων. Η συσκευή έχει μεγάλες διαστάσεις, υψηλό κόστος και αναπόφευκτα δημιουργούνται επικίνδυνες ακτίνες X. Βέβαια η εξερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να έχει ισχύ ακόμη και GWatt.



Εικόνα 32. Laser ελεύθερων ηλεκτρονίων.

## **B ΜΕΡΟΣ**

# **ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

## Εφαρμογές στην βιομηχανία

### 3.1 Αλληλεπίδραση δέσμης laser και υλικού

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της εστιασμένης δέσμης laser και της επιφάνειας ενός υλικού συνοδεύεται από τήξη (melting), κίνηση του τήγματος (melting motion), εξάτμιση (evaporation), εξάχνωση (sublimation) και στερεοποίηση (solidification) με αποτέλεσμα να αλλάζει η τοπογραφία της επιφάνειας. Διάφορα σχήματα της ζώνης αλληλεπίδρασης μπορούν να παραχθούν χάρη στη μεταβολή των παραμέτρων αλληλεπίδρασης, οι οποίες καθορίζουν τη φύση της διεργασίας. Το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τη φυσική διεργασία που κυριαρχεί κατά την αλληλεπίδραση δέσμης-υλικού. Η διεργασία του υλικού κατά τη χρήση παλμικού laser μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διάτρηση (drilling), σημειακή συγκόλληση (spot welding), και τήξη της επιφάνειας (surface melting).

Είναι σημαντικό να αντιληφθούμε ότι αυτά τα είδη διεργασιών δεν είναι ανεξάρτητα φαινόμενα. Αντιθέτως, είναι το αποτέλεσμα των ίδιων φυσικών φαινομένων και απλά ανταποκρίνονται στις καταστάσεις ανάλογα με ποιος τύπος φυσικής διεργασίας επικρατεί. Συνεπώς υπάρχει μία γκάμα από παραμέτρους αλληλεπίδρασης οι οποίες ανταποκρίνονται είτε στη διάτρηση, στη συγκόλληση και στην τήξη της επιφάνειας, είτε σε καταστάσεις μετάβασης. Τόσο η κατάλληλη κατηγοριοποίηση των προϋποθέσεων όταν κάποια διεργασία κυριαρχεί και οδηγεί στη συγκόλληση την κοπή ή τη διάτρηση, όσο και ένα γενικευμένο μοντέλο που αφορά τις διεργασίες μεταξύ laser και υλικού, βρίσκονται προς συνεχή βελτίωση.

Συνήθως ο όρος διάτρηση με laser (laser drilling) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη διαδικασία κατά την οποία έχουμε εκτόξευση υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Η εκτόξευση υλικού και συνεπώς η δημιουργία κρατήρων καθορίζεται από την ανταγωνιστική πορεία μεταξύ της εκτόξευσης τηγμένου υλικού (melt ejection) και της εξάτμισης (evaporation). Η διάτρηση με laser μέσω εξάτμισης (evaporation dominated drilling) απαιτεί είτε υψηλής απορροφητικότητας ένταση δέσμης (high absorbed beam intensity), (πάνω από  $10 \text{ MW/cm}^2$  για ακτίνα δέσμης  $200 \mu\text{m}$ ) ή για μετρίου επιπέδου ένταση δέσμης, μικρό χρόνο αλληλεπίδρασης. Ο χρόνος αλληλεπίδρασης σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να είναι μικρότερος από μια στάνταρ τιμή η οποία καθορίζεται από την απορροφητικότητα της έντασης της δέσμης και τις διαστάσεις της κηλίδας (spot size). Σημειωτέον ότι μερικά υλικά δεν παράγουν υγρή φάση (liquid phase) κατά την ακτινοβολία. Σε μία τέτοια περίπτωση η εξάχνωση (sublimation) είναι υπεύθυνη για την αποβολή υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης.

Παρατηρήθηκε ότι αν η ένταση της δέσμης laser υπερβεί αυτήν την στάνταρ τιμή, η οποία για μικρού μήκους κύματος απορρόφηση κυμαίνεται μεταξύ  $10\text{-}100 \text{ W/cm}^2$ , η εξάτμιση γίνεται ασταθής. Τότε οι πρώτες χωρικές περιοδικές διαταραχές της τάξης του εκατομμυριοστού αρχίζουν να αναπτύσσονται.

Αυτό μπορεί να δικαιολογήσει τη δημιουργία κορυφών (pikes) που έχουν παρατηρηθεί σε επιφάνειες στις οποίες έχει εφαρμοστεί ακτινοβολία μέσω excimer laser. Η απόρριψη τηγμένου υλικού από τη ζώνη αλληλεπίδρασης εξαιτίας της βαθμωτής μεταβολής της πίεσης αντίδρασης είναι ο βασικός μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για το σχηματισμό κρατήρων στα μέταλλα όταν η ένταση της απορροφούμενης δέσμης

είναι μετρίου επιπέδου ( $5-10 \text{ W/cm}^2$ ) και ο χρόνος αλληλεπίδρασης είναι μεγάλος. Όταν το ποσό του απορριπτόμενου ή εξατμιζόμενου υλικού είναι μικρό, ρηχές κοιλοότητες (shallow depressions) σχηματίζονται στην επιφάνεια. Αν η ταχύτητα του απορριπτόμενου τήγματος από τη ζώνη αλληλεπίδρασης είναι μικρή και έχει κατεύθυνση κατά μήκος της επιφάνειας, τότε το τηκόμενο υλικό στερεοποιείται γύρω από τους κρατήρες, σχηματίζοντας περιφέρειες από πολύ μικρές ποσότητες υλικού που τους περιβάλλει. Χαμηλή ταχύτητα απορριπτόμενου τήγματος συνεπάγεται ότι η δυναμική πίεση του ρέοντος τήγματος είναι ανεπαρκής να ξεπεράσει την πίεση που δημιουργείται στην άκρη του κρατήρα λόγω της διαβροχής (wetting) και της επιφανειακής τάσης (surface tension), με αποτέλεσμα το τηκόμενο υλικό να μένει στην επιφάνεια μέχρι να στερεοποιηθεί.

Το απορριπτόμενο τήγμα κατευθύνεται κατά μήκος της επιφάνειας εάν το βάθος των κρατήρων είναι αρκετά μικρότερο της ακτίνας τους. Για να επιτευχθεί τέτοια κατάσταση αλληλεπίδρασης η κατανομή της θερμοκρασίας της τηγμένης επιφάνειας στη ζώνη αλληλεπίδρασης πρέπει να είναι ομαλή, ώστε να οδηγήσει στη δημιουργία μίας δισδιάστατης ροής. Παρουσία μικρής κλίμακας χωρικών μεταβολών της θερμοκρασίας της επιφάνειας, η πίεση αντίδρασης επίσης αλλάζει σε μικρή κλίμακα. Αυτό επιφέρει τη δημιουργία υψηλής πίεσης αντίδρασης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εκτόξευση τήγματος (melt ejection). Αυτό θα εμποδίσει τη δημιουργία σημαντικής περιφέρειας τηγμένου υλικού γύρω από τον κρατήρα.

Αν το τήγμα το οποίο είναι διάσπαρτο υπό μορφή σταγονιδίων (spattered melt) γύρω από τον κρατήρα περιέχει ικανή θερμότητα ώστε να τήξει το δείγμα της επιφάνειας από κάτω του, και ο χρόνος αλληλεπίδρασης μεταξύ απορριπτόμενου τήγματος και υποστρώματος είναι αρκετά μεγάλος, τότε μπορεί να επιτευχθεί ισχυρή σύνδεση στην περιφέρεια της επιφάνειας. Όμως, ακόμα και υπό αυτές τις συνθήκες δεν θα επιτευχθεί αυτός ο δεσμός εάν η επιφάνεια δεν είναι πλήρως καθαρή. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει ένα λεπτό στρώμα από λάδι στην επιφάνεια, τότε ένα μέρος της ενθαλπίας του απορριπτόμενου τήγματος αναλώνεται στην εξάτμιση αυτού του στρώματος και δημιουργείται ανάμεσα στο τηκόμενο υλικό και το υπόστρωμα μία στρώση από το εξατμιζόμενο λάδι η οποία εμποδίζει την καλή πρόσφυση μεταξύ του τήγματος και της στερεάς επιφάνειας.

Επίσης, η παρουσία οξειδωμένης επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή προσκόλληση του απορριπτόμενου τήγματος με το υπόστρωμα, μιας και η θερμοκρασία τήξης ενός λεπτού στρώματος οξειδίου είναι συνήθως υψηλή.

Για χαμηλής έντασης δέσμη laser ( $1-5 \text{ MW/cm}^2$ ), η βαθμωτή μεταβολή της πίεσης αντίδρασης (gradient of recoil pressure) είναι μικρή για να δημιουργήσει ροή τήγματος με αρκετά υψηλή ταχύτητα επειδή η δυναμική πίεση του ρέοντος τήγματος είναι μικρότερη από την επιφανειακή τάση στην άκρη της κοιλότητας με το τήγμα. Αν οι παράμετροι αλληλεπίδρασης είναι κατάλληλοι ώστε το τηγμένο υλικό να επιστρέψει στην αρχική του θέση μετά την έκθεση στο παλμικό laser και πριν τη στερεοποίηση, τότε αυτή η κατάσταση αλληλεπίδρασης ανταποκρίνεται στη σημειακή συγκόλληση.

Ωστόσο, αν η μετατόπιση του τήγματος είναι υψηλή και η διάρκεια ζωής του τήγματος πριν τη στερεοποίησή του είναι μικρή, τότε η επιφανειακή τάση δεν μπορεί να επαναφέρει το τήγμα στην αρχική του θέση. Αυτή η κατάσταση συμβαίνει κατά τη μετάβαση μεταξύ συγκόλλησης (welding) και διάτρησης (drilling) και αντιστοιχεί στην τροποποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας χωρίς την παρουσία διάσπαρτου τήγματος υπό μορφή σταγονιδίων γύρω από τη ζώνη αλληλεπίδρασης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την κατάσταση σχηματίζεται μία περιφέρεια από στερεοποιημένο τήγμα παρόμοια με την περίπτωση του διάσπαρτου τήγματος υπό μορφή στα-

γονιδίων που αναφέραμε παραπάνω. Η διαφορά είναι ότι η στερεοποιημένη περιφέρεια του τήγματος παραμένει μέσα στην κοιλότητα που έχει δημιουργηθεί.

## 3.2 Επεξεργασία υλικών

### 3.2.1 Γενικά

Το laser χρησιμοποιούνται ευρέως πλέον για να υποστηρίξουν ένα μεγάλο αριθμό διαδικασιών επεξεργασίας υλικών όπως κοπή, διάτρηση, συγκόλληση, επεξεργασία επιφανειών 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, που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τις συμβατικές μεθόδους.

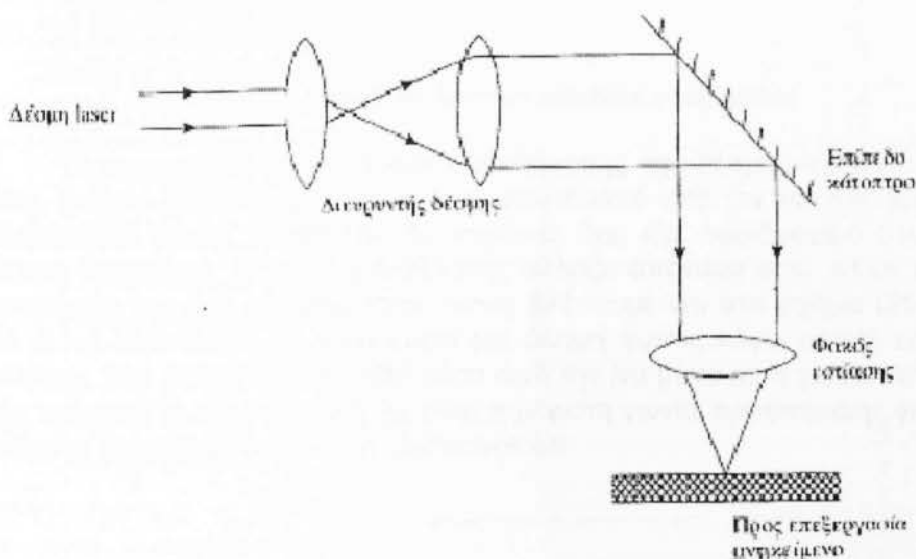
Τα πλεονεκτήματα αυτά περιλαμβάνουν τα εξής :

- 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.
- 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.
- Είναι σχετικό εύκολος έλεγχος της έντασης ακτινοβολίας της δέσμης και ως εκ τούτου ο έλεγχος της ενέργειας που προσπίπτει στο σημείο εστίασης.
- Η δέσμη μπορεί εύκολα να κατευθυνθεί σε σχετικά δυσπρόσιτα σημεία και να οδηγηθεί γύρω από τις απότομες γωνίες.
- 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 CO<sup>2</sup> 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 μηχανισμού εξαρτάται συχνά από την ικανότητα ακριβώς της παροχής της δέσμης σε μια εστιασμένη κηλίδα 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 ταλαντευόμενων ρυθμών.

Στην παρακάτω εικόνα (33) μπορούμε να δούμε ένα απλοϊκό αλλά και συνάμα κατανοητό 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.

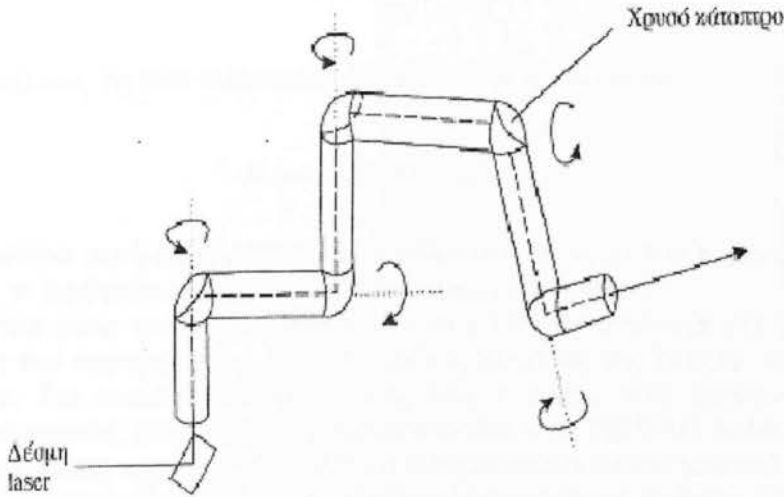


Εικόνα 33. Σχηματική παράσταση συστήματος οδήγησης και εστίασης της δέσμης laser.

Πράγματι, σε πολλές εφαρμογές η δέσμη πρέπει να οδηγηθεί είτε με αρθρωτούς βραχίονες όπως μπορούμε να δούμε και στην εικόνα (34), είτε μέσω οπτικών ινών.

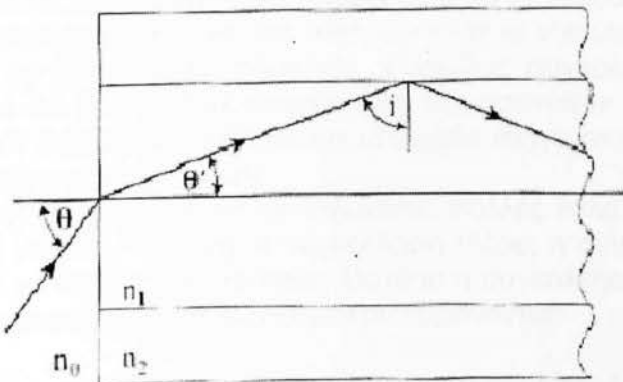
Να τονίσουμε σε αυτό το σημείο ότι η σωστή επιλογή των οπτικών μέσων και της διαδρομής της δέσμης περιέχει μεγάλο μέρος της προληπτικής ασφάλειας αυτών των μηχανημάτων καθώς οι διαρροές ακτινοβολίας, οι μη επιθυμητές ανακλάσεις και διαθλάσεις είναι συνηθισμένα φαινόμενα ακόμα και απειροελάχιστες αστοχίες αυτών των διατάξεων. Συστήματα αρθρωτών βραχιόνων, στα laser CO<sub>2</sub> ειδικά, περιλαμβάνουν μια 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 συμπεριλαμβάνεται 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.



Εικόνα 34. Σύστημα οδήγησης με βραχίονες.

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 όπως βλέπουμε και στο σχήμα (25). Εφόσον  $n_2 < n_1$  η ίνα είναι ικανή να παγιδεύσει μια δέσμη φωτός λόγω ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μια ακτίνα θα οδηγηθεί μέσα από την ίνα μόνο αν η γωνία  $i$  είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας  $i_c$ . Αν η  $\theta_m$  είναι η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης για την οποία θα υποστεί εσωτερική ανάκλαση, βλέπουμε ότι:



Σχήμα 25. Σχηματική παράσταση οπτικής ίνας



$$n_0 \sin \theta_m = n_1 \sin \theta' = n_1 \cos i_c$$

Η κρίσιμη γωνία δίνεται από την σχέση

$$\sin i_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Χρησιμοποιώντας τις δυο τελευταίες εξισώσεις βρίσκουμε ότι

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

Η ποσότητα αυτή είναι γνώστη 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 CO<sub>2</sub> laser, όπου το μήκος κύματος στα 10,6μm απορροφάται ολοκληρωτικά. Αντιθέτως, τα γυαλιά των χαλκογενιδίων είναι αρκετά αποτελεσματικά για τα laser CO<sub>2</sub>.

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

### 3.3 Συγκόλληση

Η συγκόλληση είναι βασικά μια θερμική διαδικασία. Στην βασική διαδικασία συγκόλλησης, δυο μέταλλων, 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 και τόση ώστε να το εξατμίσει. Η εξατμίσση ενδεχομένως μπορεί να οδηγήσει σε αδύναμες, πορώδεις συγκολλήσεις. Ένα από τα προβλήματα είναι ότι η ανακλαστικότητα των περισσοτέρων μετάλλων μειώνεται δραματικά καθώς η θερμοκρασία πλησιάζει το σημείο τήξης, απαιτώντας μεγαλύτερο έλεγχο της προσπίπτουσας ενέργειας.

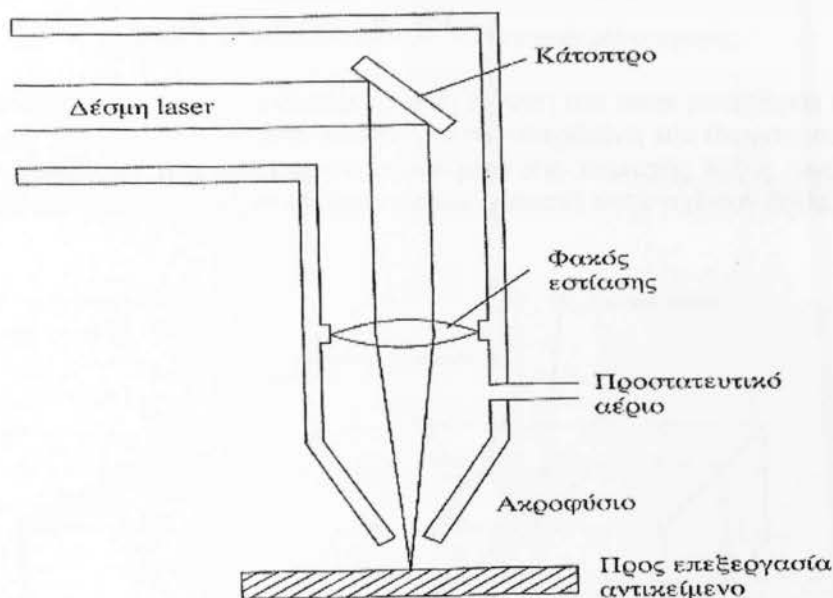
Η συγκόλληση με laser έχει να συναγωνιστεί πολλές καλά καθιερωμένες τεχνικές, όπως είναι η μαλακή κόλληση, η συγκόλληση τόξου, η συγκόλληση αντίστασης και η συγκόλληση με δέσμης ηλεκτρονίων. Ωστόσο η συγκόλληση με laser έχει αρκετά πλεονεκτήματα μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται:

- Η μεγάλη ένταση ακτινοβολίας. Με τη χρήση laser διοξειδίου του άνθρακα συνεχούς λειτουργίας και ισχύς 105 με 107 W/cm<sup>2</sup> είναι εφικτές θερμοκρασίες έως και 20000K. Σαν αποτέλεσμα, η ικανότητα και η ποιότητα μπορεί να συγκριθεί μόνο με αυτήν της συγκόλλησης με δέσμη ηλεκτρονίων. Ταυτόχρονα η

συνολικά απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για τη δημιουργία της συγκόλλησης είναι πολύ μικρότερη από αυτή που απαιτείται σε άλλες συμβατικές μεθόδους.

- Η θέρμανση είναι εντοπισμένη και η ψύξη είναι γρήγορη έτσι ώστε οι γειτονικές περιοχές να μην επηρεάζονται.
- Δεν υπάρχει φυσική επαφή με άλλα εξωτερικά στοιχεία.
- Ανόμοια υλικά μπορούν να συγκολληθούν, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να συμβεί με τις άλλες κλασικές μεθόδους.
- Η διαδικασία μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί.
- Μπορούμε να έχουμε γρηγορότερους ρυθμούς συγκόλλησης από ότι με τις κλασικές μεθόδους.
- Υψηλής ποιότητας είναι το παραγόμενο αποτέλεσμα.

Η συγκόλληση γίνεται χρησιμοποιώντας ένα αδρανές προστατευτικό αέριο, όπως για παράδειγμα το αργό ή το ήλιο, για να καλύψει την περιοχή συγκόλλησης ώστε να αποτρέψει την οξείδωση των μετάλλων, η οποία οδηγεί σε συγκολλήσεις κακής ποιότητας. Όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω σχήμα. Το αέριο βοηθά επίσης και στην απομάκρυνση οποιουδήποτε ατμού του μετάλλου που 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 υλικό.

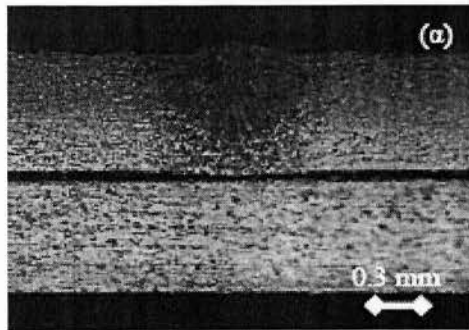


Σχήμα 26. Σύστημα εστίασης με ροή αδρανούς αέριο.

Ο μηχανισμός που διέπει την συγκόλληση με laser εξαρτάται από το μέγεθος της έντασης laser που ακτινοβολείται προς το επεξεργασία κομμάτι. Στην περίπτωση όπου η ένταση laser είναι μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή  $I_{keyhole}$  χαρακτηριστική για κάθε υλικό (στον παρακάτω πίνακα), η αντίστοιχη παρεχόμενη ισχύς του laser  $P_{keyhole}$  είναι ικανή να προκαλέσει μόνο την τοπική τήξη των υλικών των υπό συνένωση ελασμάτων.

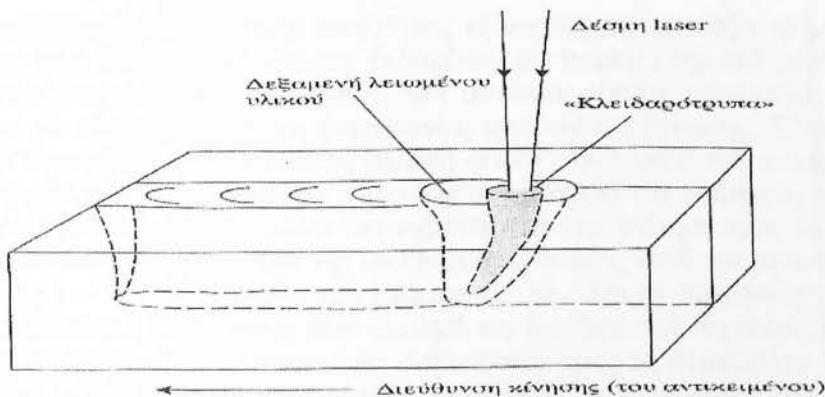
$$I_{keyhole} = \frac{2P_{keyhole}}{\pi r f_0^2}$$

Στην περίπτωση αυτή, η διεργασία αναφέρεται ως συγκόλληση με laser μέσω αγωγής (conduction laser welding). Βασικό γνώριμα της συγκεκριμένης περίπτωσης συγκόλλησης αποτελεί το γεγονός ότι ο λόγος του βάθους συγκόλλησης προς το πάχος συγκόλλησης κυμαίνεται σε τιμές μικρότερες ή ίσες της μονάδας, η δε μορφή της περιοχής τήξης που προκύπτει προσομοιάζεται με το παρακάτω εικόνα(35).



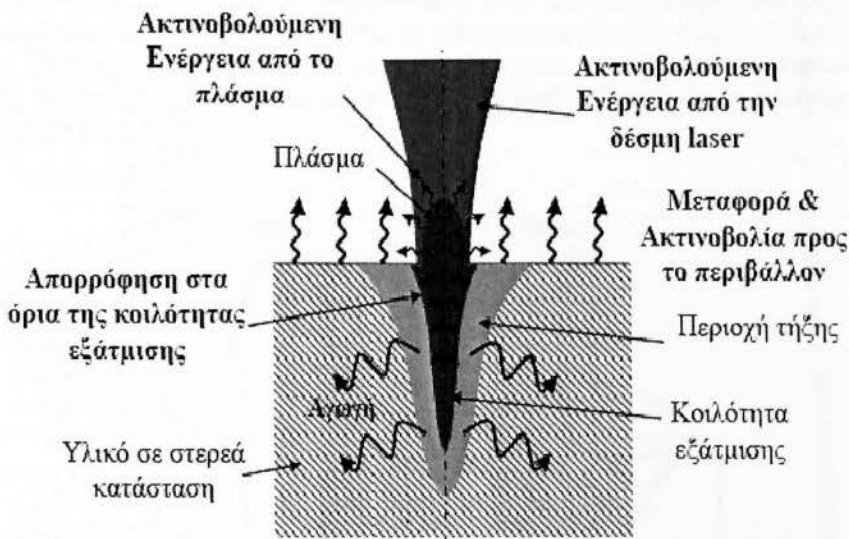
Εικόνα 35. Προφίλ συγκολλήσεων με laser μέσω αγωγής.

Στην περίπτωση όπου η εφαρμοζόμενη ένταση του laser υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή  $I_{keyhole}$  η θερμοκρασία που αναπτύσσεται υπερβαίνει την θερμοκρασία εξατμίσεως του υλικού, με αποτέλεσμα στο εσωτερικό της περιοχής τήξης (weld pool) να σχηματίζεται μια κοιλότητα εξατμισμένου υλικού γνωστή στην σχετική βιβλιογραφία ως keyhole.



Σχήμα 27. Το φαινόμενο της κλειδαρότρυπα

Ανάλογα με τις παραμέτρους της διεργασίας για δεδομένο πάχος υλικού, ο σχηματισμός της κοιλότητας εξάτμισης μπορεί να είναι μερικός ή καθ' όλο το πάχος των υπό συνένωση ελασμάτων. Καθώς η δέσμη laser μετακινείται σε σχέση με τα προς συνένωση ελάσματα, το τήγμα το οποίο περιβάλλει την κοιλότητα εξάτμισης, στερεοποιείται, σχηματίζοντας την επιθυμητή συγκόλληση. Επειδή η κοιλότητα εξάτμισης έχει την μορφή οπής επιτρέπει στη δέσμη laser να εισχωρεί στο εσωτερικό του υλικού προσδίδοντας την ενέργεια της στο υλικό, σε μεγαλύτερο βάθος. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη περίπτωση συγκόλλησης επιτυγχάνει λόγους του βάθους συγκόλλησης προς το πάχος συγκόλλησης που υπερβαίνουν την μονάδα, η δε μορφή της περιοχής τήξης που προκύπτει προσομοιάζεται από το παρακάτω εικόνα(34).



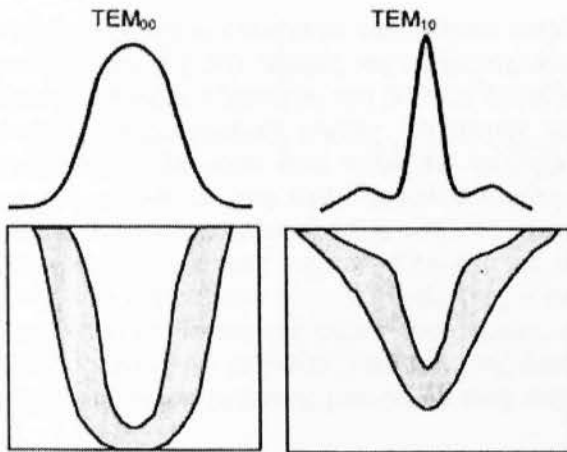
Εικόνα 36. Φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας κατά την διεργασία συγκόλλησης με laser με ανάπτυξη κοιλότητας εξάτμισης.

Η συγκόλληση με ανάπτυξη κοιλότητας εξάτμισης παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον από βιομηχανική άποψη, δεδομένου ότι παρέχει σχετικά μεγάλο βάθος συγκόλλησης και περιλαμβάνει αρκετά πιο σύνθετα φυσικά φαινόμενα, τα οποία συνδέονται με τον μηχανισμό της δημιουργίας κοιλότητας εξάτμισης. Τέτοιου είδους φαινόμενα περιλαμβάνουν την διπλή αλλαγή φάσης του υλικού τον ιονισμό του μεταλλικού ατμού και του βοηθητικού αερίου με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πλάσματος και την μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας από το πλάσμα προς το υλικό, την απορρόφηση ενέργειας στα όρια της κοιλότητας εξάτμισης από την ακτινοβολία του laser, καθώς και την ακτινοβολία του πλάσματος, την αγωγή θερμότητας στο υλικό καθώς και απώλειες θερμότητας από το υλικό και την διάρκεια της διεργασίας μέσω μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά και ακτινοβολία προς το περιβάλλον. Η ποιότητα, το σχήμα, η σταθερότητα και η αντοχή της συγκόλλησης με λέιζερ είναι συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων όπως τα χαρακτηριστικά της δέσμης, τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας και τη μορφή της σύνδεσης.

