

Τα Laser και οι εφαρμογές τους

Σοφία Κόττου

Μάιος 2009

Σκοπός της ανάπτυξης του θέματος

είναι η συγκεντρωμένη παρουσίαση ιδιοτήτων και εφαρμογών της ακτινοβολίας Laser. Με την ταχύτατη εξέλιξη της σύγχρονης τεχνολογίας, η ακτινοβολία Laser έχει βρει εφαρμογές σε πολλούς και συχνά άσχετους μεταξύ τους επιστημονικούς κλάδους.

Παρόλη όμως την προσπάθεια για ολοκληρωμένη καταγραφή των κυριότερων ιδιοτήτων και εφαρμογών της ακτινοβολίας Laser είναι βέβαιο πως σε μικρό χρονικό διάστημα η ανάπτυξη που ακολουθεί θα έχει γίνει ελλειπή.

Είναι γενικότερα διαπιστωμένο πως η «Σύγχρονη Φυσική», τμήμα της οποίας αποτελεί το κεφάλαιο «Laser», χρειάζεται συνεχή ανανέωση, αν θέλει να «τιμά» το όνομά της.

Η συγγραφή του κεφαλαίου αυτού, κυρίως ως προς τη διάταξή του, βασίστηκε στην εντυπωσιακή δουλειά του Rami Arieli και των συνεργατών του, μια κεφάτη επιστημονική ομάδα του Kansas State University, που παρουσιάζει τη θεωρία και πράξη των Laser, από την πλευρά του Φυσικού και του Μηχανολόγου, στην ιστοσελίδα: <http://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Preface/Hp001.htm>

Η δουλειά της συγγραφέως αυτής της έκδοσης είχε επομένως την ευκολία “του ήδη ανοικτού δρόμου” από τους Αμερικάνους συνάδελφους, είχε όμως και τη δυσκολία της προσαρμογής του κειμένου σε περιβάλλον περισσότερο ιατρικό επικεντρωμένο στην πιο περιληπτική ανάλυση των βασικών λειτουργιών της συσκευής Laser και πιο εκτεταμένη ανάπτυξη των ιατρικών εφαρμογών.

Οπωσδήποτε ευχαριστώ εκ βαθέων τους συγγραφείς του πρότυπου έργου, αφενός για την πολύ ενδιαφέρουσα δουλειά τους, αφετέρου για την άδεια που μου παραχώρησαν για μετάφραση και διασκευή όσων παραγράφων του πονήματός τους έκρινα πως ήταν κατάλληλες για την εκπαίδευση των φοιτητών της Ιατρικής Σχολής του ΕΚΠΑ.

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ

Στο τέλος της ανάγνωσης του κεφαλαίου θα πρέπει να έχουν γίνει κατανοητά τα εξής:

- Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ΗΜΑ) Laser
- Η διαφορά της αυθόρμητης από την εξαναγκασμένη εκπομπή ΗΜΑ
- Η διάταξη του συστήματος παραγωγής Laser
- Ο μηχανισμός ενίσχυσης της ΗΜΑ
- Οι εφαρμογές της ΗΜΑ Laser στις ιατρικές ειδικότητες
- Οι εφαρμογές της ΗΜΑ Laser στην επιστήμη
- Οι κίνδυνοι και η ασφάλεια κατά τη χρήση ΗΜΑ Laser