### 3.3.1 Βασικές παραμέτρους της συγκόλλησης με laser

- Χαρακτηριστικά της δέσμης

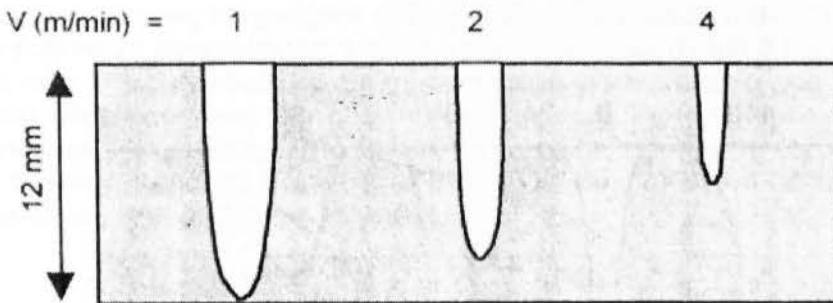
Τα χαρακτηριστικά του λέιζερ που επηρεάζουν τη συγκόλληση είναι, η ισχύς και η πόλωση της δέσμης, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και η κατανομή της ενέργειας στη διατομή της δέσμης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την συγκόλληση με λέιζερ απαιτείται αρκετά μεγάλη ισχύς η οποία μπορεί να προέλθει είτε από συνεχές είτε από παλμικό λέιζερ. Για τα συνεχή λέιζερ πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ταχύτητα συγκόλλησης (κίνηση του υλικού) καθώς αυτή σχετίζεται με το βάθος συγκόλλησης. Μεγάλες ταχύτητες απαιτούν πάντοτε μεγάλη ισχύ η οποία όμως μπορεί να προκαλέσει δημιουργία πλάσματος και λιγότερο αποδοτική συγκόλληση. Κατά τη χρήση των παλμικών λέιζερ, η συγκόλληση είναι συνήθως σημειακή (spot welding) και η ραφή των υλικών επιτυγχάνεται με αλληλοεπικάλυψη των σημειακών συγκολλήσεων. Υπάρχουν όμως δύο επιπλέον παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη: ο ρυθμός επανάληψης λειτουργίας του λέιζερ (repetition rate) και η αλληλοεπικάλυψη των σημείων συγκόλλησης.



**Σχήμα 28.** Εξάρτηση της μορφής της ραφής της συγκόλλησης από το ρυθμό ταλάντωσης του λέιζερ

Το μήκος κύματος επηρεάζει διπλά τη διαδικασία συγκόλλησης, με τη απορρόφηση και με την εστίαση. Η επίδραση του μήκους κύματος στην απορρόφηση του υλικού είναι ουσιαστική μόνο στα πρώτα στάδια καθώς μετά τη δημιουργία της οπής, η απορρόφηση αυξάνεται ανεξάρτητα από το μήκος κύματος. Όσο αφορά την εστίαση, τα μικρότερα μήκη κύματος βοηθούν την ισχυρότερη εστίαση άρα επιτρέπουν μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας. Σχετικά με την πόλωση, οι δέσμες με επίπεδο πόλωσης κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης (s- πόλωση) προκαλούν πλατύτερες συγκολλήσεις από αυτές των δεσμών που είναι πολωμένες παράλληλα στο επίπεδο πρόσπτωσης (p-πόλωση).

Τέλος, η επίδραση της κατανομής της ισχύος στη διατομή του λέιζερ (ή ο ρυθμός ταλάντωσης του λέιζερ) στη συγκόλληση είναι μικρότερη από αυτήν στην κοπή. Όμως και σε αυτή την περίπτωση, η συγκόλληση με δέσμη TEM00 είναι καλύτερης ποιότητας όπως φαίνεται στο σχήμα (28).

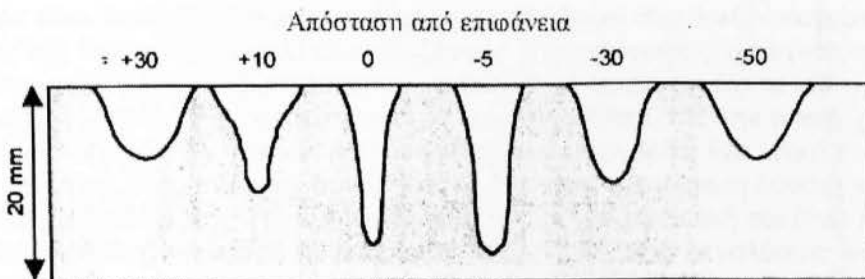


Σχήμα 29. Εξάρτηση της μορφής της ραφής της συγκόλλησης από την ταχύτητα κίνησης

- **Χαρακτηριστικά της διαδικασίας.**

Η ταχύτητα συγκόλλησης πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά καθώς καθορίζει το βάθος διείσδυσης όπως φαίνεται στο (Σχ.36). Μικρές ταχύτητες προκαλούν βαθιές και ισχυρές συγκολλήσεις όμως η ακριβής εξάρτηση του βάθους διείσδυσης από την ταχύτητα είναι συνάρτηση και της παρεχόμενης ισχύος. Ταχύτητες μεγαλύτερες από 1.5-2 m/min ελαχιστοποιούν τα προβλήματα που προκαλεί το δημιουργούμενο πλάσμα. Ιδιαίτερη προσοχή όμως απαιτείται στις πολύ μεγάλες ταχύτητες καθώς μπορεί να προκαλέσουν ασυνέχειες και ανομοιογένειες μέσα στο επαναστεροποιούμενο υλικό. Τέλος, σε κάθε περίπτωση, η ταχύτητες της συγκόλλησης με λέιζερ είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που επιτρέπουν όλες οι συμβατικές τεχνικές.

Σοβαρή είναι όμως και η επίδραση της θέσης του σημείου εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια του υλικού καθώς και το βάθος εστίασης της δέσμης. Για υλικά με πάχος μικρότερο από 5mm το σημείο εστίασης μπορεί να είναι στη επιφάνεια του

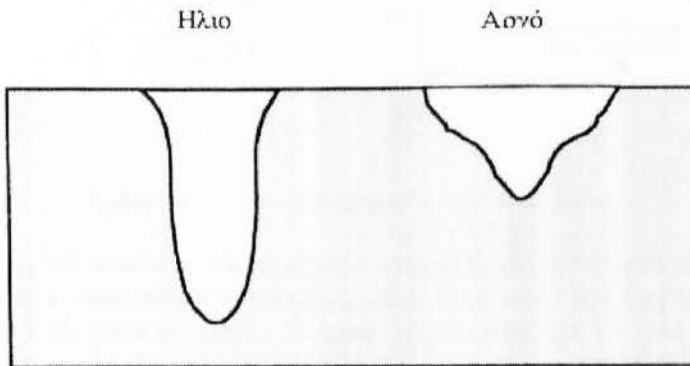


Σχήμα 30. Εξάρτηση της μορφής της ραφής της συγκόλλησης από την απόσταση.

υλικού, όμως, για υλικά με πάχος μεγαλύτερο από 10mm το σημείο εστίασης πρέπει να είναι λίγο μέσα στο υλικό όπως φαίνεται στο σχήμα.30. Όσον αφορά το βάθος εστίασης, αυτό δεν επηρεάζει επιφανειακές συγκολλήσεις επαφής ή συγκολλήσεις λε-

πτών υλικών, όμως πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε συγκολλήσεις βάθους με μήκος συγκόλλησης μεγαλύτερο από 5mm.

Τέλος, η προστασία του λειωμένου υλικού από τη οξειδωση είναι μία παράμετρος που βοηθά στην κατασκευή ισχυρών και καλής ποιότητας συγκολλήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ροής αερίου Ηλίου ή Αργού. Τα αέρια αυτά όμως, εκτός από την παροχή προστασίας επηρεάζουν και την μορφή της συγκόλλησης. Το μεν Ήλιο προκαλεί βαθύτερες συγκολλήσεις, ενώ το Αργό πλατύτερες σχήμα 31. Ένα επιπλέον σημείο στο οποίο μπορούν να έχουν ουσιαστικό ρόλο τα αέρια είναι η απομάκρυνση του πλάσματος από το σημείο αλληλεπίδρασης. Αυτό γίνεται εφικτό με τη χρήση κατάλληλου ακροφύσιου υπό κατάλληλη γωνία σε σχέση με τη δέσμη laser και το υλικό. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όμως στην αποφυγή διαταραχής του λειωμένου υλικού στο σημείο συγκόλλησης.

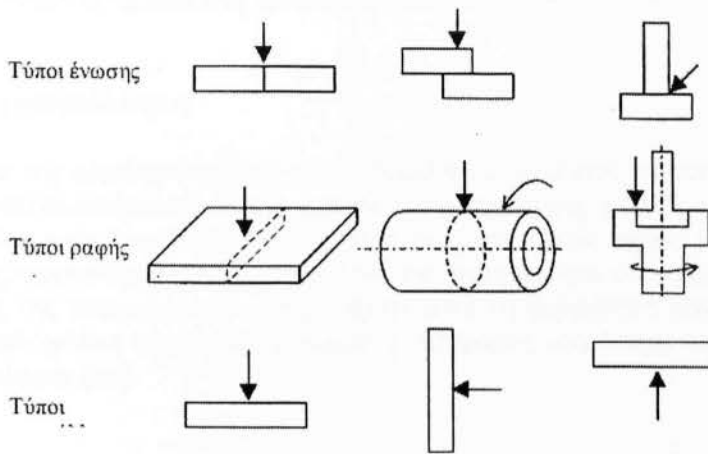


Σχήμα 31. Εξάρτηση της μορφής της ραφής της συγκόλλησης από το αέριο πρέπει να δίνεται όμως στην αποφυγή διαταραχής του λειωμένου υλικού στο

### • Μορφές σύνδεσης

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατάταξης του είδους της σύνδεσης των δύο υλικών στη συγκόλληση με λέιζερ (Σχ.32). Τα δύο υλικά κατά τη συγκόλληση μπορεί να είναι το ένα δίπλα στο άλλο (butt weld), το ένα επάνω στο άλλο (lap weld) ή τα δύο υλικά να σχηματίζουν ένα τάφ (T weld). Η ραφή της συγκόλλησης μπορεί να είναι γραμμική (τα υλικά κινούνται σε ευθεία) ή κυκλική (το υλικά περιστρέφονται). Η συγκόλληση μπορεί να είναι συνεχής ή σημειακή ή αλληλοεπικάλυψη σημειακών συγκολλήσεων. Ο άξονας της δέσμης μπορεί να είναι οριζόντιος ή κατακόρυφος, η συγκόλληση μπορεί να είναι σε δύο ή τρεις διαστάσεις και να διαπερνά τελείως ή όχι τα υλικά. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή της σύνδεσης πρέπει να καθορίζεται από την τελική χρήση, το πάχος και το σχήμα των υλικών. Αν η συγκόλληση γίνει με το ένα υλικό επάνω στο άλλο, η μηχανική αντίσταση της συγκόλλησης δεν είναι η καλύτερη δυνατή και υπάρχουν τάσεις αποκόλλησης. Η επίπεδη συγκόλληση είναι πρακτική και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για πάχη συγκόλλησης έως 10mm. Για μεγαλύτερα πάχη είναι προτιμότερη η κατακόρυφη συγκόλληση. Οι κυκλικές αξονικές συγκολλήσεις αν και είναι πρακτικές στη συγκόλληση αξόνων δημιουργούν προβλήματα γωνιακών αποκλίσεων και ραγισμάτων. Επομένως είναι προτιμότερες οι κυκλικές ακτινικές συγκολλήσεις. Τέλος, ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να είναι προτιμότερη η συνεχής ή η διακοπτόμενη συγκόλληση. Κλασσικό παράδειγμα είναι τα τμήματα του σκελετού του αυτοκινήτου. Η συνεχής συγκόλληση δίνει συμπαγή δομή η οποία δεν παρουσιάζει

ελαστικότητα κατά την σύγκρουση και είναι επικίνδυνη για τους επιβάτες. Αντίθετα, η διακοπτόμενη συγκόλληση προσφέρει την απαιτούμενη ελαστικότητα.

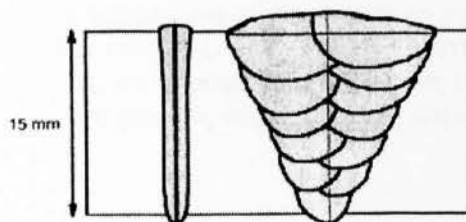


**Σχήμα 32.** Τύποι ένωσης, ραφής και συγκόλλησης

Άλλες παράμετροι των συνδέσεων που επηρεάζουν την συγκόλληση είναι το κενό μεταξύ των δύο υλικών και η ευθυγράμμιση τους πριν την συγκόλληση. Για συγκολλήσεις στο πλάι (butt welding), το κενό πρέπει πάντοτε να είναι μικρότερο από το  $1/10$  του πάχους του υλικού και σε κάθε περίπτωση μικρότερο από 1mm. Για συγκολλήσεις με το ένα υλικό επάνω στο άλλο (lap welding), το κενό δεν πρέπει να υπερβαίνει το  $1/5$  του πάχους των υλικών. Τέλος για συγκολλήσεις σε σχήμα ταφ, το κενό πρέπει να είναι μεγαλύτερο αλλά πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή γωνιακών αποκλίσεων στην συγκόλληση. Σε κάθε περίπτωση η ευθυγράμμιση των δύο υλικών πρέπει να είναι πολύ καλή με μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση  $1/3$  του πάχους των υλικών.

### 3.3.2 Ποιότητα συγκόλλησης με λέιζερ.

Γενικά, η ποιότητα της συγκόλλησης εξαρτάται από τη μεταλλουργική δομή της ένωσης και τις ατέλειες που περιέχει. Σε κάθε περίπτωση όμως, η ποιότητα της συγκόλλησης με λέιζερ παρουσιάζεται κατά πολύ ανώτερη από αυτή άλλων συμβατικών τεχνικών. Κύριες ιδιότητες της που έχουν ενδιαφέρον σε σχέση με τις εφαρμογές είναι η ελαστικότητα, η σκληρότητα, η αντοχή και η καλή αντίσταση στην κόπωση.



**Σχήμα 33.** Συγκόλληση με laser (αριστερά) και με κλασικό τρόπο (δεξιά).



Είναι χαρακτηριστικό ότι για τα περισσότερα μέταλλα, το υλικό στη συγκόλληση παρουσιάζει σκληρότητα μεγαλύτερη από αυτή των βασικών υλικών. Εκτός από την καλή ποιότητα της συγκόλλησης με λέιζερ και τις καλές ιδιότητες της ένωσης, υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα στη χρήση του λέιζερ στη συγκόλληση όπως:

- **στενή συγκόλληση**

Το φαινόμενο της κλειδαρότρυπας στη συγκόλληση έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση στενών συγκολλησεων. Ο λόγος βάθος συγκόλλησης πλάτος συγκόλλησης έχει αρκετά μεγάλες τιμές (περίπου 5 που φτάνει έως και 10) σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης όπως φαίνεται στο παράδειγμα στο σχήμα (42). Επιπλέον το πλάτος της περιοχής που επηρεάζεται από τη θερμότητα είναι πολύ στενό με αποτέλεσμα ελάχιστες παραμορφώσεις(π.χ. 10 φορές μικρότερο από αυτό στην συγκόλληση βολφραμίου).

- **παραγωγικότητα**

Η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης που επιτυγχάνεται με το λέιζερ, και η ευελιξία στη μεταφορά της δέσμης έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλους ρυθμούς παραγωγής. Αυτό συνεπάγεται κόστος παραγωγής συγκρίσιμο με άλλων μεθόδων παρόλο το μεγάλο κόστος επένδυσης του συστήματος.

- **ποιότητα και αναπαραγωγή**

Λόγω της σταθερότητας της ενέργειας του λέιζερ και το απόλυτο έλεγχο στην εστίαση και τη κατεύθυνση της δέσμης επιτυγχάνεται σταθερή ποιότητα και επαναληψιμότητα στη συγκόλληση. Επιπλέον η δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας βοηθά στον πλήρη έλεγχο των παραμέτρων της συγκόλλησης. Τέλος, η ικανότητα συγκόλλησης των διαφόρων υλικών παρουσιάζεται στον πίνακα 1 όπου όσο περισσότεροι σταυροί εμφανίζονται, τόσο μεγαλύτερη η ευκολία συγκόλλησης.

### **3.3.3 Ατέλειες στη συγκόλληση με λέιζερ.**

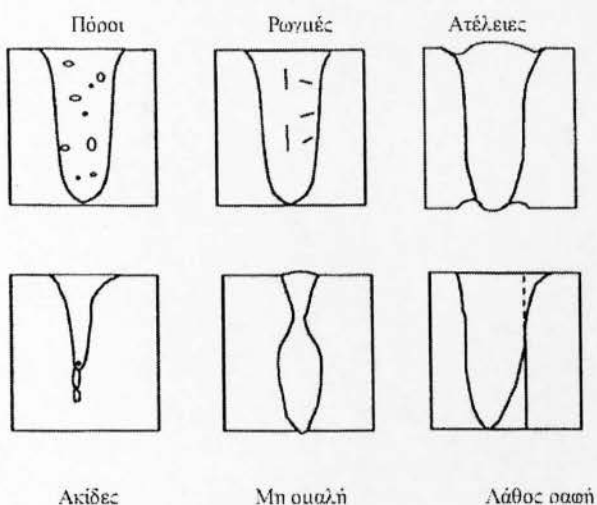
Οι ατέλειες στις συγκολλήσεις με λέιζερ κατατάσσονται κυρίως σε τρεις κατηγορίες: τις ρωγμές, τους πόρους και τις γεωμετρικές ανωμαλίες εσωτερικές ή εξωτερικές στη συγκόλληση (Σχ.43). Σχετικά με τα ραγίσματα, αυτά οφείλονται σε θερμικές τάσεις κατά την ψύξη των υλικών και εξαρτώνται κυρίως από το ρυθμό ψύξης και τη χημική σύσταση του υλικού. Επιπλέον επηρεάζονται από τη ταχύτητα και το σχήμα της συγκόλλησης. Οι μικρές ταχύτητες και οι ραφές συγκόλλησης ευθείας γραμμής οδηγούν σε δομές συγκόλλησης που αντέχουν τις τάσεις κατά τη στερεοποίηση.

Υλικό	CO <sub>2</sub> λέιζερ	Nd λέιζερ
Σίδηρος	+++	++
Κράματα αλουμινίου	+	++
Χαλκός	+	++
Κράματα νικελίου	++	++
Τιτάνιο	++	+++
Κράματα ζirkονίου	+	++
Χρυσός/άργυρος	-	+++

Πίνακας 1. Ικανότητα συγκόλλησης υλικών.

Η δημιουργία πόρων σχετίζεται με την παραμονή αερίου παγιδευμένου στο μέταλλο κατά την στερεοποίηση. Το αέριο αυτό μπορεί να προέρχεται είτε από κατάλοιπα της επιφάνεια όπως λάδια, νερό ή αλοιφές, είτε από αέρια που υπήρχαν στο αρχικό υλικό όπως O<sub>2</sub> και N<sub>2</sub> ή τέλος μέρος από το αέριο που υποβοηθά τη διαδικασία. Η ελαχιστοποίηση της δημιουργίας πόρων γίνεται εφικτή αφενός με προσεκτική προεπιλογή και προετοιμασία του υλικού και αφετέρου με κατασκευή συγκολλήσεων κωνικού σχήματος που βοηθούν απομάκρυνση των αερίων.

Τέλος, οι ανωμαλίες στη συγκόλληση σχετίζονται κυρίως με λάθη είτε στην επιλογή των παραμέτρων είτε στη διαδικασία συγκόλλησης. Στην περίπτωση που η δέσμη λέιζερ δεν είναι καλά ευθυγραμμισμένη με την ένωση, η διάχυση στη συγκόλληση είναι μονόπλευρη και επομένως η συγκόλληση κακής ποιότητας.



Σχήμα 34. Ατέλειες κατά τη συγκόλληση με laser.

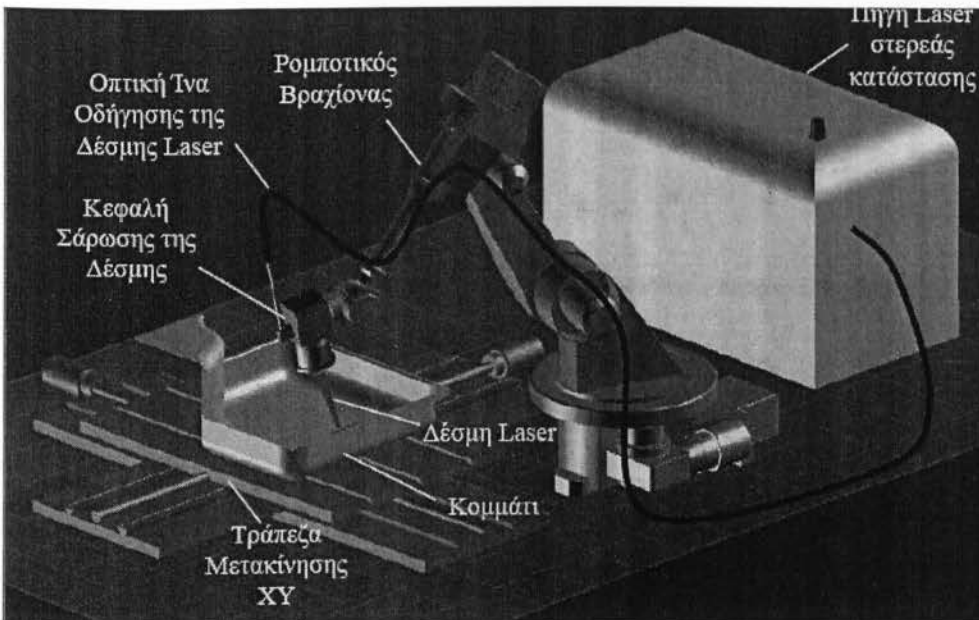
Αν κατά την έναρξη της συγκόλλησης η ενέργεια είναι ισχυρή εμφανίζονται ατέλειες (υπερυψώματα ή λακκούβες) γύρω από την ραφή οι οποίες στη συνέχεια πρέπει να επεξεργαστούν για να ξαναγίνει η επιφάνεια λεία. Αν η επιλογή της ενέργειας και της εστίασης δεν είναι σωστή, στο εσωτερικό της συγκόλλησης εμφανίζονται πόροι με μορφή ακίδων (spikes) οι οποίες ελαττώνουν το χρόνο ζωής σε σχέση με την κόπωση. Τέλος, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ανομοιομορφίες στο σχήμα και τα εξωτερικά τμήματα της συγκόλλησης οι οποίες ελαττώνουν την ποιότητα και την αντοχή της. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή των παραμέτρων της συγκόλλησης πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά ώστε όλες αυτές οι γεωμετρικές ανωμαλίες πρέπει να αποφεύγονται ή να ελαχιστοποιούνται.

### 3.3.4 Παραδείγματα συγκόλλησης με λέιζερ.

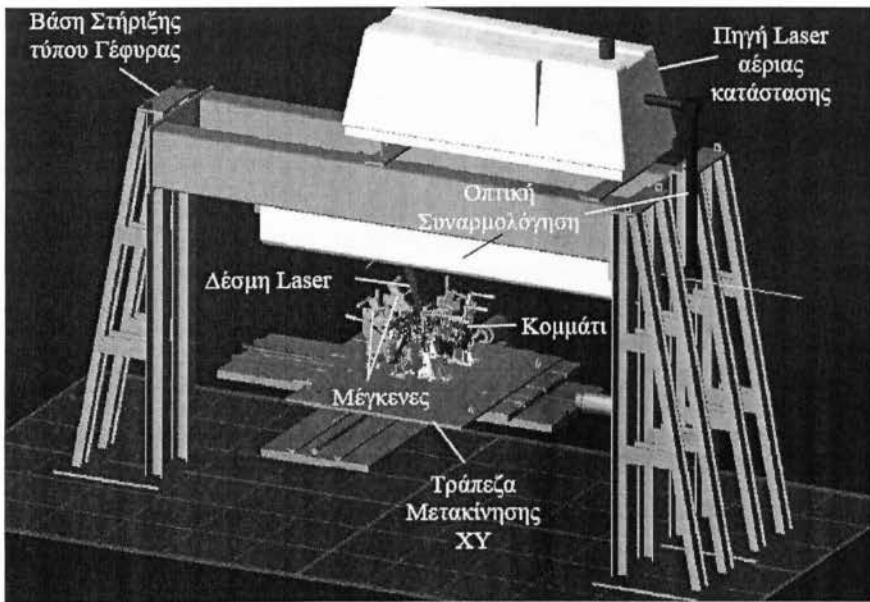
Οι εφαρμογές της συγκόλλησης με λέιζερ καλύπτουν σήμερα ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανιών και σχετίζονται με:

- αυτοκινητοβιομηχανία. Συστήματα μετάδοσης κίνησης (γρανάζια, πιστόνια), σκελετός αυτοκινήτου (συγκόλληση λαμαρίνας σκελετού, πόρτες, οροφές)
- συγκόλληση σκελετού οικιακών συσκευών όπως πλυντήρια
- συγκόλληση σκελετού πλοίων
- συγκόλληση τμημάτων των τεθωρακισμένων αρμάτων
- συγκόλληση ηλεκτρονικών σε συσκευές όπως τηλεοράσεις
- συγκόλληση σωλήνων μεγάλου πάχους
- συγκόλληση τμημάτων πυρηνικών αντιδραστήρων όπου απαιτείται μόνο οπτική επαφή

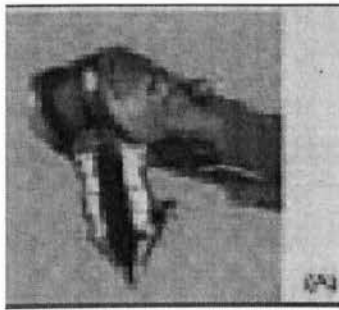
Μερικά παραδείγματα διατάξεων συγκόλλησης laser



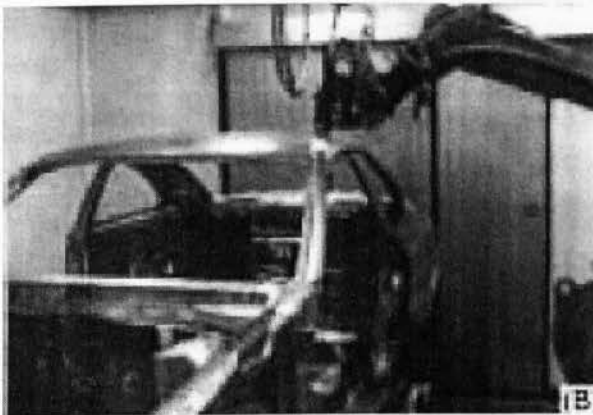
Εικόνα 37. Συγκόλληση με laser το οποίο έχει και ρομποτικό βραχίονα



Εικόνα 38. Laser συγκόλλησης τύπου γέφυρας



Εικόνα 39. Κεφαλή μηχανής laser συγκόλλησης και κοπής.



Εικόνα 40. Παράδειγμα εφαρμογής του LASER στην συγκόλληση της οροφής αυτοκινήτου.

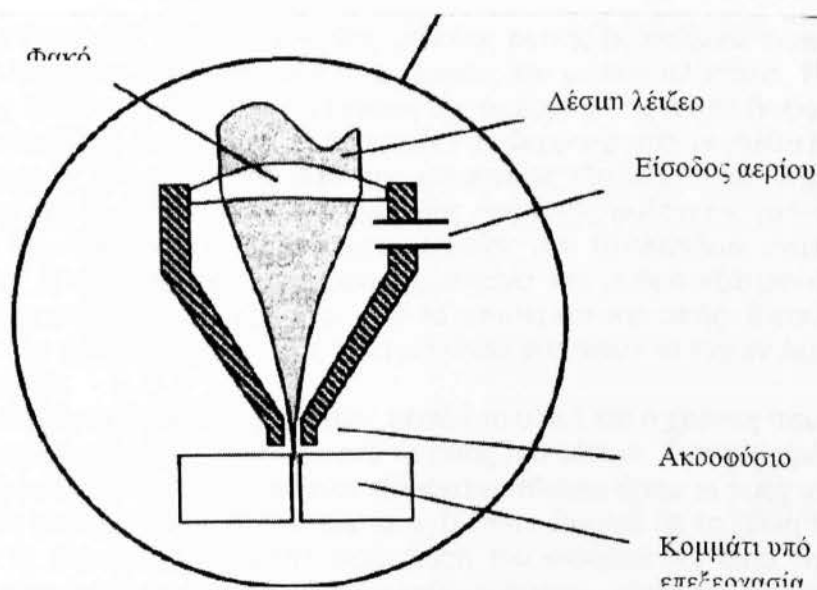
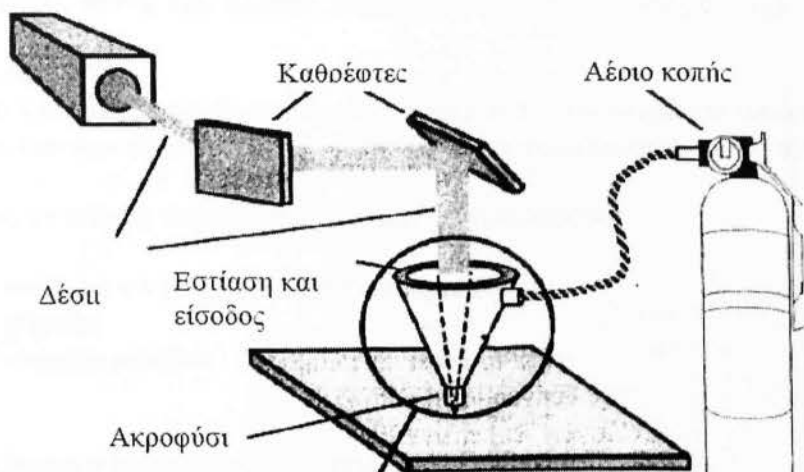
### 3.4 Κοπή

Η βιομηχανική κοπή με laser χρησιμοποιεί σχεδόν τα ίδια laser που χρησιμοποιούνται στη συγκόλληση. Στην κοπή, σκοπός είναι η γρηγορότερη εξάχνωση του υλικού για τη δημιουργία μιας ζώνης που επηρεάζεται από την θερμότητα. 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 μια λεπτή επίστρωση οξειδίου. Σε πολλές περιπτώσεις όπως για παράδειγμα 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 ή πλαστικό, είναι καλύτερο να αποφεύγεται η οξείδωση και χρησιμοποιείται και πάλι αδρανές αέριο. Η κοπή με laser είναι μια από τις πλέον διαδεδομένες εφαρμογές στην βιομηχανία. Τα πλεονεκτήματα της κοπής έναντι των συμβατικών μεθόδων είναι:

- Το πλάτος κοπής είναι πολύ μικρό που συνεπάγεται οικονομία υλικού. Οι άκρες είναι καλά τετραγωνισμένες, ομαλές και καθαρές γεγονός που αφενός αποτρέπει την ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας. Επιπλέον μπορεί να ακολουθήσει άμεσα συγκόλληση αν χρειαστεί. Τέλος η ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα είναι πολύ μικρή επομένως οι παραμορφώσεις του γειτονικού υλικού είναι ελάχιστες.
- Η διαδικασία είναι ταχύτατη με ελάχιστο θόρυβο, μπορεί εύκολα να αυτοματοποιηθεί, η επιλογή και η αλλαγή διεύθυνσης είναι πανεύκολη και δεν απαιτούνται επιπλέον εργαλεία.
- Απαιτείται μονό οπτική επαφή με το υλικό και σχεδόν όλα τα υλικά μπορούν να κοπούν με laser.