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ	2
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ	3
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ LASER	6
1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ (ΗΜΑ).....	6
1.2.1 Διάδοση της ΗΜΑ σε κενό.....	8
1.2.2 Διάδοση της ΗΜΑ στην ύλη.....	8
1.3 ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ LASER	9
1.3.1 Μονοχρωματικότητα	9
1.3.2 Κατευθυντικότητα.....	10
1.3.3 Συμφρασικότητα.....	10
2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΗΜΑ LASER	11
2.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ BOHR ΣΤΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ	11
2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΝΙΑ.....	12
2.3 Η ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΗΜΑ–ΦΩΤΟΝΙΩΝ, ΤΟ ΧΡΩΜΑ ΤΗΣ ΥΛΗΣ.....	13
2.3.1 Φασματοφωτόμετρο. Φάσμα απορρόφησης.....	15
2.3.2 Το χρώμα του αίματος και της μελανίνης (οξυγονόμετρο, φωτο-εξάτμιση).....	15
2.4 ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗ ΗΜΑ – ΦΩΤΟΝΙΩΝ.....	17
2.5 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ (ΘΕΡΜΙΚΗ) ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ.....	18
2.6 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΠΛΗΘΥΣΜΩΝ-ΟΠΤΙΚΗ ΑΝΤΛΗΣΗ	19
2.7 ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ	20
2.8 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΡΥΘΜΟ ΡΟΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗ.....	21
2.9 ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΕΣ ΜΕΤΑΠΗΔΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΡΟΗ ΦΩΤΟΝΙΩΝ	22
2.10 ΕΝΙΣΧΥΣΗ.....	23
2.11 LASER ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ.....	24
2.12 LASER ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ.....	24
3. Η ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	25
3.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΟ ΥΛΙΚΟ.....	26
3.2 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	26
3.3 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ	28
3.4 Ο ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ (ΣΥΖΕΥΣΗ ΕΞΟΔΟΥ).....	28
4. ΟΠΤΙΚΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ (ΟΠΤΙΚΟ ΑΝΤΗΧΕΙΟ) ΚΑΙ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	29
4.1 ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ	29
4.2 ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ	30
4.3 ΚΑΤΩΦΛΙ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	31
4.4 Η ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ	32
5. ΕΝΙΣΧΥΣΗ – ΑΠΟΔΟΣΗ	32
5.1 ΦΘΟΡΙΣΜΟΣ	33
5.2 ΕΠΑΝΑΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ	34
5.3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ.....	35
6. ΕΙΔΗ LASER ΚΑΙ ΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΤΟΥΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	36
6.1 ΠΕΡΙΛΗΠΤΙΚΑ	36
6.2 LASER ΑΕΡΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	37
6.2.1 Αέρια ατόμων.....	38
6.2.1.1 Laser He-Ne.....	38
6.2.1.2 Laser ατμών μετάλλου.....	40
6.2.1.3 Ηλίου Καδμίου	42
6.2.2 Αέρια ιόντων	42
6.2.3 Αέρια μορίων.....	44

6.2.3.1 Laser CO ₂	44
6.2.3.2 Laser N ₂	46
6.2.3.3 Laser (διεγερμένων) διμερών (excimer).....	47
6.2.3.4 Χημικό Laser.....	48
6.2.3.5 Laser μακρινού υπέρυθρου (FIR, Far Infra Red).....	50
6.3 LASER ΣΤΕΡΕΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	51
6.3.1 Laser ρουβινίου.....	51
6.3.2 Laser νεοδυμίου.....	53
6.3.3 Laser Αλεξανδρίτη (Cr ⁺³ : BeAl ₂ O ₄).....	54
6.3.4 Laser τιτανίου – σαφείρου.....	54
6.4 LASER ΥΓΡΟΥ (ΔΥΕ-ΧΡΩΣΤΙΚΩΝ).....	55
7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ LASER ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	56
7.1 ΤΑ LASER ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ ΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΗ.....	62
7.1.1 Τα Laser στην Οδοντιατρική.....	64
7.1.1.1 Εφαρμογές σε μαλακούς ιστούς.....	64
7.1.1.2 Εφαρμογές σε σκληρούς ιστούς όπως τα δόντια.....	64
7.1.2 Τα Laser στη Δερματολογία.....	65
7.1.3 Τα Laser στην Οφθαλμολογία.....	66
7.2 ΤΑ LASER ΣΤΗ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΜΕ ΦΑΡΜΑΚΑ.....	70
7.3 ΕΙΔΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ LASER: ΜΑΛΑΚΑ (SOFT) LASERS.....	71
7.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ LASER ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ.....	72
7.5 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ.....	73
7.6 ΨΥΞΗ ΑΤΟΜΩΝ.....	75
7.7 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΗΜΑ ΚΑΙ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	75
8. ΑΣΦΑΛΗΣ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ LASER.....	76
8.1 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΗΜΑ LASER.....	76
8.2 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΗΜΑ LASER ΜΕ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΤΟ.....	77
8.2.1 Φως Laser και οφθαλμός.....	78
8.3 ΚΑΝΟΝΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ LASER.....	79
8.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ LASER ΣΕ ΟΜΑΔΕΣ, ΓΙΑ ΛΟΓΟΥΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....	80
8.4.1 Επίπεδα Μέγιστης Επιτρεπόμενης Έκθεσης (ΜΕΕ).....	80
8.4.2 Οι τέσσερις ομάδες.....	81
8.4.2.1 Η κατηγορία I.....	81
8.4.2.2 Η κατηγορία II.....	81
8.4.2.3 Οι κατηγορίες IIIα και IIIβ.....	81
8.4.2.4 Η κατηγορία IV.....	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά για την ακτινοβολία Laser

Η ακτινοβολία Laser ως θεωρία και τεχνολογία αναπτύσσεται συνεχώς από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 και σήμερα πλέον χρησιμοποιείται σε επιστημονικά πεδία ευρέου φάσματος, όπως η ιατρική, η επικοινωνία, η καθημερινή πράξη, οι στρατιωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Επιγραμματικά το Laser είναι μια συσκευή που μετατρέπει ενέργεια διαφόρων μορφών (ηλεκτρομαγνητική, ηλεκτρική, χημική κ.ά.) σε ηλεκτρομαγνητική με ιδιόμορφα χαρακτηριστικά.