Όπως μπορούμε να δούμε στο παρακάτω σχήμα τα βασικά τμήματα της διάταξης είναι το laser, ένα οπτικό σύστημα καθοδήγησης-εστίασης της δέσμης και ένα σύστημα ελεγχόμενης μετακίνησης είτε της δέσμης είτε του δείγματος που είναι προς κοπή. Τα laser που κατά κόρων χρησιμοποιούνται στην κοπή είναι του διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub>, (αέριας κατάστασης laser) και το Nd (στερεάς κατάστασης) και λέιζερ διεγερμένων διμερών. Το σύστημα καθοδήγησης της δέσμης αποτελείται από κάτοπτρα υψηλής ανακλαστικότητας ή ειδικά για τα laser Nd μπορεί να είναι οπτική ίνα. Το σύστημα εστίασης αποτελείται είτε από διαπερατά οπτικά είτε από ανακλαστικά οπτικά.

Τα διαπερατά οπτικά είναι φακοί κουαρτς όταν χρησιμοποιούνται laser Nd και διεγερμένων διμερών και φακοί από ZnSe, GaAs ή CdTe για το CO<sub>2</sub> λέιζερ. Αντίστοιχα, τα ανακλαστικά οπτικά αποτελούνται από προβολικά κάτοπτρα. Η εστιασμένη δέσμη οδηγείται στο υλικό συνήθως ομοαξονικά με κάποιο αέριο. Ανάλογα με το υλικό υπό κοπή, το laser υπό χρήση και τη διαδικασία που ακολουθείται, το αέριο μπορεί να λειτουργεί είτε για ενίσχυση της διαδικασίας κοπής είτε για να αδρανοποιεί το υλικό που κόβεται.



Σχήμα 35. Αρχές λειτουργίας στην κοπή με laser.

Η ενίσχυση της διαδικασίας επιταχύνεται με αδρανές ή με ενεργό αέριο. Στην πρώτη περίπτωση το αέριο είναι πεπιεσμένο που μέσω της ισχυρής ροής του απομακρύνει το λειωμένο υλικό από το σημείο κοπής καθώς και τους ατμούς που δημιουργούνται. Ενισχύει αφενός την απορρόφηση και βοηθά αφετέρου την ευκολότερη είσοδο της δέσμης στα βαθύτερα στρώματα. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε ενεργό αέριο εφαρμόζεται σε μεταλλικά δείγματα όπως ο σίδηρος, η χρήση οξυγόνου έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση της θερμικής διαδικασίας και κατ' επέκταση της ταχύτητας κοπής λόγω της δημιουργούμενης εξώθερμης αντίδρασης. Η αδρανοποίηση του υλικού είναι επιθυμητή στα μεταλλικά αντικείμενα και σχετίζεται με τη ελαχιστοποίηση των οξειδώσεων. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται αργό ή άζωτο.

Τέλος η ροή αερίου σε κάθε περίπτωση λειτουργεί προστατευτικά για οπτικά εστίασης καθώς απομακρύνει από αυτά τους ατμούς και το πλάσμα.

Ανάλογα με το υπό κοπή υλικό και το laser που χρησιμοποιείται υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι κοπής των υλικών. Αυτές είναι κυρίως θερμικές όπως:

- Η εξάτμιση
- Το λιώσιμο σε συνδυασμό με απομάκρυνση του λιωμένου υλικού
- Το λιώσιμο σε συνδυασμό με καύση και απομάκρυνση του υλικού.

Επιπλέον, σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί:

- Η κοπή με σπάσιμο λόγω θερμικής τάσης
- Η χάραξη
- Η <<κρύα κοπή>>

Αναλυτικότερα η κάθε μέθοδος κοπής λειτουργεί ως εξής.

**Κοπή με εξάτμιση** :Είναι η συνήθεις μέθοδος κοπής με παλμικά laser και για υλικά που δεν λειώνουν όπως το ξύλο, ο άνθρακας και μερικά πλαστικά. Η βασική αρχή αυτής της διαδικασίας είναι ότι η ένταση της εισερχόμενης ακτινοβολίας είναι αρκετή ώστε η επιφάνεια του υλικού να θερμανθεί σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από το σημείο βρασμού. Επομένως το υλικό της επιφάνειας εξατμίζεται και δημιουργείται μια οπή (Keyhole κλειδαρότρυπα). Το μέγεθος της οπής αυξάνεται γρήγορα λόγω της αύξησης της απορρόφησης του υλικού εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων μέσα στην οπή. Η αύξηση της απορρόφησης αυξάνει τον ρυθμό εξάτμισης και το υλικό υπό μορφή ατμών απομακρύνεται από το εσωτερικό της οπής. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της απομάκρυνσης τους οι ατμοί σταθεροποιούν τα τυχόν λειωμένα γειτονικά τοιχώματα.

Ο ρυθμός διείσδυσης της δέσμης μέσα στο υλικό και ο χρόνος που απαιτείται για να προκληθεί εξάτμιση εξαρτάται από το είδος του υλικού. Τυπικές τιμές των δύο αυτών παραμέτρων εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα όπου οι τιμές αντιστοιχούν σε laser 2kW εστιασμένο σε ακτίνα διατομής 0,1mm. Σχετικά με τη ζώνη που επηρεάζεται από τη θερμότητα, για την περίπτωση του σιδήρου και κατά τη διάρκεια των 0,3μsec που απαιτούνται για να προκληθεί εξάτμιση, η αναπτυσσόμενη θερμότητα έχει εισχωρήσει σε περιοχή περίπου 2μm μόνο γύρω από το σημείο αλληλεπίδρασης.

Υλικό	Ρυθμός διείσδυσης (m/sec)	Χρόνος εξάτμισης (μsec)
Βολφράμιο	0.64	3
Αλουμίνιο	1.9	0.6
Σίδηρος	1	0.3
Τιτάνιο	1.1	0.09
Ανοξείδωτος χάλυβας	0.97	0.4

Πίνακας 2 .Ρυθμός διείσδυσης της δέσμης και χρόνος εξάτμισης διαφόρων υλικών

Η ποιότητα της κοπής εξαρτάται από το ποσοστό λειωμένου υλικού που δημιουργείται και το οποίο προκαλεί γραμμώσεις στην επιφάνεια του υλικού και στα τοιχώματα της κοπής. Επομένως είναι απαραίτητο η θερμοκρασία βρασμού να προσεγγίζει σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση αποφεύγονται και τα φαινόμενα τάσης στην επιφάνεια.

**Κοπή με λιώσιμο και απομάκρυνση:** Η ένταση ακτινοβολίας είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται για να προκληθεί εξάτμιση στο υλικό, η θερμοκρασία αυξάνεται έως το σημείο τήξης του υλικού και το υλικό που λιώνει απομακρύνεται από την τομή που προκαλεί το laser (cut kerf) με ισχυρή ροή αερίου. Επομένως η δέσμη του laser έρχεται συνεχώς σε επαφή με ένα υλικό και η διαδικασία λιώσιμο υλικού – απομάκρυνση υλικού συνεχίζεται μέχρι το υλικό να κοπεί. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι η χρήση πολύς μικρότερης ισχύος περίπου το ένα δέκατο, από αυτή που απαιτείται στην κοπή με εξάχνωση.

**Κοπή με λιώσιμο, καύση και απομάκρυνση:** Αν το αέριο που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του λειωμένου υλικού μπορεί να αλληλεπιδρά εξώθερμα με το υπό κοπή υλικό, μια επιπλέον ποσότητα θερμότητας προστίθεται στην όλη διαδικασία. Ειδικότερα αν το αέριο είναι καθαρό οξυγόνο ή μείγμα οξυγόνου, η ροή του στην τομή του υλικού δεν απομακρύνει απλώς το λειωμένο υλικό αλλά ταυτόχρονα υπάρχει αλληλεπίδραση και προκαλεί καύση. Η επιπλέον εκλυόμενη θερμότητα κάνει την κοπή περισσότερο αποδοτική και αυξάνει την ταχύτητα κοπής. Το ποσοστό που συμμετέχει η διαδικασία καύσης στην συνολική ποσότητα θερμότητας που παρέχεται στην κοπή του υλικού εξαρτάται από το είδος του υλικού. Σαν παράδειγμα υπάρχει 40% και 80% ενεργειακή συμμετοχή της καύσης στην κοπή του σιδήρου και τιτανίου αντίστοιχα, που συνεπάγεται τουλάχιστον διπλασιασμό της ταχύτητας κοπής.

Το μειονέκτημα το οποίο μπορεί να παρουσιαστεί κατά την παραπάνω διαδικασία κοπής είναι οι πιθανές χημικές αλλαγές του υλικού κυρίως λόγω οξειδωσης. Σε μερικά υλικά όπως ο σίδηρος δεν δημιουργούνται προβλήματα από την οξειδωση εκτός από την ύπαρξη μικρού στρώματος οξειδίου στην επιφάνεια. Σε άλλα υλικά όπως το τιτάνιο, η ύπαρξη οξειδίου στην επιφάνεια του έχει σαν αποτέλεσμα την σκλήρυνση του υλικού και την ευκολότερη θραύση του.

**Κοπή με θραύση λόγω θερμικής τάσης :** Αν σε ένα εύθραυστο υλικό με ευπάθεια σε θερμική θραύση δημιουργηθεί ένα ράγισμα με laser το ράγισμα αυτό μπορεί να κινηθεί με τη βοήθεια του laser σε καθορισμένη διεύθυνση και το υλικό να κοπεί. Το αρχικό ράγισμα καθώς και η κίνηση του ραγίσματος βασίζονται στη διαστολή του τμήματος του υλικού που θερμαίνεται λόγω απορρόφησης της ακτινοβολίας του laser. Η διαστολή δημιουργεί τάσεις στην γύρω περιοχή που προκαλούν την θραύση του υλικού. Η ταχύτητα κίνησης της ρωγμής στο υλικό εξαρτάται από το υλικό όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα όπου παραθέτουμε τον ρυθμό διαχωρισμού κατά την κοπή με θραύση.

Υλικό	Πάχος (mm)	Παρεχόμενη ισχύς (W)	Ρυθμός διαχωρισμού (m/sec)
-------	------------	----------------------	----------------------------



Γυαλί	0.7 1	7 16	0.3 0.08
Γυαλί με Na, Ca	1	10	0.3
Ζαφείρι	1.2	12	0.08
Κουάρτζ	0.8	3	0.61

Πίνακας 3. Ρυθμός διαχωρισμού κατά την κοπή θραύσης.

Η κοπή με θραύση παρουσιάζει θαυμάσια αποτελέσματα σε διάφορα είδη γυαλιού όπου η ακρίβεια κοπής και η ποιότητα των άκρων είναι πολύ καλή κυρίως για κοπές σε ευθεία γραμμή. Πρόβλημα παρουσιάζεται μόνο στις κοπές κυρτών σχημάτων και σχετίζεται με το κλείσιμο του σχήματος.

**Κοπή με χάραξη :** Αν σε μια περιοχή ενός υλικού δημιουργηθεί με χρήση laser είτε μια σειρά από τρύπες είτε μια αυλακιά, η περιοχή αυτή θα παρουσιάσει εξασθένηση και θα υπάρχει αυξημένη δυνατότητα μηχανικής θραύσης του υλικού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για κοπή λεπτών φύλλων πυριτίου και αλουμινίου και η ποιότητα κοπής εξαρτάται αφενός από την ύπαρξη η όχι υπολειμμάτων και το μέγεθος της ζώνης του υλικού που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία. Επομένως κατά την κοπή με χάραξη πρέπει να αποφεύγεται η χρήση ισχυρής έντασης ακτινοβολίας.

**Κρύα κοπή:** Η χρήση φωτονίων μεγάλης ενέργειας (π.χ. υπεριώδη φωτόνια από λέιζερ διεγερμένων διμερών) έχει σαν αποτέλεσμα την διάσπαση των χημικών δεσμών σε οργανικά υλικά καθώς η ενέργεια ανά φωτόνιο υπερβαίνει την ενέργεια του δεσμού. Επομένως, αν οργανικά υλικά όπως πλαστικά ακτινοβοληθούν με λέιζερ διεγερμένων διμερών, το υλικό αποδομείται χημικά και απομακρύνεται χωρίς να αυξηθεί τοπικά η θερμοκρασία. Έτσι επιτυγχάνεται «κρύα κοπή» καλής ποιότητας με λεία επιφάνεια κοπής χωρίς καταστροφή στις άκρες.

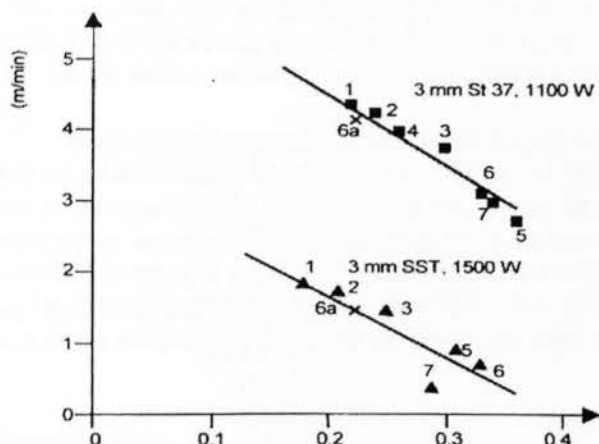
### 3.4.1 Βασικές παράμετροι κοπής με laser.

Υπάρχουν πολλοί παράμετροι που επηρεάζουν την κοπή με laser και η επίδραση κάθε μιας από αυτές εξαρτάται αφενός από το υπό κοπή υλικό και αφετέρου από τη διαδικασία που ακολουθείται.

- **Ιδιότητες δέσμης laser.**

Οι ιδιότητες της δέσμης που επηρεάζουν την κοπή είναι η διατομή της δέσμης στο σημείο εστίασης και το σημείο αλληλεπίδρασης (αν είναι διαφορετικά), η ισχύς, η πόλωση και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Κατ' αρχάς το μέγεθος της διατομής της δέσμης επηρεάζει διπλά την κοπή καθώς μια μικρή διατομή π.χ.0,1mm συνεπά-

γεται αφενός μεγάλη ένταση ακτινοβολίας που επιτρέπει μεγάλες ταχύτητες κοπής και αφετέρου προκαλεί κοπές ακριβείας. Επιπλέον η ποιότητα της κοπής επηρεάζεται αρκετά και από το ρυθμό ταλάντωσης του laser (mode). Η κοπή για παράδειγμα με laser TEM00 είναι άριστης ποιότητας αλλά ακόμα και laser που λειτουργούν σε ανώτερους ρυθμούς ταλάντωσης επιτρέπουν ποιότητας κοπής τουλάχιστον συγκρίσιμη με αυτήν από πλάσμα. Σχετικά με την ισχύ της ακτινοβολίας, αυτή επηρεάζει και την ταχύτητα κοπής και το είδος της που ακολουθείται.



**Σχήμα 36.** Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε την ταχύτητα κοπής σε σχέση με την διάμετρο κοπής που ζητάμε ,σε δυο laser διαφορετικής ισχύος.

Η πόλωση της δέσμης επηρεάζει την κοπή κυρίως λόγω της επίδρασης της στην απορρόφηση του υλικού. Είναι γνωστό ότι οι δέσμες με επίπεδο πόλωσης κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης (s-πόλωση) υφίστανται μεγαλύτερη ανάκλαση ενώ δέσμες πολωμένες παράλληλα στο επίπεδο πρόσπτωσης (p-πόλωσης) υφίστανται μεγαλύτερη απορρόφηση. Επομένως κατά την κοπή είναι προτιμότερο η δέσμη να είναι πολωμένη παράλληλα στο επίπεδο πρόσπτωσης. Όμως επειδή πολλές φορές είναι δύσκολο να ελεγχθεί και να διατηρηθεί η γραμμική πόλωση της δέσμης, η επιλογή μιας κυκλικής πόλωσης είναι αποδοτικότερη.

Τέλος το μήκος κύματος της ακτινοβολίας επηρεάζει επίσης διπλά την κοπή. Μικρά μήκη κύματος ευνοούν αφενός την ισχυρή εστίαση και αφετέρου την απορρόφηση της ακτινοβολίας, ειδικά για της μεταλλικές επιφάνειες. Όμως σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ότι υπάρχει εξάρτηση της τελικής εστίασης και από άλλους παράγοντες όπως είναι η απορρόφησης από το είδος του υλικού και το δημιουργούμενο πλάσμα, από τους ατμούς και από τα οξείδια.

- **Ιδιότητες συστήματος μεταφοράς και εστίασης της δέσμης.**

Η ταχύτητα κοπής πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά και με κριτήρια την καλή ποιότητα κοπής και την απουσία οξειδίων και τραχύτητας στην επιφάνεια. Για να γίνει αυτό εφικτό πρέπει να υπάρξει μια εξισορρόπηση μεταξύ της εισερχόμενης ισχύος και της ταχύτητας κοπής λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη το πάχος του υλικού. Σαν παρά-

δειγμα κατά την κοπή σιδήρου υπό σταθερή ισχύ η μικρή ταχύτητα κοπής δημιουργεί αρκετή τραχύτητα στην επιφάνεια ενώ σε πολύ μεγάλη ταχύτητα εμφανίζονται οξειδία καθώς η ενέργεια που προσφέρεται στο σύστημα δεν είναι αρκετή. Για τη εστίαση της δέσμης στις διαδικασίες κοπής συνήθως χρησιμοποιείται φακός που επιτρέπει ισχυρότερη εστίαση και μικρότερες διατομές της δέσμης στο σημείο εστίασης.

Παράμετροι που επηρεάζουν την κοπή είναι η εστιακή απόσταση του φακού καθώς και η θέση του εστιακού επιπέδου σε σχέση με την επιφάνεια. Η εστιακή απόσταση του φακού επηρεάζει διπλά την κοπή καθώς καθορίζει αφενός τη διατομή της δέσμης στο σημείο εστίασης και αφετέρου το βάθος εστίασης (περιοχή στη διαδρομή της δέσμης όπου η ένταση ακτινοβολίας διατηρεί μεγάλη τιμή). Σαν παράδειγμα, φακός μικρής εστιακής απόστασης προκαλεί μικρή διατομή της δέσμης στο σημείο εστίασης αλλά και μικρό βάθος εστίασης, επομένως είναι καλός για την κοπή υλικών μικρού πάχους.

Αντίθετα στα υλικά μεγαλύτερου πάχους, το βάθος εστίασης πρέπει να αυξηθεί και απαιτείται φακός μεγαλύτερης εστιακής απόστασης. Η θέση της εστίασης σε σχέση με την επιφάνεια επηρεάζει την ποιότητα κοπής, όμως δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας που πρέπει να ακολουθείται και πρέπει να γίνονται προκαταρκτικές δοκιμές για όλα τα υλικά. Συνήθως η εστίαση γίνεται προς το εσωτερικό του υλικού και το ακριβές βάθος εξαρτάται από το υλικό και το πάχος. Σαν παράδειγμα στην περίπτωση του σιδήρου η θέση εστίασης επιλέγεται σε βάθος μεταξύ του 1/3 και 1/2 του πάχους του υλικού.

#### • Ιδιότητες αερίου.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η χρήση του αερίου σχετίζεται γενικά με την απομάκρυνση του λειωμένου υλικού, των ατμών και του πλάσματος. Επομένως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αερίου τόσο ταχύτερη γίνεται αυτή η απομάκρυνση και η αλληλεπίδραση του laser με το υλικό. Αντίθετα σε μικρές ταχύτητες όπου η απομάκρυνση του υλικού είναι αργή υπάρχει αυξημένη παραγωγή οξειδίων. Η καλή ευθυγράμμιση της δέσμης του laser με την δέσμη αερίου βοηθά και βελτιώνει σημαντικά την κοπή με ελάχιστη τραχύτητα και ελάχιστη παραγωγή οξειδίων. Ταυτόχρονα η απόσταση του ακροφύσιου από την επιφάνεια του υλικού πρέπει να είναι σχετικά μικρή περίπου 1mm καθώς σε μεγαλύτερες αποστάσεις δημιουργούνται στροβιλισμοί και μεγάλες ανομοιομορφίες στην πίεση που λειτουργούν αρνητικά στη διαδικασία της κοπής. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται οξυγόνο (η μείγμα που περιέχει οξυγόνο) σαν επιπλέον πηγή θερμότητας, η πίεση του αερίου καθορίζει την περιοχή της επιφάνειας που επηρεάζεται από τη θερμότητα. Επιπλέον μεγάλη πίεση οξυγόνου μπορεί να αυξήσει την τραχύτητα της επιφάνειας λόγω μεγάλης καύσης.

#### • Ιδιότητες του υλικού.

Οι οπτικές και θερμικές ιδιότητες του υπό κοπή υλικού παίζουν ουσιαστικότερο ρόλο στην απόδοση και την ποιότητα της κοπής. Για παράδειγμα, η απορρόφηση ή η ανάκλαση του υλικού καθορίζει το ποσοστό της εισερχόμενης ενέργειας που θα συμμετέχει στη διαδικασία κοπής όμως η ακριβής τιμή της απορρόφησης εξαρτάται και από τα δημιουργούμενα οξειδία και το πλάσμα. Ταυτόχρονα το σημείο τήξεως, το σημείο βρασμού, η ειδική θερμότητα και η σταθερά διάχυσης της θερμότητας του υλικού καθορίζουν την εξέλιξη της διαδικασίας κοπής. Σε κάθε περίπτωση τα βασικά σημεία προσοχής είναι: η απορροφημένη ισχύς να είναι αρκετή για να προκληθεί η διαδικασία κοπής και ταυτόχρονα η ισχύς αυτή να μην καταστρέφει το υλικό.

### 3.4.2 Ποιότητα κοπής.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό των τομών από θερμική κοπή με λέιζερ είναι η ύπαρξη γραμμώσεων στην τομή. Πολλά μοντέλα έχουν προταθεί για να εξηγηθεί η ύπαρξη τους όμως δεν είναι ακόμα γνωστός ο ακριβής μηχανισμός της δημιουργίας τους. Σε κάθε περίπτωση όμως η δομή των γραμμώσεων σχετίζεται στενά με την ποιότητα κοπής, την τραχύτητα της επιφάνειας και την ύπαρξη οξειδίων. Η τραχύτητα της τομής είναι συνήθως ελάχιστη κυρίως για υλικά μικρού πάχους. Για παράδειγμα, στο σίδηρο η τραχύτητα κυμαίνεται από 20μm έως 60μm για πάχος υλικού 1mm έως 8mm αντίστοιχα. Γενικά, για υλικά πάχους λίγων mm η τραχύτητα δεν υπερβαίνει τα 20μm. Όμως παρουσιάζεται αρκετά ενισχυμένη κατά την κοπή με συνεχές λέιζερ παρουσία οξυγόνου. Σχετικά με την περιοχή του υλικού που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, αυτή εξαρτάται από το υλικό και την ισχύ της εισερχόμενης ακτινοβολίας.

υλικό	Δυνατότητα κοπής	πάχος (mm)	Ταχύτητα κοπής για πάχος 2 mm (m/min)
Σίδηρος	+++++	<15	6
Ατσάλι	++++	<10	5
Αλουμίνιο	++	<6	3.5
Τιτάνιο	+++	<10	8
Νικέλιο	++	<3	2
Χαλκός	+	<3	0.5
Κεραμικά	+++++	<5	-
Ακρυλικά	+++++	<25	5
Νάυλον	+++++	<20	-
Ξύλο	++++	<25	2
Γυαλί	++++	<5	2
Λάστιχο	+++	<5	3.5
Δέρμα	+++++	<12	-
Χαρτί	+++++	<6	25

Πίνακας 4. Το θετικό πρόσημο(+) χαρακτηρίζει την ποιότητα κοπής.

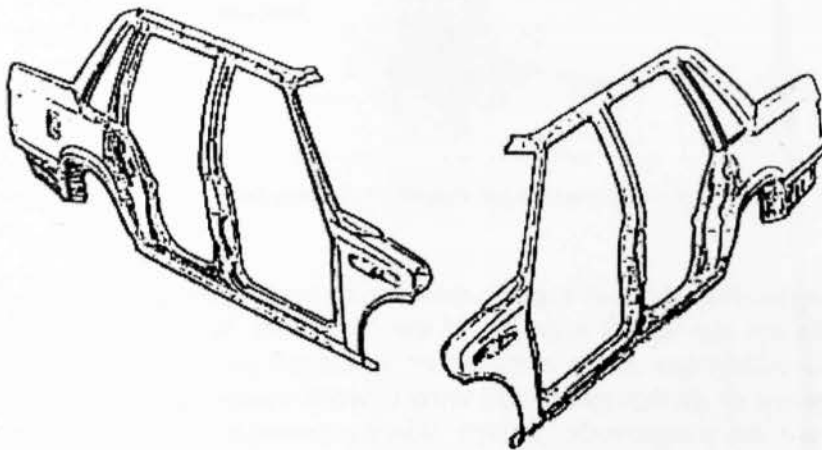
Γενικά όμως είναι σχετικά μικρή (για τον σίδηρο είναι έως 0.25mm). Τέλος, σχετικά με τις δυνατότητες του λέιζερ σε κοπή διαφόρων υλικών, στο πίνακα 4 παρουσιάζεται μία σειρά αποτελεσμάτων κοπής από λέιζερ CO<sub>2</sub> όπου όσο περισσότεροι σταυροί υπάρχουν σε ένα υλικό τόσο ευκολότερα κόβεται με λέιζερ. Όπως φαίνεται σχεδόν όλα τα υλικά κόβονται με το λέιζερ με πολύ καλή έως ικανοποιητική απόδοση.

### 3.4.3 Παραδείγματα κοπής με δέσμη laser.

Τα παραδείγματα κοπής με λέιζερ είναι πάρα πολλά καθώς όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η κοπή αποτελεί την κυριότερη βιομηχανική εφαρμογή των λέιζερ. Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζεται στην ανάπτυξη μονάδων κοπής με λέιζερ είναι συνήθως το μεγάλο κόστος των μηχανημάτων δηλαδή του λέιζερ. Όμως, η ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός κύκλου παραγωγής, η ποιότητα κοπής που επιτυγχάνεται και η δυνατότητα κοπής σε μη φιλικά περιβάλλοντα αποτελούν τα μεγάλα πλεονεκτήματα που οδήγησαν την κοπή με λέιζερ σε μεγάλη ανάπτυξη.

Μερικές από τις κυριότερες εφαρμογές κοπής με λέιζερ είναι:

- Κοπή σωλήνων κουάρτς για την κατασκευή λαμπών αλογόνου για τα αυτοκίνητα. Τα οφέλη της χρήσης λέιζερ είναι αφενός η μεγάλη εξοικονόμηση υλικού, 4m σωλήνα σε μία ώρα κοπής, και αφετέρου η ελαχιστοποίηση ατμών και σκόνης που σε συμβατικές τεχνικές απαιτούν τεράστια συστήματα εξαερισμού.
- Κοπή υφασμάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία όπως μοκέτες δαπέδου, καλύμματα καθισμάτων.
- κοπή ραδιενεργών υλικών τα οποία βρίσκονται σε απομονωμένο μέρος και η απαιτούμενη πρόσβαση είναι μόνο οπτική.
- κοπή πλαστικών όπου όμως απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή λόγω των αναθυμιάσεων
- κοπή τρισδιάστατων κομματιών από ατσάλι και κραμάτων τιτανίου στην βιομηχανία αεροπλάνων όπου η οικονομία σε ανθρωποώρες είναι τεράστια.



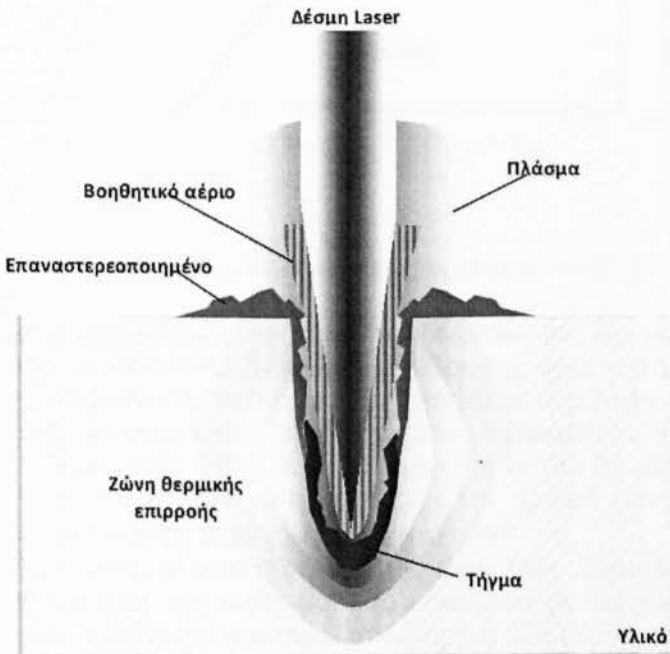
Σχήμα 37. Κοπή τμημάτων αυτοκινήτου με δέσμη laser.

- κοπή σκληρών και εύθραυστων κεραμικών όπως SiN με ταχύτητα κοπής 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή με διαμάντι.
- κοπή κραμάτων αλουμινίου με εξοικονόμηση 60-70% σε κόστος.

- κοπή μεταλλικών κομματιών αυτοκινήτων με μεγάλη εξοικονόμηση σε κόστος και χρόνο σχήμα 46.

### 3.5 Διάτρηση

Η διάτρηση με τη χρήση laser είναι εξίσου διαδεδομένη όσο και δυο προαναφερόμενες χρήσεις του, και μια από τις πρώτες ιδιότητες που εφαρμόστηκαν στην βιομηχανία καθώς για ιστορικούς λόγους θα αναφέρουμε ότι το 1965 είχε πραγματοποιηθεί διάνοιξη μιας μήτρα αδάμαντα με ένα laser ρουβινίου, για εκφυλισμό συρμάτων, σε περίπου το ένα εκατοστό του χρόνου που χρειαζόταν με τα κλασσικά μέσα της εποχής.

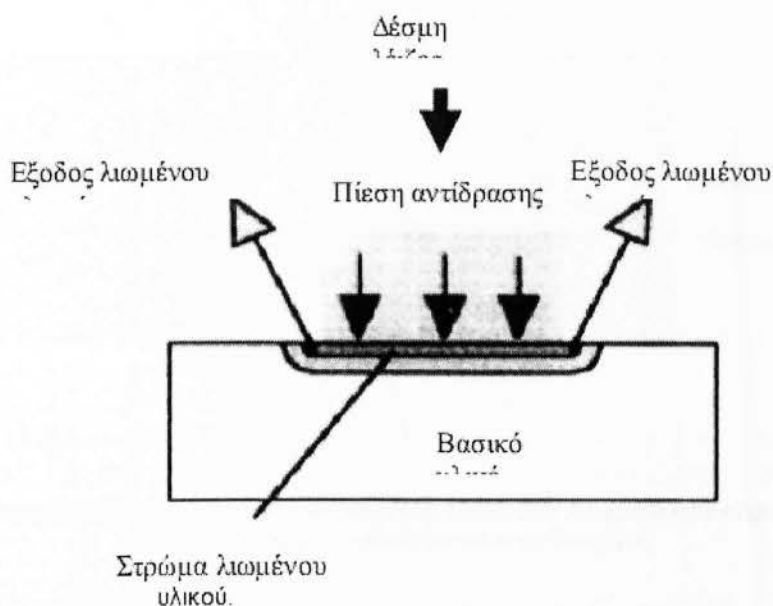


Εικόνα 41. Σχηματική απεικόνιση διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser

Κύριοι κλάδοι που χρησιμοποιούν κατά κόρων laser για διάτρηση υλικών σήμερα είναι για παράδειγμα χαρτιού, πλαστικού και λαστιχένιων θηλών για παιδικά μπουκάλια, ακροφύσια για μεταλλικά δοχεία με πεπιεσμένο αέρα, κεραμικών και γυαλιών καθώς και εξαρτήματα κραμάτων τιτανίου στην βαριά βιομηχανία τα οποία χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροτουρμπινών, την αεροδιαστημική και την μικροηλεκτρονική. Οι βασικές αρχές της διάτρησης είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές τις κοπής και της κόλλησης. Γενικά είναι μια τεχνική με την οποία είναι δυνατόν να διανοιχθούν οπές με μεγάλη ακρίβεια επανάληψης, με πολύ γρήγορους ρυθμούς, συχνά σε υλικά που είναι δύσκολα να επεξεργαστούν με τους κλασσικούς τρόπους.

Συγκεκριμένα η δέσμη του laser εστιαζόμενη παράγει ισχυρές εντάσεις ακτινοβολίας οι οποίες στην επιφάνεια ενός υλικού προκαλούν έντονα θερμικά φαινόμενα. Αν η ένταση της ακτινοβολίας είναι αρκετή, το υλικό θα λειώσει και θα αρχίσει να εξατμί-

ζεται ενώ ταυτόχρονα, οι δημιουργούμενοι ατμοί αυξάνουν την απορρόφηση του υλικού και ενισχύουν την διαδικασία.



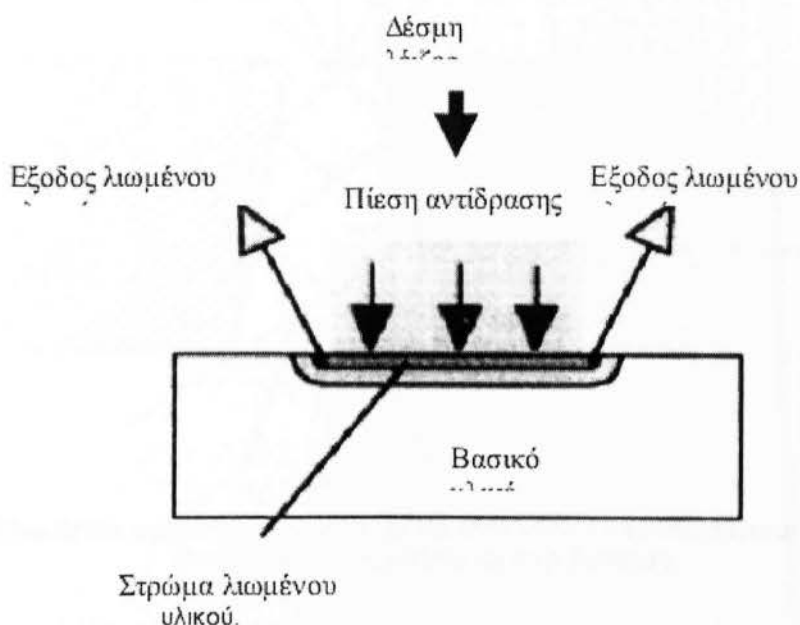
Σχήμα 38. Διαδικασία διάτρησης με laser

Μέρος του υλικού απομακρύνεται λόγω είτε εξάτμισης του είτε εκδίωξης του λειωμένου υλικού προς τα έξω λόγω δυνάμεων αντίδρασης στην εξάτμιση της επιφάνειας καθώς επίσης και λόγω του πεπιεσμένου βοηθητικού αερίου το οποίο ρέει ομοαξονικά με την δέσμη του laser και με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται η οπή. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία οπής μέσα στο υλικό η οποία θα αυξάνει είτε με το χρόνο αλληλεπίδρασης για τα συνεχή laser είτε με τον αριθμό των παλμών για τα παλμικά laser έως ότου υπάρξει διαμπερή οπή στο υλικό.

Όπως και με την κοπή, οι πλευρές της οπής είναι λείες λόγω των φαινομένων κυματοδήγησης στις πλευρές της οπής αυτό το επισημάναμε και παραπάνω με το σχήμα το οποίο θα παραθέσουμε και παρακάτω (σχήμα 39) για να καταλάβουμε καλύτερα τι ακριβώς συμβαίνει στα τοιχώματα του υλικού προς διάτρηση. Αυτό είναι πολύ εμφανές στην διάτρηση γυαλιού όπου μπορεί να επιτευχθεί λόγος βάθους προς διάμετρο οπής ίσο με 25 ενώ για μέταλλα φτάνει το ανώτερο 12.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η λειτουργία του laser, για την διάτρηση υλικών πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού είναι πάνω από το σημείο βρασμού. Με απλές σκέψεις προκύπτει ότι για ένα δεδομένο ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στην 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 ένας μεγαλύτερος όγκος υλικού σε μικρότερη θερμοκρασία. Άρα συμπεραίνουμε ότι τα παλμικά laser προτιμούνται έναντι των συνεχόμενων laser (cw).

ζεται ενώ ταυτόχρονα, οι δημιουργούμενοι ατμοί αυξάνουν την απορρόφηση του υλικού και ενισχύουν την διαδικασία.



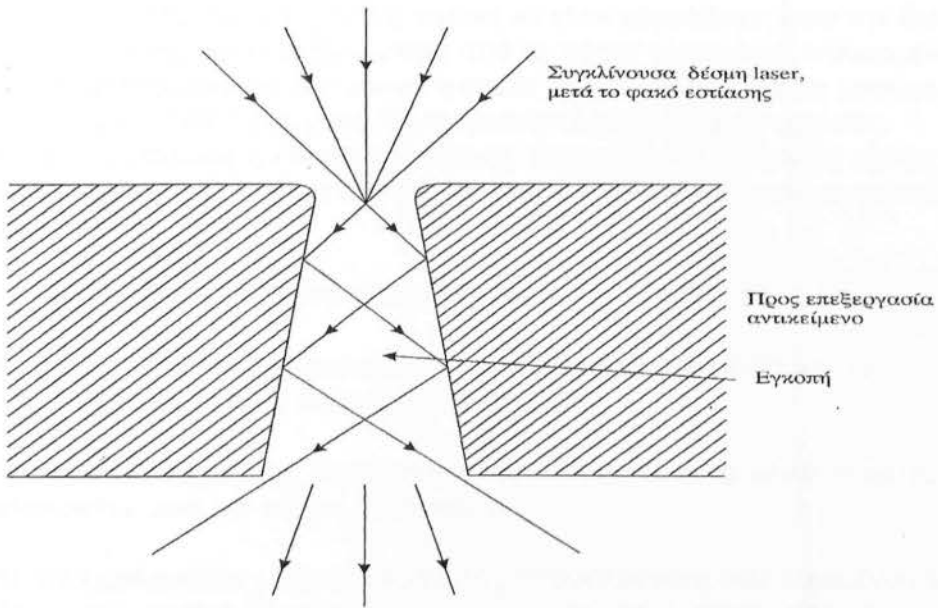
Σχήμα 38. Διαδικασία διάτρησης με laser

Μέρος του υλικού απομακρύνεται λόγω είτε εξάτμισης του είτε εκδίωξης του λειωμένου υλικού προς τα έξω λόγω δυνάμεων αντίδρασης στην εξάτμιση της επιφάνειας καθώς επίσης και λόγω του πεπιεσμένου βοηθητικού αερίου το οποίο ρέει ομοαξονικά με την δέσμη του laser και με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται η οπή. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η δημιουργία οπής μέσα στο υλικό η οποία θα αυξάνει είτε με το χρόνο αλληλεπίδρασης για τα συνεχή laser είτε με τον αριθμό των παλμών για τα παλμικά laser έως ότου υπάρξει διαμπερή οπή στο υλικό.

Όπως και με την κοπή, οι πλευρές της οπής είναι λείες λόγω των φαινομένων κυματοδήγηση στις πλευρές της οπής αυτό το επισημάνουμε και παραπάνω με το σχήμα το οποίο θα παραθέσουμε και παρακάτω (σχήμα 39) για να καταλάβουμε καλύτερα τι ακριβώς συμβαίνει στα τοιχώματα του υλικού προς διάτρηση. Αυτό είναι πολύ εμφανές στην διάτρηση γυαλιού όπου μπορεί να επιτευχθεί λόγος βάθους προς διάμετρο οπής ίσο με 25 ενώ για μέταλλα φτάνει το ανώτερο 12.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η λειτουργία του laser, για την διάτρηση υλικών πρέπει να είναι τέτοια, ώστε η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού είναι πάνω από το σημείο βρασμού. Με απλές σκέψεις προκύπτει ότι για ένα δεδομένο ποσό θερμότητας που μεταφέρεται στην 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 ένας μεγαλύτερος όγκος υλικού σε μικρότερη θερμοκρασία. Άρα συμπεραίνουμε ότι τα παλμικά laser προτιμούνται έναντι των συνεχόμενων laser (cw).

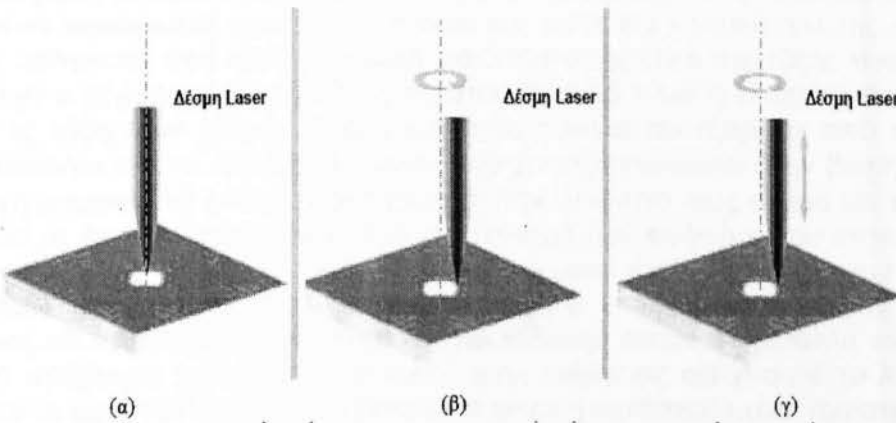




**Σχήμα 39.** Είναι το ίδιο σχήμα που παραθέτουμε και στην κοπή. Το χρησιμοποιούμε και εδώ, διότι το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται και στην διάτρηση

Η διεργασία διάτρηση με δέσμη laser μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με την σχετική κίνηση της δέσμης ως προς το υπό κατεργασία υλικό ως εξής.

- Κρουστική διάτρηση (percussion Laser drilling)
- Διάτρηση μέσω κοπής (trepanning Laser drilling)
- Ελικοειδή διάτρηση (helical Laser drilling)



**Εικόνα 42.** Διάφορες τεχνικές διάτρησης. Α)κρουστική διάτρηση Β)διάτρηση μέσω κοπής Γ)ελικοειδής διάτρηση.

Στην περίπτωση της κρουστικής διάτρησης η δέσμη παραμένει στατική επάνω από το υλικό και προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού συνεχόμενα ή παλμικά και η αφαίρεση του τηγμένου υλικού επιτυγχάνεται με την βοήθεια του βοηθητικού αερίου.

Η δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει την κίνηση της δέσμης στην περιφέρεια της οπής και κατά συνέπεια την κοπή του υλικού για τον σχηματισμό της οπής. Σε αυτή

την περίπτωση, η διάμετρος της οπής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο της δέσμης και επίσης αρκετά μεγαλύτερη από το πάχος του υλικού, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του υλικού η οποία θα οδηγούσε στην μη επιτυχή κοπή της οπής. Επίσης με αυτή την τεχνική δημιουργούνται μόνο διαμπερείς οπές.

Στην τρίτη περίπτωση η κίνηση της δέσμης είναι ελικοειδής, δηλαδή καθώς κινείται στην περιφέρεια της οπής ταυτόχρονα κινείται και κάθετα ως προς το επίπεδο κατεργασίας.

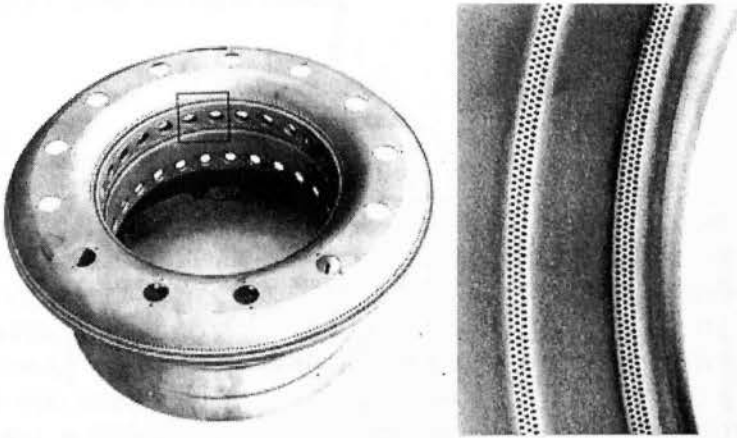
Για τον έλεγχο της διαδικασίας διάτρησης με laser έχουν αναπτυχθεί τρεις μέθοδοι :

- Η παρακολούθηση της ανάκλασης του laser από την επιφάνεια του υλικού η οποία μηδενίζεται μετά την πλήρη διαπέραση
- Η παρακολούθηση της διαπέρασης της δέσμης από το υλικό η οποία μεγιστοποιείται μετά την πλήρη διαπέραση
- Η παρακολούθηση μέσω κάμερας της απομάκρυνσης του λειωμένου υλικού (λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας του είναι το πιο φωτεινό μέρος του υλικού) η οποία μηδενίζεται μετά την πλήρη διαπέραση.

Σε κάθε περίπτωση, είναι χρήσιμο να γίνεται από προηγούμενα βαθμονόμηση του αριθμού των παλμών ή του χρόνου αλληλεπίδρασης που απαιτείται για την πλήρη διάτρηση του υλικού.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της διάτρησης με laser είναι η δυνατότητα του να παράγει οπές κάθε σχήματος και σε κάθε γωνία σε σχέση με το δείγμα καθώς επίσης ότι η επεξεργασία 'δύσκολων υλικών' όπως είναι τα κεραμικά τα σύνθετα υλικά καθώς και υπερκράματα εύκολα πλέον επεξεργάζονται κάτι που δεν μπορούσε να γίνει με τις συμβατικές διαδικασίες διάτρησης λόγω της μεγάλης φθοράς των εργαλείων. Φυσικά στη διάτρηση με laser όπως και σε όλες τις άλλες βιομηχανικές εφαρμογές υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί σχετικά με τα όρια της οπής και τη ποιότητα της. Το μέγιστο βάθος διάτρησης που επιτρέπει καλή ποιότητα οπής είναι της τάξης των 10mm. Αντίστοιχα ο μέγιστος λόγος βάθους /πλάτους είναι 15:1 και η ελάχιστη διατομή οπής είναι της τάξης των 100μm αλλά η τελευταία ποικίλει και εξαρτάτε από το laser και την ικανότητα του να εστιάζει. Τα laser που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική παραγωγή μπορούν να φτάσουν διατηρώντας την ποιότητα τους ακόμα και τις 100οπές /second με βασική προϋπόθεση των συντονισμό των κινήσεων του επιπέδου πάνω στο οποίο βρίσκεται το υλικό και του παλμικού laser ώστε να έχουμε τον πλήρη συντονισμό.

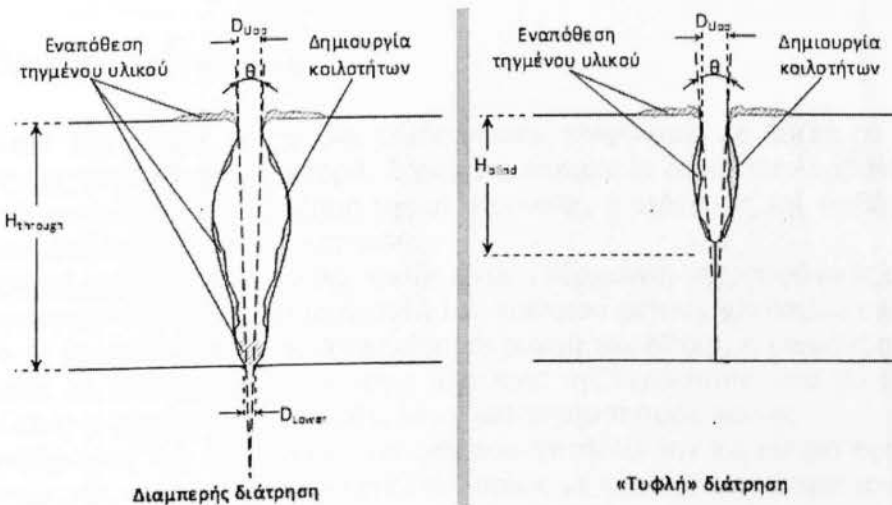
Τέλος να αναφέρουμε ενδεικτικά ότι για διάνοιξη οπών σε μέταλλα το laser CO<sub>2</sub> έχει το πρόβλημα της αρχικής απορρόφησης ενέργειας και γι αυτό το λόγω προτιμούνται τα laser Nd:YAG. Για μη μεταλλικά υλικά η κατάσταση είναι αντίστροφη.



Εικόνα 43. Δημιουργία οπών μικρής διαμέτρου και μεγάλης λεπτομέρειας σε θάλαμο καύσης με χρήση laser

Κλείνοντας το κεφάλαιο της διάτρηση θα ήταν σοφό να αναφέρουμε και μερικά μειονεκτήματα της δέσμης laser καθώς επίσης και μερικές εικόνες με τις ατέλειες που παρουσιάζονται :

- Είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν οπές μεταβλητής διαμέτρου.
- Για οπές μεγάλου βάθους, η απόκλιση της δέσμης laser μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία μη αποδεκτών οπών.
- Εξαιτίας της επιρροής διαφόρων αστάθμητων παραγόντων, ο έλεγχος του βάθους στην περίπτωση «τυφλών» οπών αλλά και γενικώς των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής είναι πάρα πολύ δύσκολος.



Σχήμα 40. Χαρακτηριστικά και ατέλειες της διεργασίας διάτρησης με δέσμη laser.

## 3.6 Επεξεργασία επιφάνειας

### 3.6.1 Γενικά

Με τον όρο επεξεργασία επιφάνειας περιγράφεται μία παλιά και αρκετά πλατιά κατηγορία βιομηχανικών εφαρμογών που σκοπό έχει την βελτίωση της επιφάνειας σε σχέση με τη διάρκεια ζωής της και τις ιδιότητες της. Κλασικά παραδείγματα επεξεργασίας επιφάνειας είναι η σκλήρυνση και η λείανση μιας επιφάνειας και η βελτίωση της αντιστατικής της συμπεριφοράς. Το λέιζερ όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι μία θερμική πηγή που παρουσιάζει μερικές μοναδικές ιδιότητες όπως η μεγάλη ένταση ακτινοβολίας του, η ικανότητα του να εστιάζεται σε πολύ μικρές διαστάσεις, η απορρόφηση του στα μη διαπερατά υλικά (όπως μέταλλα) περιορίζεται σε λίγα ατομικά στρώματα και η περιοχή γύρω από το σημείο αλληλεπίδρασης επηρεάζεται ελάχιστα από το λέιζερ. Επομένως με τη χρήση του λέιζερ, ένα μεγάλο ποσό θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια σε μία καλά καθορισμένη περιοχή χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο υλικό. Άρα το λέιζερ αποτελεί ένα ιδανικό εργαλείο για την επεξεργασία επιφάνειας με πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές όπως η χημική καθαρότητα, η ελεγχόμενη δειξιδυση στο υλικό, ο έλεγχος της περιοχής επεξεργασίας, η μη απαίτηση περαιτέρω επεξεργασίας, η απαίτηση μόνο οπτικής επαφής και η ευκολία αυτοματοποίησης της διαδικασίας.

Η επεξεργασία επιφάνειας με λέιζερ χωρίζεται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη είδος της διαδικασίας (θερμική ή θερμοχημική), την θερμοκρασία κατά την αλληλεπίδραση (μεγαλύτερη ή μικρότερη από το σημείο τήξεως) και τη συμμετοχή ή όχι επιπλέον υλικού. Οι κατηγορίες επεξεργασίας επιφάνειας με λέιζερ που έχουν σήμερα εφαρμογή στη βιομηχανία είναι η θέρμανση, το λιώσιμο με επαναστερεοποίηση, η κραματοποίηση και η επίστρωση επιφάνειας. Αναλυτικότερα:

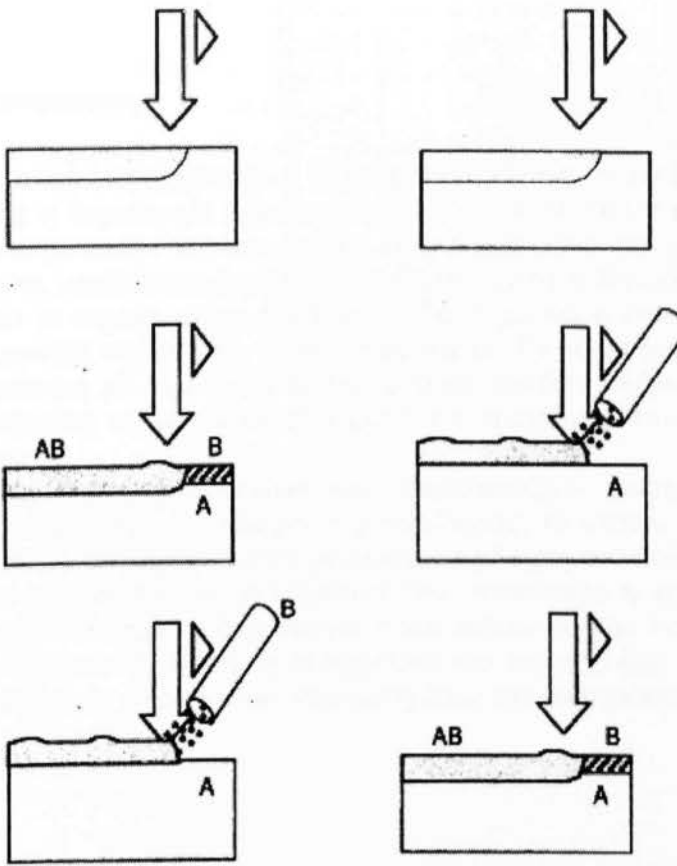
### 3.6.2 Θέρμανση επιφάνειας.

Απετέλεσε την πρώτη κατηγορία επεξεργασίας επιφάνειας με λέιζερ με σκοπό την αύξηση της αντίστασης σε φθορά. Σήμερα η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ένα πλήθος από χρήσεις όπως η αύξηση της σκλήρυνσης, η ελάττωση της τριβής, και η αύξηση του χρόνου ζωής λόγω κόπωσης.

Η βασική αρχή της διαδικασίας αυτής είναι η θέρμανση της επιφάνειας με το λέιζερ σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή του κρίσιμου μετασχηματισμού αλλά μικρότερη από το σημείο τήξεως. Μετά την απομάκρυνση του λέιζερ, η επιφάνεια που αλληλεπίδρασε με το λέιζερ ψύχεται λόγω διάχυσης της θερμότητας στα γειτονικά στρώματα. Όμως η δομή της έχει αλλάξει λόγω μετασχηματισμού φάσης.

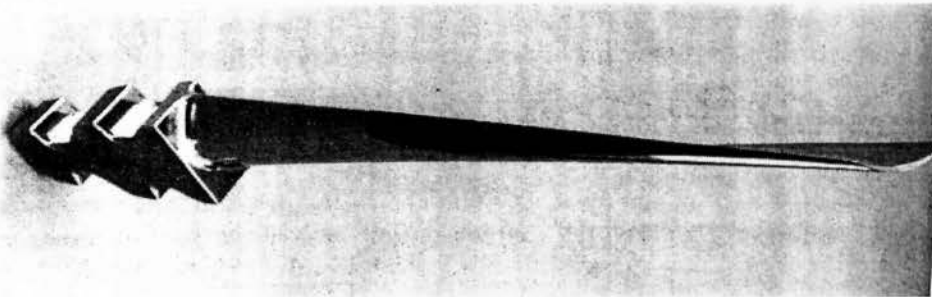
Η σκλήρυνση της επιφάνειας του σιδήρου αποτελεί την κυριότερη εφαρμογή της θέρμανσης της επιφάνειας και σχετίζεται κυρίως με την περιεκτικότητα του σε άνθρακα και την κατανομή του άνθρακα στην επιφάνεια του υλικού όπως μπορούμε να δούμε και στην παρακάτω εικόνα όπου χαρακτηρίστηκα δείχνουμε μια λεπίδα που αποτελεί κομμάτι από μια τουρμπίνα. Συνήθως το αρχικό υλικό αμέσως μετά την παραγωγή παρουσιάζει ανομοιογένειες στην κατανομή του άνθρακα. Μετά την θέρμαν-

ση σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο μετασχηματισμού φάσης, ο άνθρακας αρχίζει να διαχέεται και να ομοιογεντοποιείται η κατανομή του.



Σχήμα 41. Διαδικασίες επεξεργασίας επιφάνειας με laser

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αφενός την σκλήρυνση της επιφάνειας και αφετέρου την αύξηση της αντίστασης σε φθορά. Κατά τη θέρμανση της επιφάνειας για τη επιτευξη μετασχηματισμού φάσης, η δέσμη του λέιζερ πρέπει να είναι ελαφρά αποεστιασμένη για δύο λόγους: η ένταση ακτινοβολίας πρέπει να είναι σχετικά μικρή ώστε να αποφεύγεται το λιώσιμο του υλικού ενώ ταυτόχρονα πρέπει να υπάρχει μία ομογενής κατανομή της ισχύος στη διατομή της δέσμης. Η τελευταία συνθήκη είναι απαραίτητη ώστε η κατανομή της θέρμανσης να είναι ίδια στην περιοχή αλληλεπίδρασης που συνεπάγεται όμοιο μετασχηματισμό φάσης σε όλη την επιφάνεια.



Εικόνα 44. Σκλήρυνση με laser Λεπίδα τουρμπίνας

Σχετικά με τις υπόλοιπες παραμέτρους της διαδικασίας, η ταχύτητα μετακίνησης του υλικού πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά ώστε αφενός να μην λειώνει το υλικό και αφετέρου το βάθος του υλικού που υφίσταται επεξεργασία να είναι ικανοποιητικό.

### 3.6.3 Λιώσιμο επιφάνειας

Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται η ομογενοποίηση της επιφάνειας, η βελτίωση της μικροδομής και η δημιουργία δομών που βασίζονται σε απότομη ψύξη. Η μέθοδος είναι παρόμοια με αυτήν της θέρμανσης επιφάνειας μόνο που σε αυτή τη περίπτωση προσφέρεται μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας ώστε η θερμοκρασία στην επιφάνεια να υπερβεί το σημείο τήξης του υλικού. Ταυτόχρονα η επιφάνεια που θα υποστεί την επεξεργασία καλύπτεται με αδρανές αέριο. Τα κύρια χαρακτηριστικά της κατεργασίας επιφάνειας με λιώσιμο από λέιζερ είναι: σχεδόν πλήρως ομογενείς δομές, ελάχιστη επίδραση σε γειτονικά στρώματα και τραχύτητα επιφάνειας που δεν υπερβαίνει τα 25μm.

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες υλικών που παρουσιάζουν αυξημένο ενδιαφέρον στην κατεργασία επιφάνειας με λιώσιμο: ο χυτοσίδηρος, το ασάλι και το τιτάνιο. Ο χυτοσίδηρος συνήθως αποτελείται από μη ομογενείς δομές οι οποίες με το λιώσιμο ομογενοποιούνται αυξάνοντας τη σκληρότητα του. Αντίστοιχα η κατεργασία του ασταλιού έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πολύ καλών δομών που ενισχύουν την αντίσταση του σε διάβρωση. Τέλος, η κατεργασία του τιτανίου έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία θαυμάσιων μικροδομών που ενισχύουν την σκληρότητα και την αντοχή του.

### 3.6.4 Επίστρωση επιφάνειας

Η διαδικασία επίστρωσης επιφάνειας έχει σαν στόχο την επικάλυψη ενός μετάλλου με στρώμα κάποιου άλλου, χωρίς η επίστρωση να εισχωρήσει στο υπόστρωμα. Το επιπλέον μέταλλο διοχετεύεται σαν σκόνη και μπορεί είτε να έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια πριν την αλληλεπίδραση με το λέιζερ είτε να εμφυσάτε με τη βοήθεια αδρανούς αερίου κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Η πρώτη περίπτωση είναι πρακτικά απλούστερη αν φυσικά η σκόνη κολλάει και διατηρείται επάνω στο υπόστρωμα.