Το ακρωνύμιο (ακρώνυμο) LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) σημαίνει: Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία Laser μπορεί να ανήκει σε οποιοδήποτε τμήμα του ΗΜ φάσματος: ορατό, υπεριώδες, υπέρυθρο, ακτίνες Χ.

1.2 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜΑ)

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜΑ) είναι ένα ημιτονοειδές κύμα στο οποίο ταλαντώνονται συμφασικά ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο σε κάθετα μεταξύ τους επίπεδα. Αν θεωρήσουμε το σύστημα των τριών αξόνων OXYZ με τρόπο ώστε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διαδίδεται κατά μήκος του άξονα OX, τότε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα ταλαντώνονται στα επίπεδα OXY και OXZ αντίστοιχα.

Όπως κάθε ημιτονοειδής συνάρτηση, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από τις φυσικές ποσότητες: μήκος κύματος (λ), και περίοδος (T) ή συχνότητα (ν).

Το μήκος κύματος (λ) είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων της ταλάντωσης που έχουν την ίδια φάση στο διάγραμμα: πλάτος ταλάντωσης ως προς τη μετατόπιση στο χώρο.

Περίοδος (T) είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων της ταλάντωσης που έχουν την ίδια φάση στο διάγραμμα: πλάτος ταλάντωσης ως προς τη μετατόπιση στο χρόνο.

Η ΗΜΑ διέπεται από τη θεμελιώδη σχέση: $E = h\nu$ ή $E = hc/\lambda$, όπου
 E η ενέργεια της ΗΜΑ
 h η σταθερά του Planck
 ν η συχνότητα ταλάντωσης, με $\nu = c / \lambda$
 c η ταχύτητα διάδοσης
 λ το μήκος κύματος

Πίνακας 1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [8]

Photon Energy	Wavelength	Frequency	Common Name For the Spectral Region
E [eV]	λ [μm]	ν [Hz]	
$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{h}{T}$	$\lambda = \frac{c}{\nu} = cT$	$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{E}{h} = \frac{1}{T}$	
10^3	10^{-3}	10^{17}	γ Rays
100	0.01	10^{16}	X-Rays
10	0.1	10^{15}	UV= Ultra-Violet
1	0.4 0.7	10^{14}	Visible Spectrum
0.1	10	10^{13}	IR= Infra-Red
0.01	100	10^{12}	
10^{-3}	10^3	10^{11}	Microwave
10^{-4}	10^4	10^{10}	Radio Waves

Η ΗΜΑ έχει συμπεριφορά που εξαρτάται από την ενέργειά της, επομένως και από τη συχνότητά της και από το μήκος κύματος. Μεγάλη ενέργεια (και συχνότητα) έχουν οι ακτίνες Χ και γ (στο ένα άκρο του φάσματος), ενώ μικρή ενέργεια έχουν τα ραδιοκύματα (Πίνακας 1).

Το μήκος κύματος της ΗΜΑ αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με την συχνότητα (και την ενέργεια) της ακτινοβολίας.

Η ταχύτητα διάδοσης c της ΗΜΑ, δεν εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας, αλλά μόνον από το μέσον διάδοσής της (κενό ή ύλη).

1.2.1 Διάδοση της ΗΜΑ σε κενό

Η ΗΜΑ είναι ένα εγκάρσιο κύμα που διαδίδεται (και) στο κενό με σταθερή ταχύτητα: την ταχύτητα του φωτός (c), που είναι ανεξάρτητη από την ενέργεια και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Δηλαδή το ορατό φως, τα ραδιοκύματα και οι ακτίνες Χ διαδίδονται όλα με την ίδια ταχύτητα.

Η συχνότητα μιας περιοδικής κίνησης είναι ο αριθμός των πλήρων ταλαντώσεων στη μονάδα του χρόνου. Στην κυματική και στην ΗΜΑ η συχνότητα (ν) είναι και ο αριθμός των μηκών κύματος (λ) στη μονάδα του χρόνου και ισχύει:

$$c = \lambda * \nu$$

1.2.2 Διάδοση της ΗΜΑ στην ύλη

Όταν ΗΜΑ διαδίδεται μέσα από ύλη, η ταχύτητα διάδοσης (u) μειώνεται (σε σχέση με το κενό) κατά ένα συντελεστή “ n ”, όπου n ο δείκτης διάθλασης του υλικού.

Δηλαδή

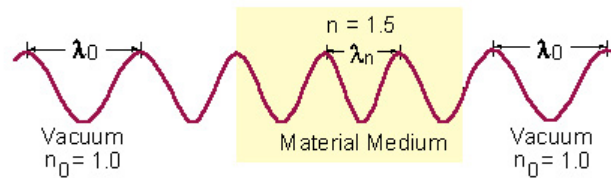
$$n = \frac{c}{u} = \frac{\text{ταχύτητα ΗΜΑ στο κενό}}{\text{ταχύτητα ΗΜΑ στο υλικό}}$$

Πολύ αραιά μέσα, όπως ο αέρας, θεωρείται πως έχουν $n=1$.