Η διαδικασία της επίστρωσης επιτυγχάνεται με σάρωση της επιφάνειας με μία δέσμη λέιζερ αποεστιασμένη οπότε η σκόνη λειώνει και να συγκολλάτε στο βασικό μέταλλο του οποίου η αύξηση της θερμοκρασίας πρέπει να μην υπερβαίνει το σημείο βρασμού. Στη δεύτερη περίπτωση, η εισερχόμενη ισχύς είναι λίγο μεγαλύτερη ώστε το μέταλλο-υπόστρωμα να λειώσει επιφανειακά (σε στρώμα ελαχίστου πάχους) ενώ η σκόνη του υπό επίστρωση μετάλλου εμφυσάτε με αδρανές αέριο (π.χ. αργό). Η σκόνη επικάθεται στο λειωμένο υλικό και συγκολλείται μαζί του δημιουργώντας συγχώνευση χωρίς όμως μεγάλη διάχυση του επιστρώματος στο υπόστρωμα. Η τεχνική αυτή λειτουργεί καλύτερα στην επίστρωση πολύ μικρών περιοχών ή περιοχών πολύ κοντά σε ευπαθή υλικά καθώς επιτρέπει μεγάλη ακρίβεια στη θέση, το βάθος και το μέγεθος της επίστρωσης. Παραδείγματα επίστρωσης με λέιζερ είναι η δημιουργία σιδερένιων καλουπιών για παραγωγή γυάλινων μπουκαλιών, η κατασκευή βαλβίδων για μηχανές καύσης και εργαλείων σφυρηλάτησης.

### 3.6.5 Κραματοποίηση επιφάνειας

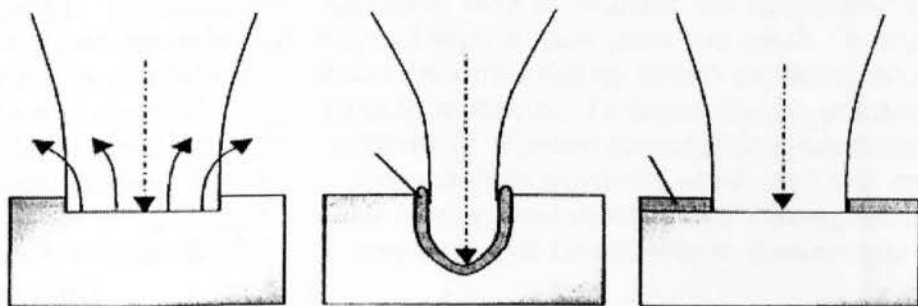
Η κραματοποίηση επιφάνειας με λέιζερ είναι μία διαδικασία που μοιάζει και στο λιώσιμο και στην επίστρωση επιφάνειας δηλαδή, αφενός υπάρχει προσθήκη νέου υλικού που αναμειγνύεται με το υλικό της επιφάνειας και αφετέρου η αύξηση της θερμοκρασία της επιφάνειας υπερβαίνει το σημείο τήξης του υποστρώματος. Επομένως υπάρχει λιώσιμο και της σκόνης του επιστρώματος και της επιφάνειας του υποστρώματος. Μετά την ψύξη δημιουργείται κράμα των δύο υλικών επί της επιφάνειας. Με την κραματοποίηση λέιζερ, το δημιουργούμενο κράμα εμφανίζει θαυμάσια μικροδομή και σχεδόν ομοιογενή μίξη των δύο υλικών σε όλη τη επεξεργασμένη περιοχή. Λόγω της ταχύτατης θέρμανσης και ψύξης, το πάχος του στρώματος του κράματος είναι απόλυτα ελεγχόμενο και κυμαίνεται από 1-2000 μm. Τα περισσότερα υλικά μπορούν να κραματοποιηθούν στα περισσότερα υποστρώματα. Κυριότερα παραδείγματα είναι η κραματοποίηση του τιτανίου με C ή N, του χυτοσιδήρου με Cr, Si και C, του σιδήρου με Cr, Mo, B και Ni, και του αλουμινίου με Si, C, N και Ni.

## 3.7 Εγγραφή επιφάνειας με laser

### 3.7.1 Γενικά.

Η εγγραφή σε επιφάνεια με λέιζερ βασίζεται σε τοπικές διαμορφώσεις της εμφάνισης της επιφάνειας που προκαλούν την εμφάνιση χαρακτήρων και σχεδίων μέσω της οπτικής αντίθεσης των διαμορφωμένων με λέιζερ περιοχών με τα γειτονικά τους τμήματα. Η τοπική διαμόρφωση της επιφάνειας επιτυγχάνεται με δύο τρόπους: την απομάκρυνση υλικού από την επιφάνεια και την αλλαγή της μορφολογίας της επιφάνειας. Και στις δύο περιπτώσεις η διαμόρφωση μπορεί να γίνει είτε με απευθείας εγγραφή όπου η δέσμη του λέιζερ «γράφει» μετακινούμενη στην επιφάνεια και είτε με προβολή της δέσμης μέσω μάσκας. Αναλυτικότερα:

### 3.7.2 Εγγραφή με απομάκρυνση υλικού



Σχήμα 42. Εγγραφή επιφάνειας με απομάκρυνση υλικού

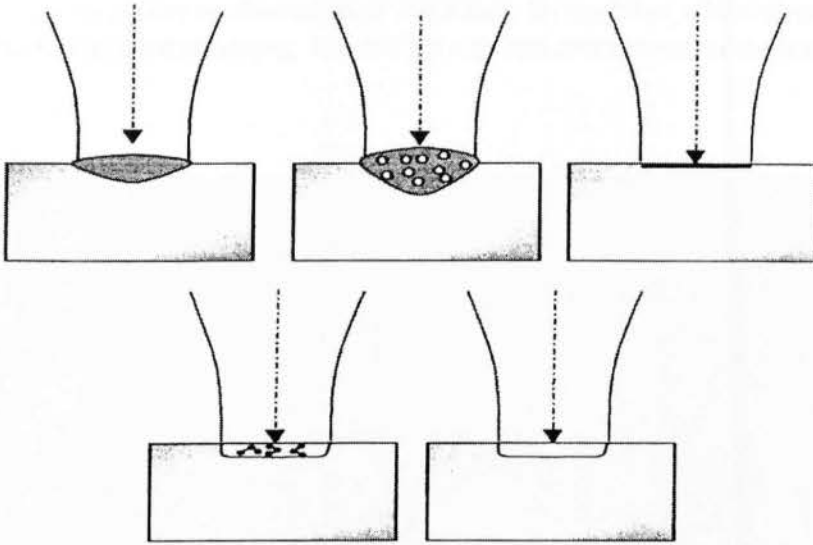
Η ένταση ακτινοβολίας της εισερχόμενης δέσμης λέιζερ είναι αρκετά ισχυρή ώστε να απομακρυνθούν στρώματα υλικού από την επιφάνεια. Η απομάκρυνση ορισμένων στρωμάτων προκαλεί την εμφάνιση οπτικής αντίθεσης με τα γειτονικά στρώματα είτε λόγω μεταβολής της μορφολογίας της κατεργασμένης επιφάνειας (π.χ. υαλοποίηση και τραχύτητα της επιφάνειας) είτε λόγω εμφάνισης φαινομένων σκίασης. Οι βασικές διαδικασίες που συμμετέχουν στην εγγραφή με απομάκρυνση υλικού είναι η εξάτμιση και η εξάχνωση του υλικού λόγω θέρμανσης από τη δέσμη του λέιζερ, εκτός από την περίπτωση χημικής αποδόμησης μερικών πολυμερών με λέιζερ διεγερμένων διμερών. Λιώσιμο του υλικού μπορεί να παρουσιαστεί μόνο σε μέταλλα αλλά καλό θα ήταν να αποφεύγεται καθώς μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία οξειδίων.

Οι μέθοδοι που προκαλούν απομάκρυνση υλικού από επιφάνεια με λέιζερ είναι η αποδόμηση, η χάραξη και η απομάκρυνση επιπρόσθετου στρώματος (Σχ.42). Στην περίπτωση αποδόμησης πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους δημιουργούμενους ατμούς οι οποίοι μπορεί να είναι επικίνδυνοι και πρέπει να απομακρύνονται. Τυπικά υλικά στα οποία γίνεται εγγραφή με αποδόμηση υλικού είναι τα κεραμικά, το λάστιχο και ο σίδηρος. Όταν απαιτείται μεγάλο βάθος εγγραφής σε σχέση με το πλάτος εγγραφής, η μέθοδος της χάραξης είναι αποδοτικότερη. Βάθος χάραξης 50μm είναι πολύ εύκολα εφικτό όμως, ειδικά για τα μέταλλα υπάρχει προδιάθεση δημιουργίας οξειδίων στη χαραγμένη επιφάνεια και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην ελαχιστοποίηση τους. Τέλος μία πιο πρόσφατη μέθοδος που σήμερα αρχίζει να χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι η προσθήκη ενός ειδικού στρώματος στην επιφάνεια (όπως χρώμα ή οξειδίο) και η επιλεκτική απομάκρυνση τμημάτων του. Η τεχνική αυτή δίνει το πλεονέκτημα της προσεκτικής επιλογής του στρώματος ώστε αυτό αφενός να απορροφά ισχυρά και να ενισχύσει τη διαδικασία απομάκρυνσης υλικού και αφετέρου να δημιουργεί ισχυρή οπτική αντίθεση με την επιφάνεια του υποστρώματος.

### 3.7.3 Εγγραφή λόγω αλλαγής της μορφολογίας της επιφάνειας

Αν η ένταση της ακτινοβολίας του laser είναι σχετικά μικρή το τμήμα της επιφάνειας που ακτινοβολεί απλώς θα ζεσταθεί με αποτέλεσμα να λειώσει και να αλλάξει η μορφολογία του ή η χημική του σύσταση. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι αλλαγής της μορφολογίας επιφανειών όπως η ανακρυστάλλωση, η δημιουργία πόρων η οξείδωση, η χημική διάσπαση και η θερμική ενεργοποίηση χρωματικών κέντρων. Κατά την ανακρυστάλλωση τα στρώματα της επιφάνειας που λειώνουν και επαναστεροποιούνται διαφέρουν από τα γειτονικά καθώς παρουσιάζουν διαφορετική τραχύτητα, δομή ακόμα και χρώμα. Σε μερικά οργανικά υλικά, κατά τη διάρκεια του λιώσιματος εμφανίζεται και εξάτμιση που οδηγεί στο σχηματισμό πόρων μέσα στο υλικό. Οι πόροι αυτοί διογκώνουν το υλικό και προκαλούν την απαιτούμενη οπτική αντίθεση, όμως η παρουσιαζόμενη εγγραφή δεν είναι καλής ποιότητας. Σε περισσότερες μετάλλων, αν η θερμαινόμενη επιφάνεια αλληλεπιδράσει με οξυγόνο εμφανίζεται χρωματισμός λόγω δημιουργία οξειδίων. Τέλος για την εγγραφή σε οργανικά υλικά μια πολύ αποδοτική μέθοδος είναι η δημιουργία διαφορετικού χρωματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αποδόμηση του υλικού λόγω θέρμανσης είτε με ενεργοποίηση χρωματικών κέντρων μέσα στο υλικό.





Σχήμα 43. Εγγραφή σε υλικό με αλλαγή στην μορφολογία

### 3.7.4 Εγγραφή με μάσκα

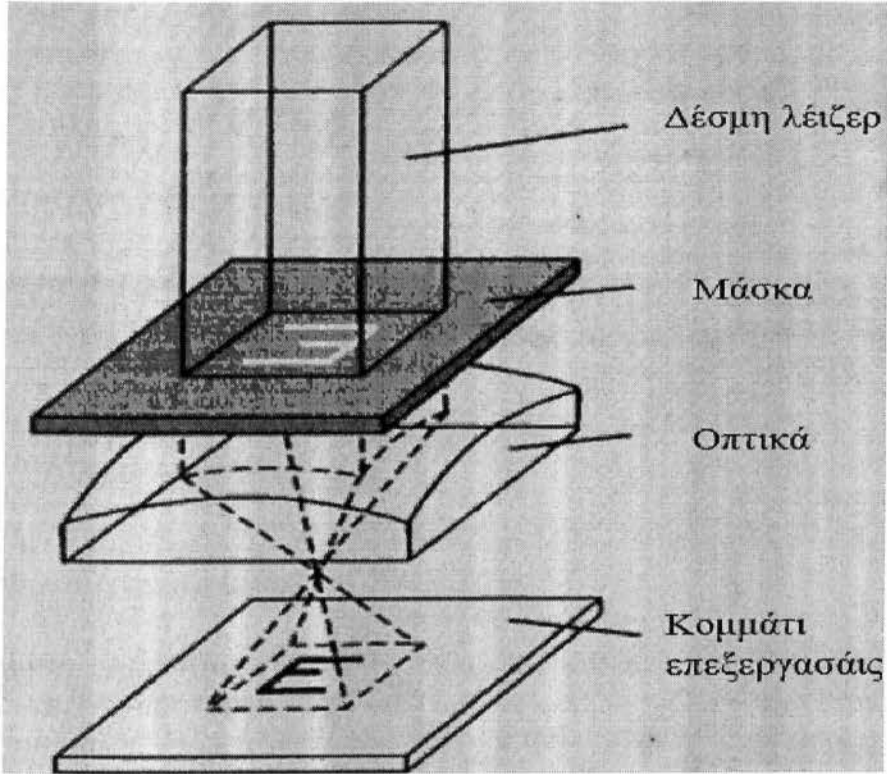
Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην προβολή του σχεδίου μέσω μάσκας. Η επιφάνεια υπό εγγραφή παραμένει ακίνητη και οι χαρακτήρες ή τα σχέδια που θα εγγραφούν προϋπάρχουν σε ειδική μάσκα. Η μάσκα αυτή ακτινοβολείται με λέιζερ και τα σχέδια που περιέχει προβάλλονται με οπτικό σύστημα στην επιφάνεια (όπως μπορούμε να δούμε και στην παρακάτω εικόνα 45). Η μάσκα αυτή μπορεί να είναι είτε από μέταλλο για τα λέιζερ διεγερμένων διμερών και τα CO<sub>2</sub> λέιζερ είτε από γυαλί με ειδική επικάλυψη για τα Nd.

Κατά τη εγγραφή με μάσκα, η ομοιογένεια της δέσμης είναι απαραίτητη για την καλή ποιότητα εγγραφής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικοί ομοιογενοποιητές. Στην περίπτωση που η μάσκα είναι μεγαλύτερη από τη δέσμη είναι απαραίτητη μία σχετική μετατόπιση της δέσμης σε σχέση με τη μάσκα κατά τη διάρκεια της εγγραφής. Οι μέγιστοι ρυθμοί εγγραφής με μάσκα είναι περίπου 100 σχέδια ανά δευτερόλεπτο όμως η ποιότητα εγγραφής δεν είναι υψηλή.

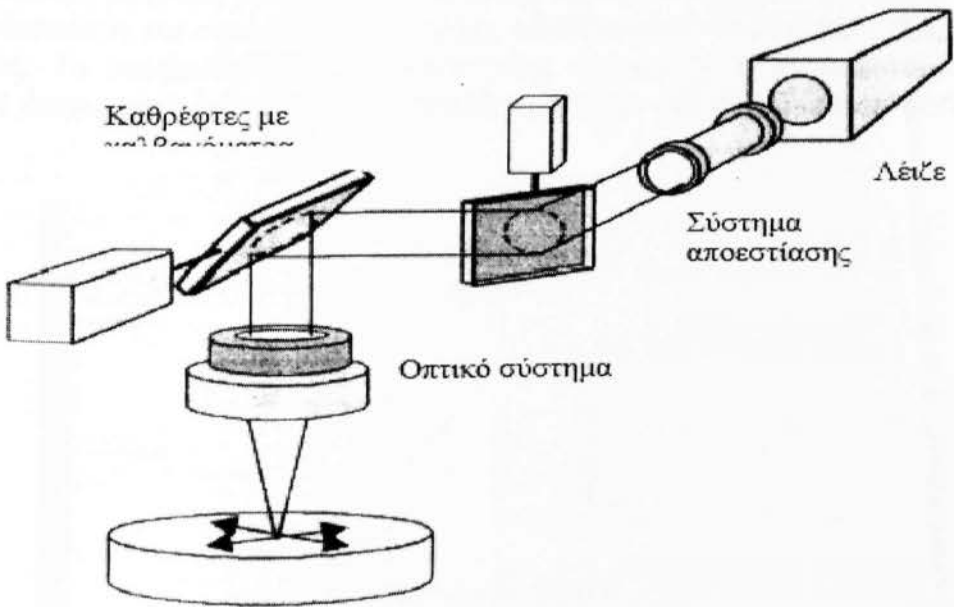
### 3.7.5 Απευθείας εγγραφή με το laser

Η επιφάνεια σαρώνεται με εστιασμένη δέσμη λέιζερ και οι χαρακτήρες/σχέδια σχηματίζονται στην επιφάνεια με απ' ευθείας εγγραφή. Η δέσμη του λέιζερ αφού εστιαστεί σε ακτίνα διατομής στο σημείο εστίασης κατάλληλη για τη απαιτούμενη ακρίβεια (κατάλληλο πάχος γραμμής) μετακινείται με κάτοπτρα μέσω είτε ειδικών βαθμίδων xy μετατόπισης είτε συστήματος γαλβανομέτρων όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα.. Σε κάθε περίπτωση, η κίνηση των κατόπτρων με τη βοήθεια προσωπικού υπολογιστή επιτρέπει την εγγραφή των χαρακτήρων ή των σχεδίων στην επιφάνεια. Η εγγραφή με αυτή τη μέθοδο είναι ακριβείας, με την ακρίβεια να καθορίζεται από τη διατομή του λέιζερ στο σημείο εστίασης. Αν χρησιμοποιείται παλμικό λέιζερ, σε κάθε

παλμό θα δημιουργείται ένα κυκλικό σημείο επί της επιφάνειας και η συνεχής γραμμή θα επιτυγχάνεται με αλληλοεπικάλυψη των σημείων. Επομένως απαιτείται προσεκτική επιλογή του ρυθμού επανάληψης του λέιζερ και του ποσοστού αλληλοεπικάλυψης των σημείων.



Εικόνα 45. Εγγραφή σε επιφάνεια με μάσκα



Σχήμα 44. Απευθείας εγγραφή με laser

## 3.8 Άλλες εφαρμογές των Laser στην βιομηχανία.

### 3.8.1 Γενικά

Η δέσμη laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός των κλασικών μεθόδων που αναλύσαμε παραπάνω, και σε άλλες εφαρμογές στα πλαίσια πάντα της βιομηχανικής παραγωγής, με τρόπο τέτοιο που μόνο σκοπό θα μπορούσε να έχει την βελτίωση της παραγωγής καθώς και τη μείωση των βλαβών.

### 3.8.2 Μετρήσεις αποστάσεων

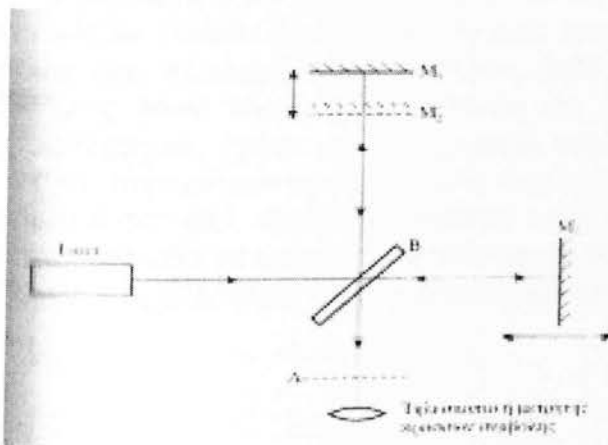
Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων με χρήση laser είναι τρεις :

- Συμβολομετρία
- Τηλεμετρία διαμόρφωσης δέσμης
- Χρόνος πτήσης παλμού

#### 3.8.2.1 Συμβολομετρικές μέθοδοι

Όταν το μέτωπο κύματος μιας φωτεινής πηγής διαιρεθεί σε δυο μέρη τα οποία διανύουν διαφορετικές αποστάσεις πριν επανασυνδεθούν, τότε παράγεται μια εικόνα κρουσών συμβολής. Η κατανομή της έντασης ακτινοβολίας στην εικόνα είναι χαρακτηριστική της, σημείου προς σημείο, διαφοράς οπτικού δρόμου μεταξύ των δυο τμημάτων της δέσμης. Έτσι αν κάποια από τις διαδρομές μεταβληθεί η εικόνα συμβολής θα μετατοπιστεί στο πεδίο προβολής και η μεταβολή του μήκους κύματος της διαδρομής μπορεί να μετρηθεί με βάση τη μετατόπιση των κρουσών συμβολής.

Η κλασική μέθοδος μέτρησης απόστασης με αυτόν τον τρόπο είναι το συμβολόμετρο Michelson και σχεδόν όλες οι άλλες μέθοδοι είναι παραλλαγές αυτού του συστήματος. Το συμβολόμετρο Michelson που απεικονίζεται παρακάτω αποτελείται από ένα διαχωριστή δέσμης, δυο επίπεδα κάτοπτρα και ένα τηλεσκόπιο παρατήρησης.



Σχήμα 45. Συμβολόμετρο Michelson.

Το μέτωπο κύματος από την πηγή laser διαιρείται από το διαχωριστή δέσμης Β. Τα δυο μέρη οδηγούνται στα επίπεδα κάτοπτρα  $M_1$  και  $M_2$  και ανακλώνται πίσω στο Β. Ένα μέρος του φωτός ανακλάται από το διαχωριστή και ένα μέρος μεταδίδεται, όπως φαίνεται, έτσι ώστε ο διαχωριστής δέσμης να βοηθά στην επανασύνδεση των ακτινών και να παρατηρούνται κροσσοί συμβολής με το τηλεσκόπιο. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι κροσσοί δημιουργούνται στο λεπτό στρώμα που σχηματίζεται μεταξύ των κατόπτρων  $M_1$  και  $M_2$ , που είναι το είδωλο του κατόπτρου  $M_2$  στο Β. Έτσι αν το  $M_1$  και  $M_2$  είναι ακριβώς παράλληλα δηλαδή τα  $M_1$  και  $M_2$  είναι ακριβώς κάθετα μεταξύ τους, παρατηρείται ένα σύστημα κυκλικών κροσσών. Από την άλλη πλευρά, αν ένα από τα κάτοπτρα έχει μια ελαφριά κλίση, τότε δημιουργείται ένα σύστημα από ευθείες γραμμές συμβολής.

Κατά την συμβολή σε λεπτό στρώμα σχηματίζεται ένας φωτεινός κροσσός όταν :

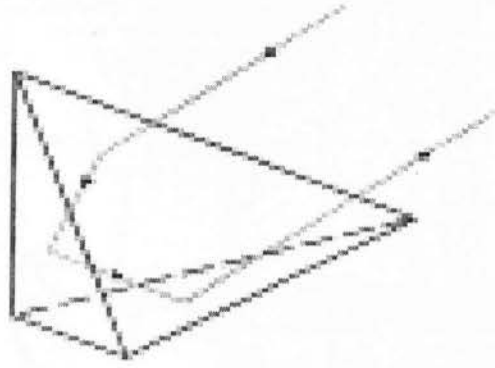
$$P_{\lambda_0} = 2D \cdot \cos \theta = 2D$$

αν η γωνία  $\theta$  είναι πολύ μικρή.

όπου  $D$  είναι το οπτικό πάχος του στρώματος.

Έτσι, αν κάποιο από τα κάτοπτρα ας πούμε το  $M_2$ , μετακινηθεί, το  $D$  θα μεταβληθεί και η εικόνα των κροσσών συμβολής θα μετακινηθεί. Ειδικότερα αν το  $D$  μεταβληθεί κατά  $\lambda_0/2$ , ένας πλήρης κροσσός θα διέλθει από ένα σημείο αναφοράς στο επίπεδο παρατήρησης. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε την απόσταση που μετακινήθηκε το  $M_2$ , με την μετακίνηση των κροσσών, δηλαδή με αναφορά στο μήκος κύματος  $\lambda_0$  του χρησιμοποιούμενου φωτός. Για να μετρήσουμε μια άγνωστη απόσταση απλώς ευθυγραμμίζουμε το  $M_2$ , με το ένα άκρο και μετράμε τον αριθμό των κροσσών καθώς αυτοί μετακινούνται, μέχρι να συμπέσει με το  $M_2$  με το άλλο άκρο της προς μέτρησης απόστασης

Βεβαίως η οπτική συμβολομετρία προηγείται του laser πολλά χρόνια, αλλά η τεχνική ήταν πάντα περιορισμένη από τα προβλήματα συμφωνίας των διαθέσιμων φωτεινών πηγών. Αποστάσεις μερικών εκατοστών ήταν ότι καλύτερο μπορούσε να μετρηθεί λόγω αξιοπιστίας. Εντούτοις με ένα laser He-Ne είναι διαθέσιμα μήκη συμφωνίας πολλών μέτρων και έτσι, θεωρητικά τουλάχιστον, μπορούμε να μετρήσουμε μέχρι και τέτοιες αποστάσεις, με ακρίβεια υποδιαίρεσης του μήκος κύματος. Μετατοπίσεις κροσσών της τάξης 0,01 του κροσσού, που είναι ισοδύναμο με  $\lambda/200$  είναι δυνατόν να ανιχνευθούν. Πρέπει όμως να θυμόμαστε ότι οι μετρούμενες αποστάσεις είναι οπτικοί δρόμοι που περιλαμβάνουν το δείκτη διάθλασης του αέρα. Μεταβολές στο δείκτη διάθλασης, λόγω αλλαγών στην πίεση και τη θερμοκρασία και λόγω ατμοσφαιρικών διαταραχών, έχουν ως αποτέλεσμα τυχαίες μετατοπίσεις των κροσσών και ως εκ τούτου περιορίζουν την απόσταση που μπορεί να μετρηθεί και την ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί. Ακρίβειες περίπου  $1/10^6$  επιτυγχάνονται σχετικά εύκολα. Στην πράξη τα επίπεδα κάτοπτρα αντικαθίστανται από κυβικούς γωνιακούς ολικούς ανακλαστήρες όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 46.** Σχηματικό διάγραμμα ενός κυβικού γωνιακού ολικού ανακλαστήρα.

Αυτοί έχουν την ιδιότητα να ανακλούν την προσπίπτουσα δέσμη πίσω σε μια διεύθυνση παράλληλη με την προσπίπτουσα απλοποιώντας έτσι την ευθυγράμμιση του οργάνου. Η προκύπτουσα εγκάρσια μετατόπιση εμποδίζει το επιστρέφον φως να εισέλθει στην κοιλότητα του laser και να δημιουργήσει μια ανεπιθύμητη διαμόρφωση της εξόδου του laser. Ο μεγάλος αριθμός των κροσσών που διασχίζει το πεδίο παρατήρησης μετρείται ηλεκτρονικά χρησιμοποιώντας για παράδειγμα μια φωτοδίοδο πυριτίου ως ανιχνευτή.

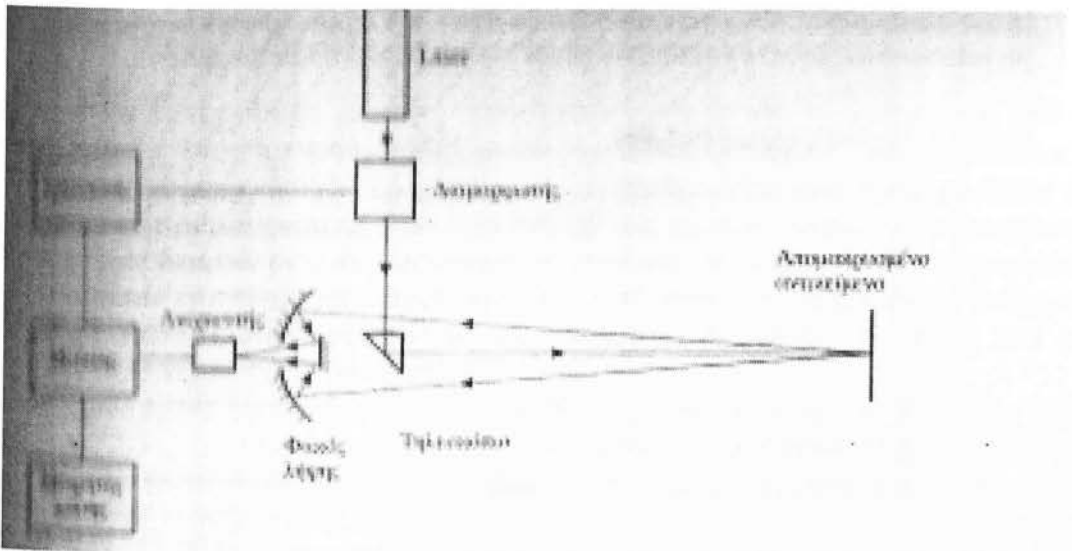
Η τεχνική χρησιμοποιείται στον έλεγχο εργαλειομηχανών, στην ρύθμιση προτύπων μηκών και για σεισμολογικούς και γεωδαιτικούς σκοπούς.

### 3.8.2.2 Τηλεμετρία διαμορφωμένης δέσμης

Όπως αναφέραμε και παραπάνω λόγω των διακυμάνσεων στην πυκνότητα της ατμόσφαιρας, οι συμβολομετρικές μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων περιορίζονται σε αποστάσεις που δεν υπερβαίνουν τα 100m περίπου. Για μεγαλύτερες αποστάσεις είναι χρήσιμες οι τεχνικές που περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση πλάτους της δέσμης laser. Η δέσμη ενός laser He-Ne ή ενός laser GaAs διαμορφώνεται κατά πλάτος και προβάλλεται πάνω στο «στόχο» του οποίου πρέπει να μετρηθεί η απόσταση. Το φως που ανακλάται από το στόχο συγκεντρώνεται με ένα τηλεσκόπιο και κατευθύνεται στον ανιχνευτή. Η φάση της ανακλώμενης διαμορφωμένης δέσμης είναι διαφορετική από αυτήν της εκπεμπόμενης διαμορφωμένης δέσμης, λόγω του πεπερασμένου χρόνου που χρειάζεται το φως να ταξιδέψει στο στόχο και να επιστρέψει στο τηλεσκόπιο. Η μετατόπιση της φάσης  $\Phi$  δίνεται από την σχέση:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0(2nq * L)}$$

Το σχήμα που περιγράφει την μέτρηση αποστάσεων με διαμορφωμένη δέσμη είναι στην επόμενη σελίδα (σχ 56).



Σχήμα 47. Σχηματικό διάγραμμα ενός συστήματος μέτρησης αποστάσεων με διαμορφωμένη δέσμη

όπου  $L$  είναι η απόσταση του στόχου και  $n_g$  ο δείκτης διάθλασης ομάδας στην ατμόσφαιρα. Η τιμή του  $n_g$  για το μήκος κύματος 632,8 του laser He-Ne είναι  $n_g=1,00028$  για ξηρό αέρα στους  $15^\circ \text{C}$ . Διορθώσεις για μεταβολές στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία και πίεσης είναι διαθέσιμες. Όμως αυτές οι διορθώσεις είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε μετρήσεις πεδίου και πρέπει κανείς να προσπαθήσει να πάρει μέση τιμή του  $n_g$  για ολόκληρη διαδρομή του φωτός.

Όπως μπορούμε να δούμε από το παραπάνω σχήμα, το φως διαμορφώνεται κατά πλάτος σε μια δεδομένη συχνότητα  $f$ , γίνεται παράλληλο και κατευθύνεται στο στόχο. Το ανακλώμενο φως συγκεντρώνεται από το τηλεσκόπιο και εστιάζεται πάνω στον ανιχνευτή. Ένας ανιχνευτής φάσης συγκρίνει τις σχετικές φάσεις της ανακλώμενης δέσμης και της αρχικής δέσμης. Η διαφορά φάσης μπορεί να γραφτεί και ως :

$$\phi = (p + q) * 2\pi$$

όπου  $p$  είναι ο άγνωστος ακέραιος και το  $q$  είναι λίγο μικρότερο από τη μονάδα. Η σύγκριση των φάσεων δίνει το  $q$  αλλά όχι το  $p$ . Για να βρεθεί το  $p$  η μέτρηση μπορεί να επαναληφθεί με διαφορετικές τιμές συχνότητας διαμόρφωσης. Έχοντας βρει το  $\phi$ , τότε το  $L$  μπορεί να βρεθεί από τον τύπο  $\Phi=2\pi/\lambda_0(2n_g*L)$  αν λύσουμε ως προς το  $L$ . Το μικρό εύρος του φωτός laser επιτρέπει τον απόλυτο διαχωρισμό του από το διάχυτο φως και έτσι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο φως της ημέρας, με έναν υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο, ενώ το μικρό άνοιγμα δέσμης επιτρέπει ένα μεγάλο βαθμό επιλεξιμότητας του υπό εξέταση στόχου.

Έχουν αναπτυχθεί μονάδες τηλεμετρίας με διαμορφωμένη δέσμη για τις οποίες η ακρίβεια είναι καλύτερη από το 1mm για αποστάσεις μέχρι και 1 προς  $10^6$  για μεγαλύτερες αποστάσεις. Τέτοιες συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις μεγάλων κατασκευών, όπως φράγματα και γέφυρες και τοποθετούνται σε αεροσκάφη για αποτυπώσεις μεγάλων εκτάσεων γαιών και για γεωδαιτική τοπογραφία.

### 3.8.2.3 Τεχνικές ήχου παλμών

Μπορούμε να μετρήσουμε μεγάλες αποστάσεις μετρώντας το χρόνο της μετ' επιστροφής πτήσης ενός παλμού, πολύς μικρής χρονικής διάρκειας, που ανακλάται από έναν απομακρυσμένο στόχο. Το σύστημα αποτελείται από ένα παλμικό laser κατά προτίμηση μετατρεπόμενου Q, ένα τηλεσκόπιο για να συγκεντρώνει το ανακλώμενο φως ένα φωταανιχνευτή και ένα χρονόμετρο μεγάλης ακρίβειας. Η λεπτή παράλληλη δέσμη του laser επιτρέπει να μετρήσουμε την απόσταση συγκεκριμένων στόχων και η τεχνική έχει στρατιωτικές εφαρμογές ως τηλέμετρο. Ακρίβειες της τάξης των  $\pm 5\text{m}$  για αποστάσεις 10km έχουν επιτευχθεί.

Μια καινούργια εφαρμογή είναι η μέτρηση της απόστασης της σελήνης. Χρησιμοποιώντας τους οπισθοανακλαστήρες, που έχουν τοποθετηθεί στην επιφάνεια της σελήνης κατά τα αποστολές των Απόλλων 11,14 και 15, η απόσταση της σελήνης έχει μετρηθεί με ακρίβεια των  $\pm 15\text{cm}$ .

Αυτή η τεχνική η οποία είναι γνωστή και ως οπτικό radar ή lidar (light detection and ranging – ανίχνευση και μέτρηση απόστασης με φως) έχει επεκταθεί και σε ατμοσφαιρικές μελέτες. Μετρώντας την ποσότητα του οπισθοσκεδαζόμενου φωτός μπορεί να ανιχνευτεί η παρουσία διαταραχών του αέρα και να μετρηθούν οι ποσότητες των διαφόρων ατμοσφαιρικών ρυπαντικών, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του θείου.

## 3.8.3 Ευθυγραμμίσεις μηχανών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

### 3.8.3.1 Μέθοδος λειτουργίας.

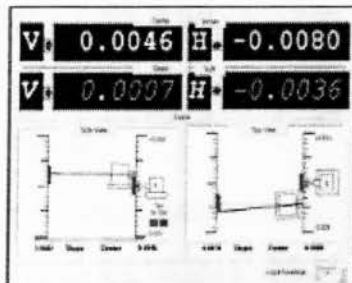
Η διαδικασία ελέγχου της ευθυγράμμισης, επιπεδότητας, παραλληλίας, τετραγωνικότητας, ευθυγραμμίας μιας επιφάνειας ή ενός άξονα πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός επίπεδου laser συνεχής σάρωσης. Η μέθοδος λειτουργίας είναι πολύ απλή αφού στηρίζεται στην θεμελιώδη αρχή των laser δηλαδή στην ακτινοβολία σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, προς μια μόνο κατεύθυνση. Συγκεκριμένα η συσκευή, μέσω της περιστροφής μιας δέσμης laser σε  $360^\circ$  δημιουργεί ένα επίπεδο laser το οποίο ορίζεται ως επιφάνεια αναφοράς. Το δημιουργούμενο επίπεδο laser ρυθμίζεται μέσω μιας απλής διαδικασίας, ώστε να είναι παράλληλο προς την επιφάνεια ή τον άξονα που θέλουμε να ελέγξουμε.

Λόγω του γεγονότος ότι η ακτινοβολία μεταδίδεται σε ευθεία γραμμή αυτή εντοπίζεται από τους αισθητήρες θέσης (targets). Η επιπεδότητα επιβεβαιώνεται όταν όλοι οι αισθητήρες (targets) δείχνουν την ίδια ένδειξη. Στη συνέχεια οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν την απόκλιση από την επιφάνεια αναφοράς και αυτό μπορεί να γίνει ακόμα και σε απόσταση τριάντα μέτρων από τη συσκευή laser. Κατόπιν, τα δεδομένα από τους αισθητήρες μεταφέρονται αυτόματα στη συσκευή ανάλυσης των δεδομένων π.χ φορητός Η/Υ όπου γίνεται η επεξεργασία της πληροφορίας και τα αποτελέσματα των μετρήσεων απεικονίζονται στην οθόνη του. Η μεταφορά δεδομένων προς την συσκευή ανάλυσης των



Εικόνα 46. Στην πάνω εικόνα παρουσιάζουμε το δημιουργούμενο επίπεδο από το laser, στην ακριβώς από κάτω εικόνα παραθέτουμε τους αισθητήρες και τα όργανα μέτρησης.

μετρήσεων γίνεται ασύρματα και η επικοινωνία με οποιοδήποτε μέσο απεικόνισης επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ασύρματου πομποδέκτη (interface). Σε συνδιασμό με το σύστημα ευθυγράμμισης laser μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και εξειδικευμένα προγράμματα λογισμικού. Αυτά έχουν σχεδιαστεί με σκοπό την αύξηση του ρυθμού συλλογής των δεδομένων και την ανάλυσή τους με διάφορους τρόπους. Το λογισμικό καταγράφει και αναλύει τα δεδομένα, υπολογίζει το σφάλμα αντιστάθμισης του αισθητήρα και υποδεικνύει τις τιμές ρύθμισης και τη κατεύθυνση που θα πρέπει να μετακινηθεί το μηχάνημα ώστε να ευθυγραμμιστεί.



Εικόνα 47. Το λογισμικό αναλύει και ετοιμάζει τις απαραίτητες ρυθμίσεις.

### 3.8.3.2 Εργαλειομηχανές οριζοντίου ή καθέτου άξονα κατεργασίας.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία που έχουν προκύψει από βιομηχανικές μελέτες είναι γνωστό ότι το 50% των αστοχιών σε παραγόμενα προϊόντα οφείλονται σε λανθασμένη ευθυγράμμιση (misalignment). Πολλοί είναι οι λόγοι που μπορούν να προκαλέσουν αποκλίσεις από την αρχική ευθύγραμμη θέση κέντρων κατεργασίας, κυλινδρομηχανών, ραουλομηχανών και γενικότερα μηχανημάτων παραγωγής.



Ενδεικτικά, μερικοί από αυτούς είναι:

- Αλλαγές επιμέρους στοιχείων στα πλαίσια βλάβης ή προληπτικής συντήρησης
- Κραδασμοί και φυσιολογική φθορά των επιμέρους εξαρτημάτων
- Μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας στο χώρο λειτουργίας
- Μεταφορά και επανεγκατάσταση του μηχανήματος

Τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει αναπτυχθεί μια νέα μεθοδολογία για την ευθυγράμμιση και ανάλυση της επιπεδότητας των μηχανημάτων παραγωγής με την χρήση της τεχνολογίας laser με ακρίβεια 0.0025mm. Μια σωστά ευθυγραμμισμένη και οριζοντιωμένη μηχανή παραγωγής προσφέρει πολλαπλά οφέλη στη παραγωγική διαδικασία, με κυριότερα τη μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της ποιότητας των προϊόντων. Με την εξέλιξη των συστημάτων ευθυγράμμισης (laser alignment) η διαδικασία ελέγχου είναι σαφώς πιο εύκολη και γρήγορη από οποιαδήποτε από τις συμβατικές μεθόδους (π.χ. θεοδόλιχοι, συμβολόμετρα, αλφάδια) αλλά και πολύ πιο ακριβής.

Η χρήση laser για την ευθυγράμμιση μηχανημάτων παραγωγής όπως CNC τόρνους, φρέζες, πλάνη, δράπανα, γερανογέφυρες, ικριώματα είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη αφού με την εφαρμογή της μπορούν να μετρηθούν και ελεγχθούν:

- Η επιπεδότητα της εργαλειομηχανής
- Η ομοκεντρότητα μεταξύ των κέντρων κατεργασίας (μεταξύ τσοκ κουκουβάγιας)
- Η ευθυγράμμιση της τράπεζας μετακίνησης
- Η ορθογωνικότητα μεταξύ των επιφανειών

Η βιομηχανία των εργαλειομηχανών εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια της ορθής ευθυγράμμισης με σκοπό την:

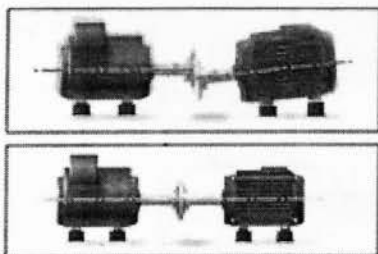
- Παραγωγή ποιοτικών προϊόντων εντός ανοχών.
- Μείωση ελαττωματικών τεμαχίων ( το λεγόμενο scrap )
- Μείωση της φθοράς των κοπτικών εργαλείων.
- Αύξηση της αποδοτικότητας της μηχανής μέσω της αύξησης του αριθμού των παραγόμενων τεμαχίων.
- Βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής της εργαλειομηχανής με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση περιόδου αδράνειας λόγω βλαβών.

Συνοψίζοντας τα οφέλη μιας σωστά ευθυγραμμισμένης μηχανής καταλήγουμε στο συμπέρασμα, ότι προσφέρει βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων με μείωση του κόστους παραγωγής τους.

### 3.8.3.3 Ευθυγραμμίσεις αξόνων –οπών.

Στην πλειοψηφία των εφαρμογών μετάδοσης κίνησης/ισχύος μεταξύ δύο ή περισσότερων μηχανημάτων χρησιμοποιούνται άξονες. Μερικές από αυτές είναι η σύνδεση μεταξύ:

- Αντλίας-Κινητήρα
- Φτερωτής-Συμπιεστή
- Μειωτήρων στροφών
- Τουρμπίνων



**Εικόνα 48.** Κάτω εικόνα χαρακτηριστικό πρόβλημα στην ένωση αξόνων το οποίο λύνεται με την ευθυγράμμιση όπως βλέπουμε στην ακριβώς από πάνω εικόνα.

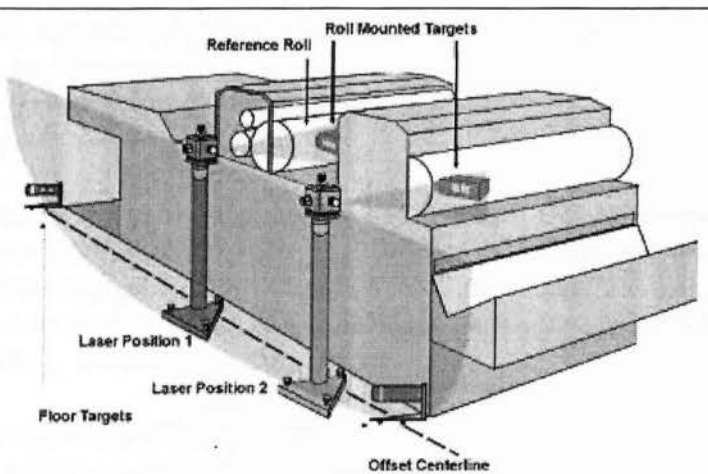
Η ακρίβεια ευθυγράμμισης των αξόνων σύνδεσης έχει πρωταρχικό ρόλο στην αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Σε αντίθετη περίπτωση τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πρόωρη φθορά των εδράνων, των στεγανοποιητικών συνδέσμων και αύξηση των κραδασμών. Τα οφέλη μιας σωστής ευθυγράμμισης είναι:

- Αύξηση βαθμού απόδοσης.
- Λειτουργία κινητήρων σε υψηλότερες στροφές.
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.
- Μείωση του κόστους συντήρησης.
- Μείωση της στάθμης θορύβου.

### 3.8.3.4 Κυλινδρομηχανές- Ραουλομηχανές.

Ακόμα μία αρκετά διαδεδομένη εφαρμογή είναι η ευθυγράμμιση μηχανών που φέρουν κυλίνδρους (ράουλα). Σε αυτές τις περιπτώσεις τα ράουλα θα πρέπει να είναι παράλληλα μεταξύ τους και φυσικά κάθετα στον άξονα της μηχανής. Ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογών είναι οι πρέσες τυπογραφίας, μηχανές κλωστοϋφαντουργίας, πρέσες διέλασης, χαλυβουργεία κ.α. Με τη χρήση των συστημάτων ευθυγράμμισης laser μπορούμε να ελέγξουμε τη παραλληλία μεταξύ των κυλίνδρων και να ρυθμίσουμε την απόσταση που πρέπει να έχουν μεταξύ τους. Λανθασμένη ρύθμιση παραλληλίας ραούλων έχει σοβαρά προβλήματα όπως:

- Παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων π.χ προϊόντα με ζάρες.
- Εξαγωγή περισσότερου προϊόντος από τη μια ή την άλλη πλευρά του κυλίνδρου.
- Υψηλούς χρόνους διακοπής της παραγωγής για επιδιόρθωση των προβλημάτων παραλληλίας της μηχανής.



Εικόνα 49. Μια συμβατική ραουλομηχανή .

Μια συμβατική μέθοδος ελέγχου παραλληλίας είναι οι θεοδόλιχοι. Συγκρίνοντάς τους με τα συστήματα laser παρατηρούμε ότι τα συστήματα laser υπερτερούν στα ακόλουθα σημεία:

- Ακρίβεια και ταχύτητα. Είναι έξι φορές πιο ακριβή και δύο φορές πιο ταχύτερα.
- Ευκολία χρήσης. Απαιτείται μόνο ένας τεχνικός για την ευθυγράμμιση όλου του συστήματος
- Παραγωγικότητα. Τα συστήματα laser μπορούν να ευθυγραμμίσουν κυλίνδρους που βρίσκονται σε απόσταση έως και 60 μέτρων ο ένας από τον άλλο.

### 3.8.3.5 Μονάδες ηλεκτροπαραγωγής για ευθυγράμμιση των στροβίλων.

Ένα ακόμα παράδειγμα όπου η ανάγκη για σωστή ευθυγράμμιση είναι επιτακτική είναι η εγκατάσταση ατμοστροβίλου.

Αν αυτός δεν ευθυγραμμιστεί με ακρίβεια στην πορεία θα εμφανιστούν τα εξής προβλήματα.



**Εικόνα 50.** Περιγραφή της προσπάθειας ευθυγράμμισης ενός ατμοστροβίλου.

- Απώλειες της παραγόμενης ενέργειας κατά τη μεταφορά.
- Μείωση του βαθμού απόδοσης.
- Διακοπή λειτουργίας. Για επισκευή των βλαβών.
- Καταστροφή του στροβίλου.

Είναι φανερό ότι σε αυτή την εφαρμογή απαιτούνται υψηλά επίπεδα ακρίβειας για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία. Τα συστήματα ευθυγράμμισης με χρήση laser διαθέτουν ακρίβεια έως 0.0025mm ακρίβεια και έχουν εμβέλεια μέχρι 50m. Τα πλεονεκτήματα αυτών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους ευθυγράμμισης όπως ευθύγραμμου νήματος, ελεγκτήρων φίλερ είναι:

- Μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης
- Μείωση χρόνου ευθυγράμμισης κατά 50%
- Μετρήσεις ανεπηρέαστες από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ θερμοκρασία)
- Εξάλειψη σφάλματος ανάγνωσης
- Απεικόνιση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο

Στατιστικά στοιχεία από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας αναφέρουν ότι ο χρόνος που χρειαζόταν ο ατμοστροβίλος για να σταματήσει να περιστρέφεται μετά από τη διακοπή λειτουργίας του ήταν 10 λεπτά πριν από την ευθυγράμμιση με το laser και 30 λεπτά μετά από τη χρήση του laser. Είναι φανερό λοιπόν και σε αυτή την εφαρμογή ότι μια σωστή ευθυγράμμιση βελτιώνει την απόδοση της μηχανής.

### **3.8.4 Χρήση laser σε εργαλειομηχανές.**

Μια αντίστοιχη λειτουργία της τεχνολογίας Laser, είναι εκείνη η οποία αναφέρεται στην λειτουργία των ειδικών μηχανημάτων στην βιομηχανία, όπως αντεστραμμένη φρέζα, φράζε ψηφιακής καθοδήγησης, βιομηχανικά δράπανα και πλάνες.

### 3.8.4.1 Ανεστραμμένη φρέζα.

Ξεκινώντας θα λέγαμε πως η ανεστραμμένη φρέζα με χρήση laser χρησιμοποιείται για την δημιουργία σύνθετων σχεδιάσεων, εσωτερικά διακοσμητικών διαμπερών τομών, οπών, επιμήκους εγκοπών και μορφοποιήσεων. Τα κύρια χαρακτηριστικά της ανεστραμμένης φρέζας είναι η μεγάλη ακρίβεια και η ασφάλεια του χειριστή κατά την διάρκεια της κατεργασίας. Τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της ανεστραμμένης φρέζας με χρήση laser είναι τα ακόλουθα:

- Τα κοπτικά μέσα εξέρχονται από την τράπεζα εργασίας ενώ ο αξονικός οδηγός από τον σκελετό του μηχανήματος.
- Το πρωτότυπο και ο αξονικός οδηγός είναι ορατός από τον χειριστή καθόλη τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Η καλύτερη σταθεροποίηση των κατεργαζόμενων ξυλοτεμαχίων και των κοπτικών μέσων δημιουργούν ομαλότερες συνθήκες κατεργασίας και κάνουν την εργασία ευκολότερη.
- Ο ρυθμιστής του βάθους κατεργασίας παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς χρησιμοποιεί ως σημείο αναφοράς το επίπεδο της τράπεζας εργασίας.
- Το σύστημα απομάκρυνσης των υπολειμμάτων κατεργασίας λειτουργεί μόνο με την βαρύτητα και συνεπώς περιορίζει την υπερθέρμανση των κοπτικών μέσων και εξασφαλίζει μεγαλύτερη ταχύτητα κατεργασίας. Η απομάκρυνση των υπολειμμάτων συντελεί στην κατεργασία συνεχώς ξυλώδους μάζας από τα κοπτικά μέσα και εξασφαλίζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Επίσης συμβάλλει στην καλύτερη ποιότητα της παράγομενης επιφάνειας. Η ταχύτητα περιστροφής των κοπτικών μέσων είναι 20000 στροφές /λεπτό.

### 3.8.4.2 Δράπανο

Κύριο μέρος του σώματος του δράπανου με χρήση laser είναι η άτρακτός του, η οποία περιστρέφεται και μαζί της περιστρέφει το τρυπάνι. Κάτω από την άτρακτο βρίσκεται ο μηχανισμός με τον οποίο συγκρατούμε τα κομμάτια που θέλουμε να τρυπήσουμε. Το δράπανο είναι εργαλειομηχανή που αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

- το σώμα, πάνω στο οποίο στηρίζονται και εργάζονται όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα,
- τον μηχανισμό συγκρατήσεως του τρυπανιού και
- τα μέσα συγκρατήσεως του κομματιού.

Το κομμάτι που θέλουμε να τρυπήσουμε το τοποθετούμε πάνω στο τραπέζι του δράπανου, όπου και το ασφαλίζουμε για την κατεργασία. Τα εξαρτήματα με τα οποία ανοίγουμε τις τρύπες είναι τα τρυπάνια. Υπάρχουν πολλά είδη, που κάνουν διαφορετικές δουλειές. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα ελικοειδή τρυπάνια.

### 3.8.4.3 Πλάνη

Τέλος, η πλάνη με χρήση laser είναι εργαλειομηχανή κοπής, την οποία χρησιμοποιούμε κυρίως για να πάρουμε υλικό από επίπεδες επιφάνειες. Η κατεργασία αυτή λέγεται πλάνισμα. Ανάλογα με το κατά πόσο η κίνηση στις πλάνες είναι οριζόντια ή κατακόρυφη οι πλάνες διαιρούνται σε οριζόντιες ή κατακόρυφες. Η πλάνη αποτελείται από τρία κύρια μέρη:

- το σώμα,
- την κεφαλή και
- το τραπέζι.

Το σώμα είναι κατασκευασμένο από χυτοσίδηρο, επάνω και μέσα σ' αυτό είναι τοποθετημένοι οι μηχανισμοί. Η κεφαλή βρίσκεται στο εσωτερικό και αποτελείται από ζεύγος γραναζιών. Ένα σημείο της κεφαλής, που ονομάζεται εργαλειοφορείο, φέρει το κοπτικό εργαλείο. Στο τραπέζι της πλάνης στερεώνουμε το κομμάτι που θα πλανίσουμε. Το εργαλείο κοπής στην πλάνη ονομάζεται χούφτα.

## 3.9 Εφαρμογές στην ιατρική

### 3.9.1 Γενικά

Μια από τις πλέον γρήγορα αναπτυσσόμενες περιοχές εφαρμογές των laser είναι η ιατρική. Πολλές ιατρικές εφαρμογές προκύπτουν απευθείας από τις δυνατότητες του laser για την επεξεργασία υλικών που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Παρομοίως πολλά από τα πλεονεκτήματα των laser σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους, προκύπτουν από την ακρίβεια και τη δυνατότητα ελέγχου που ελαχιστοποιούν την ταλαιπωρία και τις κακώσεις του ασθενούς και από τη δυνατότητα καθοδήγησης της δέσμης άρα και της ακτινοβολίας σε κάπως δυσπρόσιτες περιοχές του σώματος. Θα αρκεστούμε σε σύντομες περιγραφές σε όσο τον δυνατό περισσότερες εφαρμογές των laser στην ιατρική, μας και δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι το θέμα της πτυχιακής είναι η εφαρμογή στην βιομηχανία.

### Τομείς εφαρμογής

#### 3.9.2 Χειρουργική και Νευροχειρουργική

Η χειρουργική με ακτίνες είναι μια νέα και μοντέρνα μέθοδος που παρέχει σημαντικές δυνατότητες, ευκολίες και πλεονεκτήματα στο χειρουργό γιατρό, αλλά και στον ασθενή, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επεμβάσεων

Το laser παράγει ακτινοβολία υπέρυθρης δέσμης πολύς μεγάλης έντασης, που απορροφάται πλήρως από το νερό. Επειδή ο ιστός του ανθρώπινου σώματος περιέχει 75% μέχρι και 90% νερό, δημιουργείται εξάτμιση στο σημείο εστίασης, προκαλώντας

έτσι τομή , ενώ συγχρόνως σφραγίζει τα μικρά αιμοφόρα αγγεία. Η υψηλή ενέργεια κατά την εστίαση εξατμίζει το ιστό ακαριαία , προκαλεί ελάχιστη θερμική καταστροφή και παράλληλα αφήνει τον παρακείμενο ιστό σχεδόν άθικτο. Οι θεμελιώδεις ιδιότητες των laser στη χειρουργική είναι :

- Η ικανότητα διατομής.
- Η διείσδυση μέσα στο νερό.
- Η αιμοστατική ενέργεια.

Τα laser αυτά εκπέμπουν μονοχρωματική , σε φάση , και πολύ έντονη ακτίνα φωτός. Αυτό το υψηλής ενέργειας φως εξαερώνει τα κύτταρα , που συναντά και αποφράσσει όλα τα αιμοφόρα αγγεία με διάμετρο μικρότερη του 1mm. Έτσι συμβάλλει στη σημαντική ελάττωση της διεγχειρητικής και προφανώς της μετεγχειρητικής αιμορραγίας. Κάτι τέτοιο είναι εμφανές σε εγχειρήσεις του ήπατος , των νεφρών και άλλων αγγιοβριθών οργάνων , καθώς και σε επεμβάσεις σε αιμορροφιλικά άτομα.

*Τα πλεονεκτήματα λοιπόν των Laser είναι:*

- Μείωση του συνολικού εγχειρητικού χρόνου και της αιμορραγίας
- Μείωση των πιθανοτήτων σχηματισμού μεταγχειρητικού αιματώματος και νεκρικών ιστών.
- Σε κακοήθειες νεοπλασίες μείωση των πιθανοτήτων διασποράς κυττάρων.
- Επιτάχυνση της επουλώσεως και μείωση του μετεγχειρητικού πόνου και, ενδεχομένως, μείωση του χρόνου νοσηλείας του ασθενούς.
- Αποφυγή ηλεκτρικής παρεμβολής όπως για παράδειγμα ασθενών με βηματοδότη και σύγχρονη χρήση χειρουργικής θερμοπηξίας.

*Τα μειονεκτήματα των Laser είναι :*

- Επιβράδυνση του χρόνου προσπελάσεως και σχετική ασάφεια κατά τον προσδιορισμό των διαφόρων ανατομικών επιπέδων.
- Δημιουργία καπνού από την εξαέρωση των ιστών.
- Χρησιμοποίηση από το χειρουργό μόνο της αισθήσεως της όρασης και όχι της αφής και πίεσεως, όπως κατά την κλασική εγχειρητική προσπέλαση
- Απαιτείται υψηλό επίπεδο εκπαίδευσης του χειρουργού στη χρήση των laser καθώς και ορισμένα μέτρα ασφάλειας

### 3.9.3 Οφθαλμολογία

Η χρήση ισχυρής φωτεινής ακτινοβολίας για να δημιουργηθεί ένα έγκαυμα λόγω φωτοπηξίας στον ανθρώπινο οφθαλμό είναι μια σημαντική διαδικασία. Είναι άλλωστε γνωστό εδώ και χιλιάδες χρόνια ότι το ισχυρό φως του ήλιου μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον ανθρώπινο οφθαλμό.

Οι Eccles και Flynn το 1944 έκαναν μια από τις πρώτες προσπάθειες να προσδιορίσουν ποσοτικά τις αναγκαίες παραμέτρους έκθεσης στην ακτινοβολία, που παρά-

γουν εγκαύματα σε ιστούς του αμφιβληστροειδή. Περίπου την ίδια εποχή, προς το τέλος της δεκαετίας του 1940, ένας οφθαλμίατρος, ο Meyer-Schwickerath άρχισε να ερευνά το πώς η φωτοπηξία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για κάποιες παθολογικές περιπτώσεις του αμφιβληστροειδή. Σε μια πρώτη προσπάθεια, χρησιμοποίησε τον ήλιο ως φωτεινή πηγή και δημιούργησε χοριοαμφιβληστροειδικά εγκαύματα, γύρω από οπές του αμφιβληστροειδή, σε μια επιτυχημένη του προσπάθεια να προλάβει την αποκόλληση του αμφιβληστροειδή. Μετέπειτα, σε συνεργασία με φυσικούς ανέπτυξαν και παρήγαγαν το φημισμένο μηχάνημα φωτοπηξίας Zeiss. Το όργανο αυτό βασίζονταν σε μια λυχνία ξένου υψηλής πίεσης, μέσα στην οποία δημιουργούνταν μια ακτίνα φωτός η οποία αποτελούσε την εποχή εκείνη την πιο ισχυρή γνωστή πηγή φωτός.

Η νέα αυτή συσκευή χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία από τους οφθαλμιάτρους, καθώς τους έδινε τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουν μια σειρά παθολογικών περιπτώσεων, οι οποίες σε διαφορετική περίπτωση δεν θα μπορούσαν να θεραπευτούν. Ένα από τα αρνητικά στοιχεία στη χρήση της συσκευής ήταν ότι, παρά τη μεγάλη ισχύ της δέσμης της, ο χρόνος που απαιτούνταν για να δημιουργηθεί ένα έγκαυμα ήταν μέχρι και 1.5 sec. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου ο ασθενής έπαινε να αποστρέψει τον οφθαλμό του λόγω πόνου και έτσι υπήρχε ανάγκη χρήσης αναισθητικού. Ένα άλλο μειονέκτημα ήταν η μάλλον ευρεία δέσμη την οποία παρείχε η συσκευή και έπρεπε να δίνεται μεγάλη προσοχή στο να μη γίνει υπερβολική φωτοπηξία. Δεν υπήρχε διάφραγμα, χρονικά βαθμονομημένο, το οποίο θα επέτρεπε τη διέλευση από αυτό ενός συγκεκριμένου ποσού ενέργειας. Αντιθέτως, θα έπρεπε ο χειριστής της συσκευής να κρίνει τη διάρκεια της έκθεσης για κάθε παλμό, κάτι που έκανε την φωτοπηξία μια πολύ λεπτή επέμβαση.

### 3.9.4 Δερματολογία

Μετά την πρώτη εμφάνιση των laser πραγματοποιήθηκαν πολλές έρευνες σε πειραματόζωα και έγινε αντιληπτό ότι το δέρμα είναι κατάλληλο για τη δράση της δέσμης του laser. Το 1968 οι Solomon et al ανακοίνωσαν την «Ιστοπαθολογία της θεραπείας με laser των ερυθροχρωματικών κηλίδων, παρουσίασαν μελέτες βιοψίας ακτινοβοληθέντων περιοχών, έως και τρία χρόνια μετά την επίδραση του laser». Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε με παλμικό laser ρουμπινίου, το οποίο τώρα έχει αντικατασταθεί στις περισσότερες ιατρικές εφαρμογές από laser συνεχούς λειτουργίας, κυρίως Nd-YAG, CO2 και laser αργού

Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν την επόμενη δεκαετία είχαν ως αντικείμενο την αντιμετώπιση με laser αργού των μονοχρωματικών κηλίδων και άλλων αγγειακών ανωμαλιών του δέρματος. Αν και το laser αυτό καθιερώθηκε για την αντιμετώπιση των παθήσεων αυτών υπήρξαν κάποιες πειραματικές εργασίες, που πραγματοποιήθηκαν την ίδια περίοδο (1970-1980), οι οποίες απέδειξαν ότι το laser χρωστικών ρυθμιζόμενου μήκους κύματος είναι καλύτερο στην επιλεκτική καταστροφή αιμοφόρων αγγείων του δέρματος. Όμως απαιτούνται κλινικές δοκιμές για να δείξουν αν το laser χρωστικών μπορεί να δώσει καλύτερα κλινικά αποτελέσματα

Η ακρίβεια είναι αυτή που έχει αναδείξει το laser ως ενεργό εργαλείο στον τομέα της δερματολογίας. Όταν μια δέσμη laser κατευθύνεται στο δέρμα, απορροφάται από το νερό, από φυσικές χρωστικές ουσίες όπως η μελανίνη και η αιμογλοβίνη. Απορροφάται επίσης από τις τεχνητές χρωστικές ουσίες που εισάγονται στο δέρμα με τη βοήθεια των tattoo. Τα laser προκαλούν ακριβή καταστροφή ιστού στην περιοχή εστίασης, προκαλώντας τελικά την εξάτμιση του ιστού και αφήνοντας άθικτο τον περι-



βάλλοντα ιστό. Η εξάτμιση του ιστού ολοκληρώνεται καλύτερα όταν οι χρόνοι έκθεσης είναι μικρότεροι από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου. Επιπλέον, 5 J/cm<sup>2</sup> ενέργειας απαιτούνται για την υπέρβαση του κατώτατου ορίου εξάτμισης του στοχευόμενου δέρματος. Ο συνδυασμός δύο διαφορετικών τεχνολογιών laser διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να δώσει αυτήν την ικανοποιητική ενέργεια. Η μια τεχνολογία περιλαμβάνει τη χρήση ενός μικρού παλμού για να δώσει την ενέργεια στον ιστό ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί ένα ελεγχόμενο παλμό από ένα σύστημα, το οποίο ανιχνεύει μια ακτίνα συνεχών κυμάτων τόσο γρήγορα ώστε το εκπεμπόμενο φως δεν έρχεται σε επαφή με το δέρμα για περισσότερο από 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου

Ενώ κατά καιρούς διαφορετικά συστήματα laser έχουν χρησιμοποιηθεί και μελετηθεί, καμία συναίνεση δεν έχει επιτευχθεί σχετικά με τις βέλτιστες παραμέτρους χρήσης των laser σε κλινικό πλαίσιο. Οι περισσότεροι χειρουργοί χρησιμοποιούν την εμπειρία τους και την εμπειρία άλλων ως καθοδήγηση στον καθορισμό των παραμέτρων που πρέπει να χρησιμοποιούν σε κάθε περίπτωση

### 3.9.5 Γυναικολογία

Ο ρόλος του laser CO<sub>2</sub> (διοξειδίου του άνθρακα) στην αντιμετώπιση ευρείας κλίμακας γυναικολογικών παθήσεων έχει μελετηθεί εκτεταμένα εδώ και αρκετά χρόνια και τώρα πλέον τα laser βρίσκονται σε συστηματική κλινική χρήση σε πολλές γυναικολογικές κλινικές. Μια ξεχωριστή και πολύ σημαντική εφαρμογή του laser CO<sub>2</sub> βρίσκεται στο χειρισμό της τραχηλικής ενδοεπιθηλιακής νεοπλασίας (CIN, Cervical Intraepithelial Neoplasia) και αρκετοί το θεωρούν ως θεραπεία εκλογής γι'αυτήν την πάθηση. Όλα τα χαρακτηριστικά της καταστροφής των ιστών με laser CO<sub>2</sub> έχουν μεγάλη σημασία για την τοπική εξαίρεση της CIN του τραχήλου. Αυτό το laser παράγει υπέρυθρο σύμφωνο φως στα 10600 nm, το οποίο απορροφάται από το νερό και επομένως από τους ιστούς του τραχήλου που περιέχουν 70-90% νερό. Η καταστροφή των ιστών είναι άμεση, οφείλεται δε σε εξάτμιση των κυττάρων, η οποία πραγματοποιείται στους 100°C. Αυτή η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και η μικρή θερμική αγωγιμότητα των ιστών, σημαίνει ότι υπάρχει ένα εξαιρετικά λεπτό στρώμα κατεστραμμένων κυττάρων μεταξύ της τομής του laser και των υπόλοιπων φυσιολογικών ιστών. Το laser CO<sub>2</sub> συνδέεται πάντα με ένα κολποσκόπιο

Με τη χρήση του laser CO<sub>2</sub> επιτυγχάνεται ακριβής, ουσιαστικά αναίμακτη καταστροφή, με εξαιρετικά χαμηλή νοσηρότητα και έχουν αναφερθεί πολύ καλά αποτελέσματα. Το laser CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να εξατμίσει ή να αφαιρέσει διάφορες αλλοιώσεις του αιδοίου και του κόλπου

Το laser CO<sub>2</sub> έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στη θεραπεία της ενδομητρίωσης. Για τη θεραπεία ενδομητριακών βλαβών έχει αναπτυχθεί ένα υστεροσκόπιο κατάλληλο για laser CO<sub>2</sub> ενώ πολλοί ασθενείς με μηνορραγία αντιμετωπιστήκαν μέσω υστεροσκοπίου με laser Nd-YAG

### 3.9.6 Γαστρεντερολογία

Η πρώτη εφαρμογή των ακτινών laser στη γαστρεντερολογία έγινε το 1974. Οι γαστρεντερολόγοι έχουν σήμερα στη διάθεση τους μια μεγάλη ποικιλία ενδοσκοπίων με

εύκαμπτες οπτικές ίνες μέσω των οποίων μπορούν να εξετάσουν κάθε τμήμα της γαστρεντερικής οδού. Τρία είδη laser έχουν χρησιμοποιηθεί: το laser ιόντων αργού, το Nd-YAG laser και σε μικρότερο βαθμό το laser CO<sub>2</sub>. Η ακτίνα του laser μεταδίδεται μέσω της οπτικής ίνας του ενδοσκοπίου. Αφού αυτή αποκλίνει από το τέλος της ίνας, το μέγεθος του σημείου εστίασης και η ένταση της ακτίνας εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του στοχευόμενου ιστού και της άκρης της ίνας. Μια ικανοποιητική ροή CO<sub>2</sub> ή N<sub>2</sub> μέσω του ενδοσκοπίου κρατάει το αίμα μακριά από τα αγγεία και απομακρύνει τα εκκρίματα από την άκρη της ίνας. Επιπλέον, το εύκαμπτο γαστρεντερικό ενδοσκόπιο είναι παρόμοιο με το βρογχοσκόπιο οπτικών ινών, κατά το γεγονός ότι είναι βασικά ένα διαγνωστικό παρά ένα θεραπευτικό εργαλείο

Ο ρόλος των laser στη γαστρεντερολογία θα θεωρηθεί κάτω από τους παρακάτω τίτλους:

- Έλεγχος αιμορραγίας του ανώτερου πεπτικού.
- Αγγειακές αλλοιώσεις του γαστρεντερικού.
- Παρηγορητική θεραπεία καρκινωμάτων του οισοφάγου
- Χοληφόρος οδός
- Αντιμετώπιση γαστρικών όγκων
- Παχύ έντερο

### 3.9.7 Ωτολαρυγγολογία

Τα τελευταία χρόνια καθιερώθηκε πλέον ο ρόλος του laser CO<sub>2</sub> στη μικροχειρουργική του λάρυγγα, όπου προσφέρει πολλά και επιστημονικά αποδεδειγμένα πλεονεκτήματα και στο χειρουργό και στον ασθενή. Αυτό το laser έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση αλλοιώσεων από τη στοματική κοιλότητα και τη γλώσσα. Στην ωτολογία, το laser αργού έχει χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση μικροχειρουργικών επεμβάσεων ακριβείας χωρίς επαφή στο τύμπανο.

### 3.9.8 Ουρολογία

Οι μοντέρνες ηλεκτροχειρουργικές τεχνικές είναι πολύ επιτυχημένες στην πλειοψηφία των περιστατικών και είναι δύσκολο να δείξει κανείς ότι τα lasers προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, έναντι αυτών, στην αντιμετώπιση των ουρολογικών παθήσεων. Εντούτοις, υπάρχουν πολλές περιοχές, στις οποίες τα lasers έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, το CO<sub>2</sub> laser προσφέρει οφέλη στη θεραπεία ορισμένων εντοπισμένων αλλοιώσεων των εξωτερικών γεννητικών οργάνων και ιδιαίτερα των πολλαπλών αλλοιώσεων των οξυτενών κονδυλωμάτων, ενώ το Nd-YAG laser και το laser αργού έχουν χρησιμοποιηθεί στη θεραπεία της στένωσης της ουρήθρας. Η πολυετής έρευνα ήταν αυτή που έδειξε ότι η χρήση του Nd-YAG laser στα επιφανειακά καρκινώματα είναι ανώτερη από τις κλασικές μεθόδους αντιμετώπι-

σής τους. Το laser όμως δεν επιφέρει αποτελέσματα μόνο στην καταστροφή των όγκων αλλά και στη λιθοτριψία και αυτή των εγκλωβισμένων στον ουρητήρα πετρών.

### 3.9.9Κυτταρολογία

Μια επαναστατική χειροπιαστή συσκευή laser η οποία μπορεί να ανιχνεύσει και μετά να εντοπίσει τυχόν διαταραχές στο αίμα έχει αρχικά κατασκευαστεί από επιστήμονες στο Εθνικό Εργαστήριο της Sandia και το Εθνικό Ινστιτούτο Υγείας των Η.Π.Α. Ο σαρωτής που αντιμετωπίζει τα δείγματα του αίματος ως μέρος της και μικροσκοπικές αλλαγές στις δομές των κυττάρων. Η συσκευή που ονομάζεται βιοσυμβατό laser, είναι ικανή να διακρίνει τα καρκινογόνα από τα μη καρκινογόνα κύτταρα καλύτερα και από το τεστ Παπανικολάου, το οποίο αναλύει οπτικά, μόνο μικρούς αριθμούς κυττάρων. Η συσκευή επίσης μπορεί να επιτρέψει στους παρατηρητές να παρακολουθήσουν ανεξέλεγκτες κυτταρικές αναπτύξεις δηλαδή καρκίνο, καθώς και θάνατο κυττάρων την ώρα που συμβαίνει. Μάλιστα η αυτοκαταστροφή κυττάρων θεωρείται ιδέα αποβολής ανεπιθύμητων ιστών και βοήθεια για την ορθή ανάπτυξη οργάνων, μελών και νευρώνων. Για θύματα από τρομοκρατικές βιολογικές και χημικές επιθέσεις, η κινητή μονάδα αναμένεται να μειώσει σημαντικά το χρόνο που χρειάζεται για να αναλυθούν τυχών επικίνδυνα εισβάλλοντα στο αίμα, υλικά, αφού η διάγνωση γίνεται επί τόπου. Αυτό σημαίνει γρηγορότερη αγωγή και περίθαλψη, όταν η ταχύτητα είναι κρίσιμη. Η χρησιμοποίηση της συσκευής δίνει τέλος στις καθυστερήσεις αναλύσεων των ασθενών στα νοσοκομεία. Χρησιμοποιώντας την είναι δυνατό να παρθεί ένα δείγμα αίματος που περιέχει εκατομμύρια κύτταρα και να αποσπαστούν πληροφορίες για κάθε ένα από αυτά σε λίγα λεπτά. Τα αποτελέσματα είναι ποσοτικά. Αν τα κύτταρα δεν είναι καρκινογόνα, τότε παίρνουμε ένα σταθερό φωτεινό σήμα. Ένα καρκινογόνο κύτταρο όμως, δίνει αναλαμπή σε διαφορετικό μήκος κύματος. Η συσκευή συνδυάζει ημιαγωγό και βιολογικό υλικό για να λειτουργήσει, περνώντας τα υγρά σε ένα μικροεργαστήριο και βγάζοντας τα αποτελέσματα επί τόπου. Επίσης, χρησιμοποιείται μια άλλη συσκευή laser, που ονομάζεται VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) που παράγει εκατομμύρια μικροσκοπικές δέσμες ακτινοβολίας laser από μια περιοχή περίπου στο μέγεθος του γραμματοσήμου.

## Γ ΜΕΡΟΣ

### Προστασία από laser

## Προστασία από την χρήση laser

### 4.1 Γενικά

Τα Laser είναι παντού. Σχεδόν καθημερινά ερχόμαστε κοντά στα ταμεία μεγάλων εμπορικών καταστημάτων ή σούπερ μάρκετ, όπου οι σαρωτές laser «διαβάζουν» το προϊόν και περνούν τη τιμή του στην απόδειξη. Δείκτες laser «δουλεύουν» καθημερινά σε αίθουσες διδασκαλίας και συνεδρίων. «Κρυμμένες» δέσμες laser εργάζονται πυρετωδώς σε εκτυπωτές και κυρίως σε συσκευές αναπαραγωγής ψηφιακών δεδομένων και μουσικής (CD). Ισχυρότερα laser συναντάμε σε εργαστήρια Φυσικής σε ιατρικά μηχανήματα και στην βιομηχανία.

Πρότυπα ασφάλειας κατανέμουν τις συσκευές laser σε ομάδες ανάλογα με τις ιδιότητες της ακτινοβολίας τους:

- μήκος κύματος
- ισχύς εξόδου
- διάρκεια παλμών κλπ.

Αυτά τα πρότυπα αναπροσαρμόζονται κάθε λίγα χρόνια, καθώς οι γνώσεις, οι εμπειρίες και οι νέες εφαρμογές πολλαπλασιάζονται.

### 4.2 Κίνδυνοι από την χρήση laser

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

- **Άμεση έκθεση:** Τα μάτια και το δέρμα εκτίθενται άμεσα στο σύνολο ή σε μέρος της δέσμης της ακτινοβολίας
- **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 πυκνότητας ενέργειας ωστόσο αυξάνεται η επιφάνεια έκθεσης.
- **Έκθεση από διάχυση :** Η επιφάνεια διάχυσης μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε ανακλά τη δέσμη σε πολλές κατευθύνσεις, όπως για παράδειγμα τα μεταλλικά εργαλεία. Οι ανακλώμενες φέρουν μόνο ένα μέρος – ποσοστό της ισχύος της δέσμης laser παρόλα αυτά παραμένουν επικίνδυνες ιδίως για laser υψηλής ισχύος. Διαρροές ακτινοβολίας τέτοιου είδους είναι πιο συνηθισμένες και εντοπίζονται δύσκολα.

Για να ανακλά μια 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, μια επιφάνεια που διαχέει το ορατό φως μπορεί να αποτελεί κάτοπτρο για το υπέρυθρο.

Όταν μια 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 όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και στο παρακάτω σχήμα (48).



Σχήμα 48. Σχηματική παράσταση του φαινομένου της σκέδασης στον ιστό.

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 της 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 – στόχους, 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 δυο κύρια όργανα – πύλες εισόδου της ακτινοβολίας laser στο σώμα, τους οφθαλμούς και το δέμα.

#### 4.2.1 Θερμική αλληλεπίδραση.

Όταν η θερμοκρασία στον ιστό φτάσει τους  $45^{\circ}\text{C}$ , 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

βιολογική 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  $60^{\circ}\text{C}$  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 ακτινοβολουμένης επιφάνειας. Στην ουσία έχουμε βασικές αλλαγές στη δομή του ιστού που οδηγούν σε αυξανόμενη σκέδαση και πολλαπλές διαθλάσεις και ανακλάσεις της ακτινοβολίας. Αποτέλεσμα της ανάκλασης όλων των ορατών μήκων κύματος του φωτός είναι η λεύκανση που παρατηρούμε σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Οι αλλαγές αυτές στη δομή που αναφερθήκαμε 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  $60^{\circ}\text{C}$  η δομή της τριπλής έλικας καταστρέφεται και οι αλυσίδες παίρνουν τυχαίες θέσεις.

Εάν η θερμοκρασία φτάσει τους  $100^{\circ}\text{C}$  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 την μεταβολή, λοιπόν, του υγρού νερού σε ατμό ο όγκος των κυττάρων αυξάνεται κατά χίλιες φορές και προκειμένου ο ατμός να βρει τρόπο διαφυγής, γίνεται μια μορφή έκρηξης που καταστρέφει τα τοιχώματα τους. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας δημιουργεί περισσότερους ατμούς.

Όταν όλο το νερό του κυττάρου εξαφανιστεί, το υπόλοιπο του κυττάρου ανεβάζει κι άλλο τη θερμοκρασία του πολύ γρήγορα μέχρι να φτάσει στους  $300^{\circ}\text{C}$  με  $400^{\circ}\text{C}$  τότε ο ιστός μαυρίζει και απανθρακώνεται με παράλληλη παραγωγή ατμών και καπνού. Πάνω από τους  $500^{\circ}\text{C}$  και με την παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου, ο ιστός καίγεται και εξαχνώνεται. Αξίζει να παρατηρηθεί πως η διάχυση της θερμοκρασίας και συνεπώς η καταστροφή του ιστού περιορίζεται 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 αλληλεπίδραση 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 και ένας παλμός χαμηλής ενέργειας θα δώσει μεγάλη πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας, της τάξης των  $10^{16}\text{W/m}^2$  για παλμό διάρκειας 100ps. Σε τέτοιες πυκνότητες έχουμε τη δημιουργία πλάσματος.

#### 4.2.2 Φωτομηχανική αλληλεπίδραση

Το φωτοχημικό 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 και όταν συσσωρευτεί 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 συγκρούσεις ηλεκτρονίων, έχουν ως αποτέλεσμα τον εύκολο ιονισμό αυτών 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, δηλαδή η δημιουργία πλάσματος που οδηγεί σε υδροδυναμικό κρουστικό κύμα (shock wave) που αρχικά διαδίδεται με υπερηχητική ταχύτητα είναι γνωστή ως φωτο-διηλεκτρική διάσπαση.

Κατά το φωτοχημικό φαινόμενο μπορεί να έχουμε πρόσκληση μηχανικού κύματος και με φωτο-εκρηκτική εξάτμιση ή με θερμό-ελαστική διαδικασία. Κατά τη φωτό-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.

Θερμό-ελαστική διαδικασία έχουμε όταν η φωτεινή ενέργεια laser απορροφάται από ορισμένη μάζα και 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.

#### 4.2.3 Φωτοχημική αλληλεπίδραση

Κατά το φωτοχημικό φαινόμενο έχουμε απορρόφηση ενός ή περισσότερων φωτονίων από τα μόρια του ιστού, την διέγερση 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.



#### 4.2.4 Αποδόμηση βιολογικών ιστών από την ακτινοβολία laser

Παράλληλα με τις αναφορές στις άμεσες συνέπειες 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.

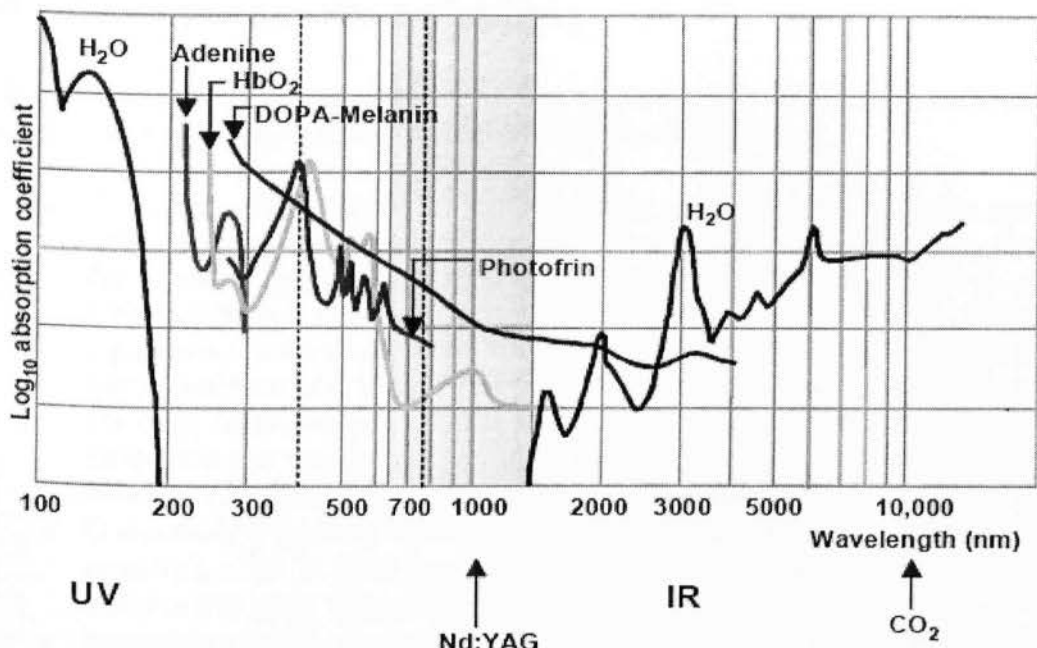
Οι επιπτώσεις διαφέρουν ανάλογα με το είδος του laser στο οποίο εκτίθεται ο ιστός. Η έκθεση σε παλμικό laser επιτρέπει την ψύξη των ιστών στα διαστήματα ανάμεσα στους παλμούς και έτσι ελαττώνεται η βλάβη που θα μπορούσε να προκληθεί στους παρακείμενους ιστούς, αφού η θερμική καταστροφή είναι συνάρτηση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

Ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης προκύπτει αν εξισώσουμε το μήκος της θερμικής διάχυσης με το οπτικό μήκος διείσδυσης. Στην περίπτωση που ο χρόνος θερμικής αποκατάστασης είναι μικρότερος από τη διάρκεια του παλμού, τότε η θερμότητα παγιδεύεται στον όγκο που ορίζεται από την ακτινοβολούμενη 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 και μεν επιταχύνει τη διαδικασία 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 μπορεί το ποσοστό να φτάσει και το 70%. Η περιεκτικότητα του ιστού σε νερό καθορίζει τις οπτικές και τις θερμικές ιδιότητες του.

Εκτός βέβαια, από το νερό, η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται και από το φάσμα απορρόφησης ορισμένων χρωμοφόρων μορίων –συστατικών του ιστού– στόχου, όσο και από τη συγκέντρωσή τους. Για παράδειγμα η ορατή ακτινοβολία απορροφάται έντονα από την αιμοσφαιρίνη, τη μελανίνη και άλλα χρωμοφόρα συστατικά. Οι πρωτεΐνες απορροφούν έντονα την υπεριώδη ακτινοβολία ενώ στο διάστημα 700nm με 900nm παρατηρείται ελάχιστη απορρόφηση και μέγιστο βάθος διείσδυσης στους ιστούς (οπτικό παράθυρο).

Για την υπέρυθη ακτινοβολία έχουμε απορρόφηση της από τον υδροξυαπαιπιτη και το κολλαγόνο. Στο παρακάτω σχήμα(58) φαίνεται το φάσμα της απορρόφησης των πρωτεϊνών, των βιομορίων (μελανίνη αιμοσφαιρίνη) και του νερού συναρτήσεως του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, καθώς και το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπουν δυο από τις πιο συχνά χρησιμοποιημένες πηγές laser.



Σχήμα 49. Διάγραμμα συντελεστή απορρόφησης από χρωμοφόρα (νερό, αδενίνη, αιμοσφαιρίνη, μελανίνη) συναρτήσει του μήκους κύματος. Διακεκομμένες : ορατό, Γκρι : οπτικό παράθυρο δέρματος.

### 4.3 Τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας Laser.

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο αυτής της πτυχιακής το φως Laser είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και η διαφορά του με το κοινό φως είναι:

- η μονοχρωματικότητα
- η μεγάλη πυκνότητα ισχύος (ένταση ανά μονάδα κάθετης επιφάνειας)
- η συμφασικότητα (για την οποία όμως δεν υπάρχουν γνωστές βιολογικές επιδράσεις)

Κατά τη διάδοση του φωτός Laser, όπως και για το κοινό φως, ισχύουν:

- η πορεία σε ομοιογενές μέσο είναι ευθύγραμμη
- όταν προσπέσει σε επιφάνεια διαφορετικού μέσου, θα συμβεί, ανάκλαση:
  - κλασική (πρόσπτωση σε λεία επιφάνεια, γωνία πρόσπτωσης ίση με γωνία ανάκλασης και η δέσμη παραμένει συγκεντρωμένη)
  - διαχέουσα (πρόσπτωση σε αδρή επιφάνεια και η δέσμη ανακλάται, αλλά σκεδάζεται)
  - διάθλαση (η δέσμη εισχωρεί στο δεύτερο μέσον, αλλά αλλάζει η διεύθυνσή της (νόμος του Snell). Στη διάθλαση οφείλεται η συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα συμπεριφορά των φακών (εστίαση) και των πρισμάτων.

## 4.4 Δέσμη Laser και οφθαλμός

Ο οφθαλμικός βολβός αποτελεί κοιλότητα σφαιροειδούς σχήματος και διαμέτρου περίπου 24mm. Το τοίχωμα του αποτελείται από τρεις χιτώνες.

- 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. Αποτελεί το ισχυρότερο διαθλαστικό μέσο του ματιού και προσφέρει τα δυο τρίτα της συνολικής διαθλαστικής ισχύος του ματιού. Η μεγάλη διαθλαστική ισχύς του κερατοειδούς οφείλεται στη μεγάλη κυρτότητα του και στο γεγονός ότι η πρόσθια επιφάνεια του χωρίζει σε δυο οπτικά μέσα με μεγάλη διαφορά στον δείκτη διάθλασης, τον αέρα από την ίδια ουσία του κερατοειδούς.
- Ο αγγειώδης χιτώνας αποτελείται από τη ίριδα , το ακτινωτό σώμα και το χοριοειδή χιτώνα. Η ίριδα χωρίζει τον πρόσθιο από τον οπίσθιο θάλαμο του ματιού και στο μέσο της υπάρχει μια οπή , η κόρη.
- Αμφιβληστροειδής χιτώνας αποτελεί τον αισθητήριο χιτώνα του ματιού , διότι σε αυτόν βρίσκονται οι φωτουποδοχείς. 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 το αποτέλεσμα της ευπλαστότητας 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 (το υαλώδες σώμα και το υδατοειδές υγρό) που έχουν μεγάλες διαφορές στον δείκτη διάθλασης.

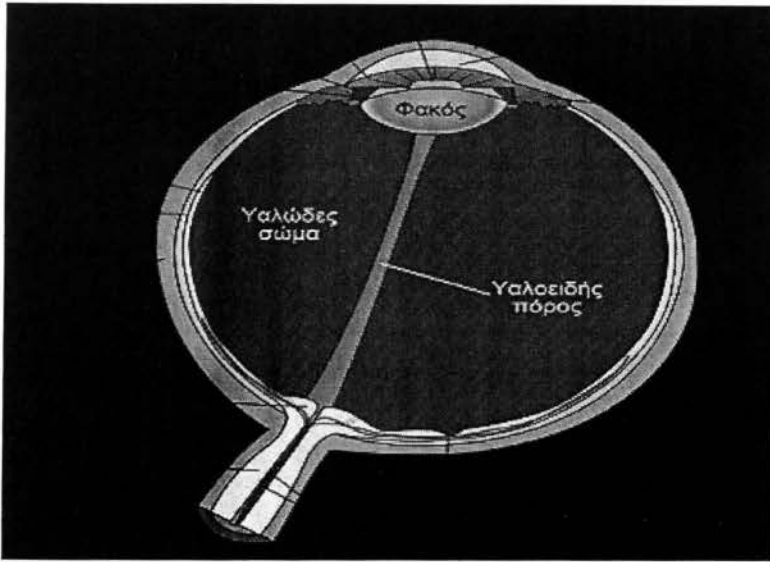
Το υαλώδες σώμα ή υαλοειδές αποτελεί μια ηλεκτρική διαφανή μάζα που γεμίζει την κοιλότητα του ματιού πίσω από τον φακό, αποτελείται από δίκτυο κολλαγόνων ινών και τα διάκενα τους πληρούνται από υαλουρονικό οξύ. Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να δούμε τα διάφορα μέρη του ματιού.

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 στο πρόσθιο θάλαμο, από όπου και επάγεται μέσω της γωνίας του πρόσθιου θαλάμου. Συμμετέχει στην διατροφή του φακού και του κερατοειδούς.

Μια δέσμη φωτονίων που προσπίπτει στο μάτι εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή, αφού πρώτα 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 +60D (η διαθλαστική ισχύς

ορίζεται ως αντίστροφο της εστιακής απόστασης σε μέτρα και εκφράζεται σε διόπτρες, D.

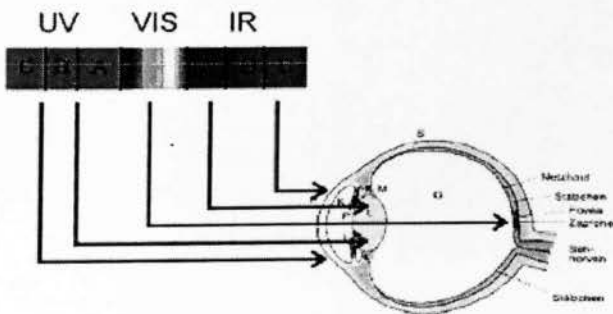


Εικόνα 51. Διάφορα μέρη του οφθαλμού.

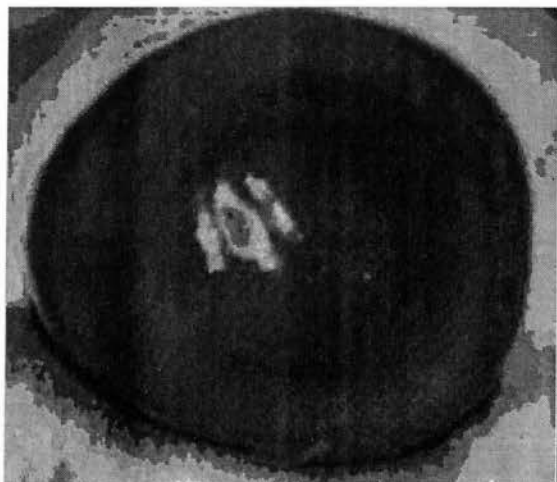
Η ακτινοβολία έχει την μεγαλύτερη της επίδραση στις περιοχές στις οποίες απορροφάται έντονα. Το πόσο βαθιά και που θα επιδράσει περισσότερο εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διείσδυση συναρτήσει του τύπου της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

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

Πίνακας 5. Περιγραφή της διεισδυτικής ικανότητας ανάλογα με τον τύπο ακτινοβολίας.



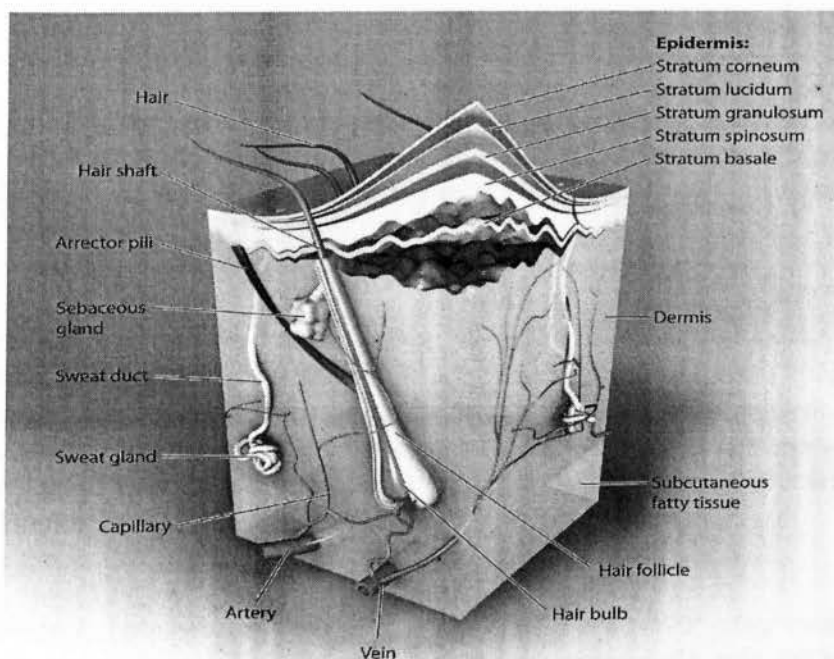
Εικόνα 52. Σχηματική παράσταση της απορρόφησης της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας στα διάφορα μέρη του ματιού.



Εικόνα 53. Φωτικερατίτιδα από laser CO<sub>2</sub>.

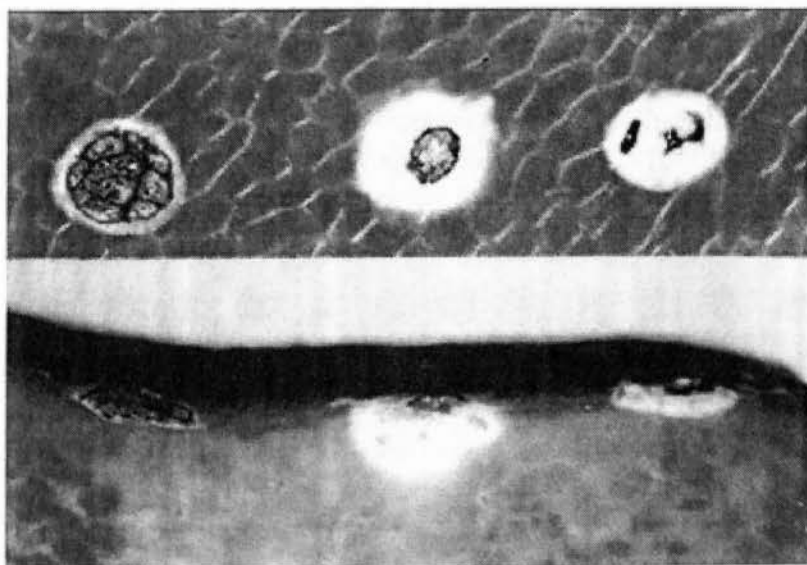
## 4.5 Δέσμη laser και δέρμα

Το δέρμα είναι το μεγαλύτερο όργανο του σώματος με μέση επιφάνεια περίπου 2m<sup>2</sup> και βάρος ίσο με 4kg. Το δέρμα έχει δυο 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 εξαρτήματα του, τα οποία είναι οι αδένες, οι τρίχες και τα νύχια.



Εικόνα 54. Τρισδιάστατη απεικόνιση των στρωμάτων του δέρματος όπου διακρίνονται τα 2 κύρια μέρη επιδερμίδα και χόριο

Στην επιδερμίδα βρίσκονται τα κύτταρα της κερατίνης, τα οποία προσδίδουν στο δέρμα την αδιαπερατότητα του, τα μαλανοκύτταρα, τα οποία παράγουν την μελανίνη κ. α. Το χόριο αποτελείται από ίνες κολλαγόνου ελαστικές ίνες και δικτυωτές ίνες. Οι πρώτες είναι υπεύθυνες για τη 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 στην βιομηχανία (CO<sub>2</sub>, Nd:YAG) περίπου το 99% της ενέργειας θα απορροφηθεί στα πρώτα 4mm του δερματικού ιστού.



Εικόνα 55. Έγκαυμα από CO<sub>2</sub>, Nd:YAG και Argon-ion lasers

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το δέρμα οφείλεται στην απορρόφηση της από τα λεγόμενα χρωμοφόρα, ουσίες δηλαδή που περιέχονται στο 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 απορρόφηση της από την μελανίνη. Η χημική δομή της είναι άγνωστη και γι' αυτό δεν μπορεί να μελετηθεί ή να αναπαραχθεί. Το φάσμα απορρόφησης της ανήκει στο υπεριώδες και ότι εξασθενεί το φως με ρυθμό του  $\lambda^{-4}$  χαρακτηριστικό της σκέδασης Rayleigh.

**Κερατίνη:** Η κερατίνη είναι μια ινώδη πρωτεΐνη που βρίσκεται στην επιδερμίδα. Παράγεται μέσα στα κερατινοκύτταρα και έχει φάσμα εκπομπής στα 460nm όταν διεγείρεται στα 370nm.

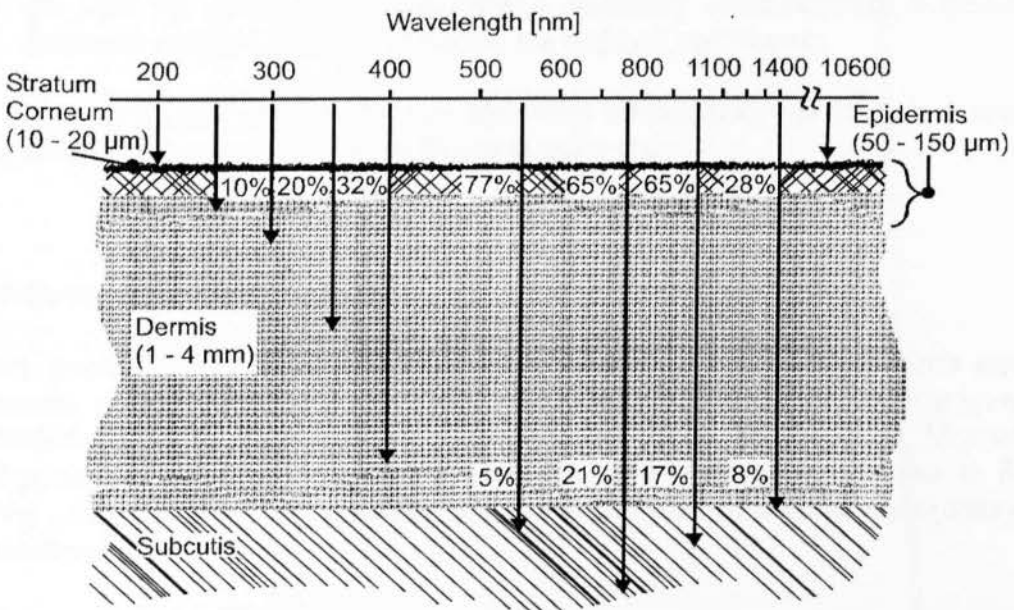
**Κολλαγόνο:** Το κολλαγόνο επίσης είναι μια ινώδη πρωτεΐνη που βρίσκεται στο δέρμα. Οι ίνες της είναι η κύρια αιτία σκέδασης του φωτός στο δέρμα. Όταν διεγείρεται στα 335nm έχει φάσμα εκπομπής στα 380nm και 460nm.

**Αιμοσφαιρίνη:** Το δέρμα μας είναι γεμάτο με αιμοφόρα αγγεία, τα οποία περιέχουν αιμοσφαιρίνη. Είναι η χρωστική των ερυθρών αιμοσφαιρίων, 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 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 μόριο 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 240-290nm (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 προτεΐνων κ.α.

Σε γενικές γραμμές το ανθρώπινο δέρμα απορρόφει έντονα μη ιονίζουσα ακτινοβολία για μήκη κύματος μικρότερα των 200nm και μεγαλύτερα για μήκη κύματος μεγαλύτερων των 10,6μm. Στο φάσμα των 700-800nm παρατηρείται μεγάλη διεισδυτικότητα, όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 50.** Απορρόφηση στο ανθρώπινο δέρμα συναρτήσεως του μήκους κύματος

## 4.6 Άλλοι κίνδυνοι

Εκτός από του κινδύνους που συνδέονται άμεσα με τη δέσμη και την απορρόφηση της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας, μια σειρά από διαφορετικές κατηγορίες κινδύνου παρουσιάζονται παρακάτω.

### *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, πόνο, μέχρι σοβαρούς τραυματισμούς, ακόμα και θάνατο ιδίως από συστήματα υψηλής τάσης. Παραθέτουμε τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος 50Hz (οικιακή κατανάλωση) συνάρτηση της έντασης τού.

- 0,5 έως 1 mA :Γίνεται μόλις αντιληπτό, προκαλεί μυϊκές συσπάσεις.
- 5 έως 15 mA :Δημιουργεί ισχυρές συσπάσεις των σκελετικών μυών, τίναγμα του σώματος και κατά συνέπεια μπορεί να προκληθούν τραυματισμοί και κατάγματα.
- 15 έως 100mA :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 έως 500mA :Προκαλείται βλάβη στις κοιλίες της καρδιάς που παραμένει και μετά την επίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος. Αναπνευστική παράλυση εξαιρετικά ισχυρές μυϊκές συσπάσεις και σοβαρά εγκαύματα.

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

### *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, διοξειδίου του πυριτίου απελευθερώνεται από την κοπή χαλαζία, βάρεια μέταλλα από χαρακτηρισκή, υδροκυάνιο, οξείδιο του καδμίου, τελλούριο και εξαφθοριούχο τελλούριο κ.τ.λ.



## **Ιοντίζουσα ακτινοβολία**

Ακτινοβολία εκτός εκείνης της δέσμης μπορεί να παραχθεί από διάφορα στοιχεία ενός συστήματος laser όπως τροφοδοτικά, λαμπτήρες εκκενώσεων και σωλήνες πλάσματος. Πολλά εκ των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ενός συστήματος laser παράγουν ακτίνες  $\gamma$ . Ακόμα όταν μια δέσμη παλμικού laser υψηλής ισχύος (της τάξης του 1 KW/cm<sup>2</sup>) χτυπά ένα στόχο, δημιουργεί πλάσμα το οποίο εκπέμπει ιοντίζουσα ακτινοβολία.

## **Κίνδυνοι πυρκαγιάς**

Διάφορα υλικά όπως πλαστικό κ.α. μπορούν να αναφλεχθούν κάτω από κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας. Συνήθως μια δέσμη άνω των 10W/ cm<sup>2</sup> μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιά σε εύφλεκτα υλικά. Αδιαφανής εμπόδια τα οποία χρησιμοποιούνται μπλοκάρουν την δέσμη κατά την έξοδο της από τον χώρο εργασίας, συνήθως δεν αντέχουν υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας για περισσότερο από μερικά δευτερόλεπτα χωρίς καμία ζημία, 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 χρησιμότητας. Η καθαρότητα του χώρου εργασίας από τέτοιου ειδώς αντικείμενα καθώς και ανακλαστικές επιφάνειες είναι σημαντικές ιδίως όταν χρησιμοποιούμε αόρατο laser.

## **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, κρυογονικά, 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 έκρηξη σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

## **4.7 Ταξινόμηση laser**

Σύμφωνα με διεθνή πρότυπα τα laser ταξινομούνται με βάση την ικανότητα 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 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 στην έννοια του ορίου έκθεσης MPE. Η ταξινόμηση αυτή, όπως έχει διαμορφωθεί σήμερα έχει ως εξής (για χάρη απλότητας και για να μην δημιουργούμε σύγχυση) δεν παραθέτουμε το παλιότερο σύστημα ταξινόμησης.

### **Κατηγορία 1<sup>η</sup> :**

- **Τάξης 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 συσκευών CD/DVD.
- **Τάξη 1M:** Ούτε αυτή η κατηγορία μπορεί υπό κανονικές συνθήκες να παράγει επιζήμια επίπεδα ακτινοβολίας. Εκτός και αν κοιτάζουμε τη δέσμη laser 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**

- **Τάξης 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 ζημία. Μπορούν όμως να γίνουν επιζήμια αν η άμεση έκθεση στην 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 αυξάνεται σημαντικά όταν η έκθεση γίνεται μέσα από οπτικά μέσα.

### **Κατηγορία 3η**

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

- **Τάξης 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 350nm μέχρι το μακρινό υπέρυθρο το όριο έκθεσης είναι στα 500mW. Για παλμικά laser στο ορατό το όριο στα 30mJ.

## Κατηγορία 4η

- Τάξης 4<sup>η</sup> : 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 αυτήν την κατηγορία.

## 4.7 Μέτρα ασφαλείας

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 απομονώσουμε όλη της διαδρομή της δέσμης και οποίων άλλων παραγόντων κινδύνου (κλειστού τύπου συστήματος). 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 να διαχωριστούν σε τρία επίπεδα, στο τεχνικό επίπεδο (Engineering Control Measures), στο οργανωτικό επίπεδο (Administrative Control Measures) και στα ατομικά μέτρα ασφαλείας (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 των κανόνων ασφαλείας, τα καθήκοντα του τεχνικού ασφαλείας (Laser Safety Officer). 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 έκθεσης του ματιού μέσα από συγκλίνοντα οπτικά μέσα. Το ίδιο ισχύει για την κατηγορία 2, μόνο που εδώ συνίσταται η σήμανση του laser και εφόσον χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς λόγους, η επιτήρηση από έναν laser safety officer. 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 laser, να ακολουθούνται αυστηρά οι οδηγίες χρήσης και συντήρησης.

Για της κλάσεις 3B και 4 οι κίνδυνοι αυξάνονται σημαντικά. Ο έλεγχος από έναν laser safety officer είναι απαραίτητος, η ενέργεια πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό 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 ακόμα και να μηδενίζεται η ελεύθερη διαδρομή της. Πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένες διαδικασίες λειτουργίας, ελέγχου συντήρησης και εγκατάστασης αυτών των συστημάτων.

### 4.7.1 Τεχνικά μέτρα ασφαλείας

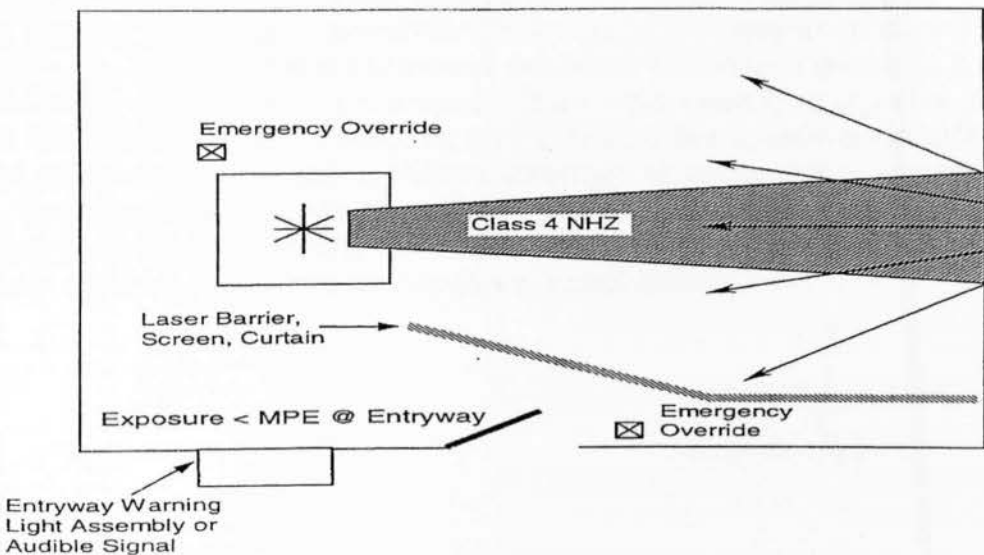
Σε τεχνικό επίπεδο, τα μέτρα ασφαλείας αποτελούνται από ότι είναι απαραίτητο για να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος από την χρήση συστημάτων laser. Αφορούν τεχνικές

προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να τηρούνται κατά την κατασκευή και την εγκατάσταση του συστήματος. Οι προδιαγραφές αυτές ποικίλουν ανάλογα με 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 της δέσμης. Δεν πρέπει να αφαιρείτε ποτέ ούτε να είναι ανοικτό κατά την διάρκεια της λειτουργίας του.

**Δικλείδες ασφαλείας :** Για τάξεις 3R, 3B και 4. Οι δικλείδες εμποδίζουν την λειτουργία του laser όταν 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 στην κλειδαριά αλλά σε μέρος όπου πρόσβαση έχει μόνο ο υπεύθυνος συντηρητής και επισκευής του συστήματος. Τα πρότυπα ασφαλείας, επιτρέπουν την παράκαμψη των δικλείδων ασφαλείας και για απλές εργασίες συντήρηση 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 :** Για 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 έκτατες περιπτώσεις ή κατά την είσοδο μη εξουσιοδοτημένου προσωπικού στην ελεγχόμενη περιοχή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αναπαράσταση ενός δωματίου με απομακρυσμένες δικλείδες ασφαλείας.



**Σχήμα 51.** Σχηματική παράσταση ελεγχόμενης περιοχής laser 4<sup>ης</sup> τάξης

**Κλειδί ελέγχου :** Για τάξεις 3B και 4 Συστήματα laser αυτών των τάξεων θέτονται σε λειτουργία 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.

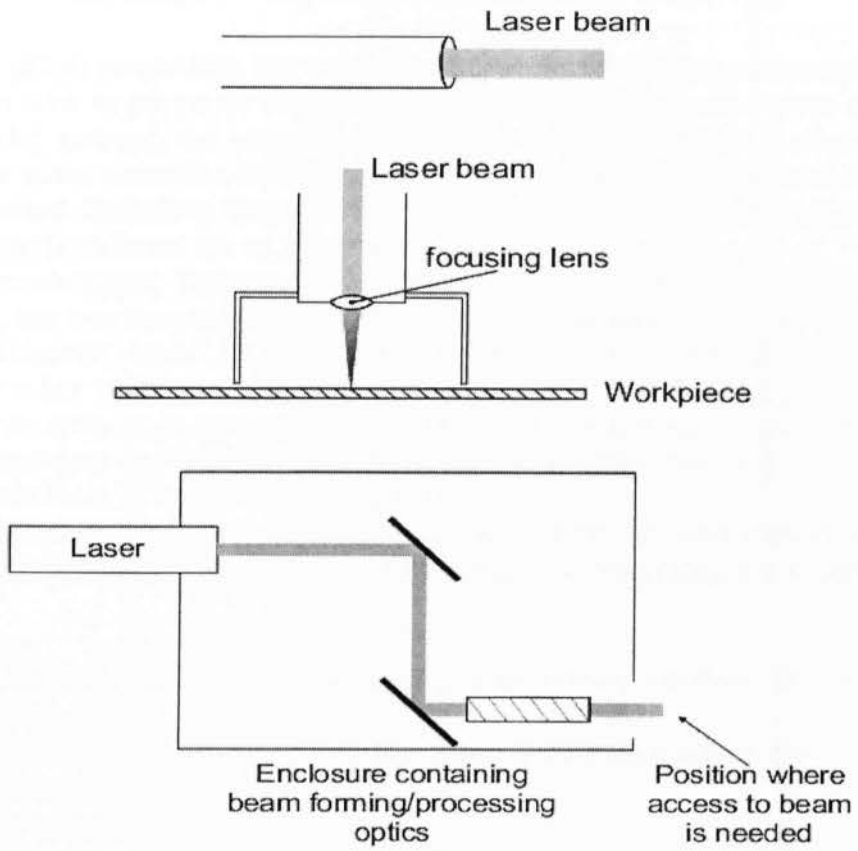
**Συσκευή προειδοποίησης λειτουργίας (ένδειξη "laser on")** Για τάξεις 3B και 4, καθώς και σε αόρατη ακτινοβολία τάξης 3R. Αυτή η συσκευή αποτελείτε συνήθως από μια φωτεινή ένδειξη ή παράγει ένα προειδοποιητικό ήχο και σηματοδοτεί ότι το laser είναι σε λειτουργία ή είναι έτοιμο για χρήση. Αν πρόκειται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

**Διακόπτης ή εξασθενητής δέσμης:** Για τάξεις 3B και 4. Μηχανικό κλείστρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διακοπή ή την εξασθένηση 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 έξοδο τους και η λειτουργία τους πρέπει να διακοπεί προσωρινά.

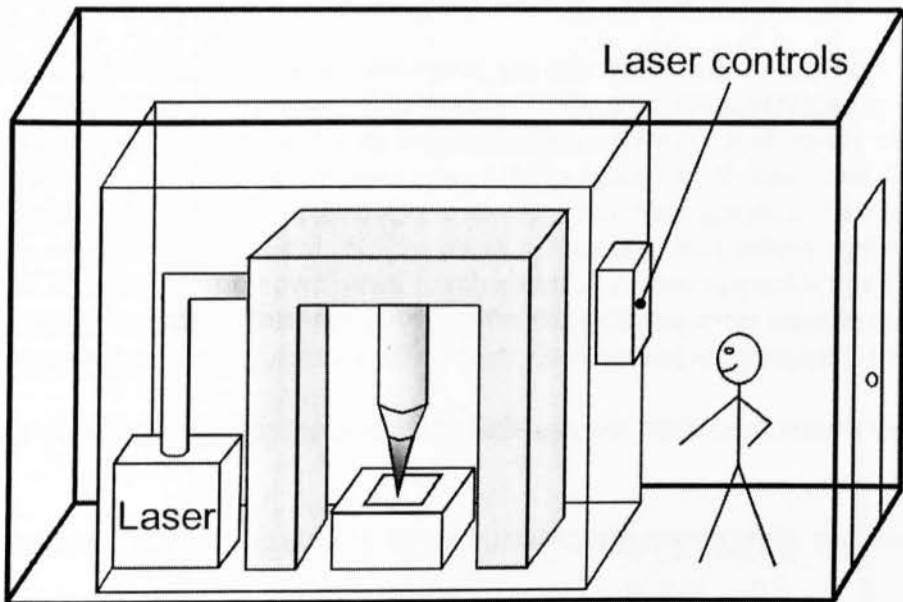
**Περίβλημα δέσμης (θωράκιση):** Αυτά αφορούν την ελαχιστοποίηση της ελεύθερης διαδρομής της δέσμης laser ώστε να αποφεύγονται ατυχήματα. Στα συστήματα του εμπόριου που διατίθενται για βιομηχανικές χρήσης τα περιβλήματα τοποθετούνται από τον κατασκευαστή. Σε ερευνητικά ιδρύματα όμως πρέπει να τοποθετούνται 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). Στις επόμενες εικόνες μπορούμε να δούμε σχηματικά αυτά που περιγράφουμε.

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

Για μεγάλες βιομηχανικές (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.



Σχήμα 52. Σύστημα θωράκισης της δέσμης



Σχήμα 53. Walk in θωράκιση βιομηχανικού laser

#### 4.7.2 Μέτρα ασφαλείας 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 τυποποιημένες διαδικασίες λειτουργίας αποτελούνται από κανόνες χρήσης, λειτουργίας και συντήρησης ειδικούς για ένα σύστημα laser ή για μία διαδικασία με χρήση συστήματος laser. Οι τυποποιημένες διαδικασίες λειτουργίας 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 τυποποιημένες διαδικασίες λειτουργίας 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 εργαζομένους με το laser καθώς και οποιόν 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 χρήσης των πλήκτρων του μηχανήματος
- Τυχόν ελέγχων πρέπει να γίνουν πριν τεθεί σε λειτουργία (σήμανση , παρουσία εξουσιοδοτημένου προσωπικού , ρυθμίσεις συνδέσεις κ.τ.λ.)
- Ατομικά μέτρα προστασίας (θα αναλυθούν παρακάτω)
- Τεχνικοί έλεγχοι (ευθυγράμμιση της 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 οποίο 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.

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 ποιές συνθήκες (αν υπάρχουν )πρέπει να ανοίγει το προστατευτικό περιβλημα.
- 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 προειδοποίηση λειτουργίας
- Την σωστή χρήση του διακόπτη δέσμης για προσωρινή διακοπή της λειτουργίας

#### 4.7.3 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 δελεάσουν 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 ΜΡΕ 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 ακτινοβόληση ξεπερνάει τα 2 W/ cm<sup>2</sup>, ενδείκνυται να φορεθεί ρουχισμός ο οποίος δεν φλέγεται εύκολα, όπως ειδικές πυρίμαχες φόρμες εμπορίου, μάλλινο με πυκνή πλέξη ή μεταξωτό ύφασμα. Όταν η ακτινοβόληση ξεπερνάει τα 10 W/ cm<sup>2</sup>, 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.



Photograph © Copyright of Phillips Safety Products

**Εικόνα 56.** Φιλτράρει στα 10,6μm 100% διαπερατότητα στο ορατό φως



Photograph © Copyright of Phillips Safety Products

**Εικόνα 57.** Φιλτράρει στα 190 με 534nm 26% διαπερατότητα στο ορατό φως.



**Εικόνα 58.** Φιλτράρει στα 655 - 685nm, 36% διαπερατότητα στο ορατό.



Photograph © Copyright of Phillip's Safety Products

**Εικόνα 59.** Φιλτράρει στα 190 - 532nm, 46,4% διαπερατότητα στο ορατό.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Laser Fabrication and Machining of Materials, Narendra B Dahotre, Sandip P. Horimkan, University of Tennessee, Springer Publishing
2. Laser Safety, Tools and Training, Ken Barat CRC PRESS Publishing
3. Laser Tissue Interaction Dr. Markolf H. Niemz University of Tennessee, Springer Publishing
4. Laser and Optics, William S.C. Chang Cambridge Publishing
5. Οπτοηλεκτρονική Μια εισαγωγή, μεταφρασμένο από Α.Α. Σεραφεντινίδης των John Wilson , John Hawkess Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π.
6. Laser safety manual, Department of Occupational and Environmental Safety, Case Western Reserve University, 2005
7. Laser Safety Manual, H. Ly, University of Western Ontario, 2006
8. Laser Safety Training Manual, Richard Baxter, University of Chicago
9. Laser Safety, Roy Henderson and Karl Schulmeister, Taylor & Francis Group, New York, 2004
10. Light Sources and Laser Safety Fred Seeber, Camden County College Blackwood, New Jersey
11. Laser Material Processing, William M. Steen, Springer – Verlag London Limited, 2003.
12. Industrial Applications of Lasers, John F. Ready, Academic Press, San Diego, 1997
13. Αρχές ηλεκτρονικών υλικών και διατάξεων, S.O. Kasap, μετάφραση Θ. Δρίτσας, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2002
14. Αρχές των lasers, O. Svelto, μετάφραση και επιμέλεια Γ.Α. Κουρούκλης, Α.Α. Σεραφεντινίδης, εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1986
15. Ασφάλεια κατά τις Βιοιατρικές Εφαρμογές 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

16. Δερματικά Νοσήματα, Διάγνωση και Θεραπεία. Επιμέλεια: Ανδρέας Δ. Κατσάμπας. Εκδόσεις Πασσοσιανού. Αθήνα 2007
17. Εθνική στρατηγική για την υγεία και την ασφάλεια 2010- 2015 , ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε, Αθήνα 2009
18. Οπτική και Λείζερ, οπτικές ίνες και κυματοδηγοί, Μ. Young, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 5η έκδοση, Αθήνα, 2008
19. Στουρνάρης Αριστείδης Γ. , Διερεύνηση και ανάπτυξη συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου της διεργασίας διάτρησης με παλμούς δέσμης laser σε πραγματικό χρόνο, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΜΠ 2009
20. Τσακίρη Δανάη, Κατεργασία κράματος αλουμινίου με δέσμη laser, ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΜΠ 2010
21. Αγγελογιαννάκης Βαγγέλης, Ασφάλεια Laser ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΠ 2008
22. Βιτσεντζάντος Χρήστος, Τροποποίηση της τραχύτητας επιφανειών με χρήση laser ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΠ 2009
23. Τσουκαντάς Γεώργιος, Θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της διεργασίας απομακρυσμένης συγκόλλησης με laser(remote laser welding ) ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ 2005
24. Παπανικολάου, Απόστολος Γ., Ασφαλής χρήση λείζερ στο εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, ΕΜΠ 2008.
25. Καπάνταης Παναγιώτης, Συγκόλληση πολυμερών υλικών με laser, ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ 2008
26. Κουρούπης Ιωάννης, Εγκατάσταση και λειτουργία βιομηχανικού laser ισχύος και χρήση του στην κατεργασία μετάλλων, ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Α.Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ 2009
27. Αρβαντίνος Α. καθηγητής Φυσικής, Φως laser 50 χρόνια δημιουργικής δράσης , ΑΡΘΡΟ



“Now you know the difference between a moon beam and a laser beam!”