Τα περισσότερα διαφανή (στο ορατό) μέσα έχουν $n = 1,4$ ως $1,8$, ενώ τα υλικά που είναι διαφανή στο υπέρυθρο έχουν $n = 2,0$ ως $4,0$.

Η μειωμένη ταχύτητα της ΗΜΑ σε κάθε υλικό συνδέεται με αντίστοιχη μείωση του μήκους κύματος (σχήμα 1). Η φυσική ποσότητα που παραμένει αναλλοίωτη (όταν η ΗΜΑ περνά από ένα υλικό σε άλλο) είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας.

Εξαιτίας της μείωσης της ταχύτητας διάδοσης της ΗΜΑ (και παράλληλα του μήκους κύματος) καθώς η ακτινοβολία εισέρχεται σε υλικό οπτικά πυκνότερο, έχει ως αποτέλεσμα το γνωστό φαινόμενο της διάθλασης, δηλαδή ξαφνική αλλαγή στη διεύθυνση-πορεία της, το δε μέγεθος της γωνίας απόκλισης είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στον δείκτη διάθλασης.



Σχήμα 1. Μεταβολή του λ με μεταβολή του n [8]

Όταν όμως λευκό φως προσπέσει σε διαφανές πρίσμα, εκτός από τη διάθλαση, παρατηρείται και ανάλυση του φωτός: το λευκό φως αναλύεται στα χρώματα του ουράνιου τόξου. Αυτό οφείλεται στο ότι ο δείκτης διάθλασης κάθε υλικού εξαρτάται από το μήκος κύματος της ΗΜΑ. Δηλαδή κάθε συνιστώσα του λευκού φωτός (γειτονικά – διαδοχικά μήκη κύματος από 400-700 nm) θα διαθλαστεί με λίγο διαφορετική γωνία από τη γειτονική της.

1.3 Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser

Το κοινό φως (από τον ήλιο ή τις λάμπες φωτισμού) αποτελείται από πολλά διαφορετικά μήκη κύματος που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις και δεν υπάρχει καμιά σχέση που να συνδέει τη φάση των κυμάτων μεταξύ τους.

Η ΗΜΑ Laser έχει τρεις ιδιότητες-χαρακτηριστικά που δεν υπάρχουν στις άλλες ΗΜΑ. Ο συνδυασμός αυτών των ιδιοτήτων καθιστά τη δέσμη Laser ακτινοβολία με ιδιαίτερα **μεγάλη πυκνότητα ισχύος**.

1.3.1 Μονοχρωματικότητα

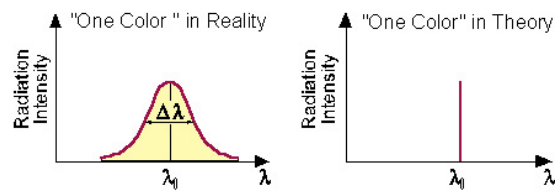
Δηλαδή ένα μόνον χρώμα, ένα μόνον μήκος κύματος.

Είναι γνωστό ότι όταν το κοινό λευκό φως διαπερνά ένα πρίσμα, αναλύεται στα συστατικά του που είναι τα βασικά χρώματα (του ουράνιου τόξου).

Το μάτι μας όμως σε συνεργασία με τον εγκέφαλο δεν μπορούν να αναλύσουν το λευκό φως και το βλέπουν ως ένα χρώμα.

Κάθε φως Laser είναι ένα μόνο χρώμα, ένα μόνο μήκος κύματος, παρόλο που στην πράξη το ένα μήκος κύματος «συνοδεύεται» αναπόφευκτα

από μια πολύ περιορισμένη ζώνη με μήκη κύματος λίγο μικρότερα και λίγο μεγαλύτερα του κεντρικού (φάσμα πολύ περιορισμένου εύρους) (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Η πραγματική διασπορά της τιμής του λ (αριστερά) σε σχέση με τη θεωρητική (δεξιά) [8]

1.3.2 Κατευθυντικότητα

Η εξερχόμενη δέσμη ΗΜΑ από τη συσκευή Laser έχει μια πορεία συγκεκριμένης κατεύθυνσης. Διαχέεται στη συνέχεια κατά μια γωνία απόκλισης, η οποία όμως είναι πολύ μικρότερη από τις αντίστοιχες άλλων πηγών ΗΜΑ.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι ακτίνες της εξερχόμενης δέσμης είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και το ισχυρό σήμα τους μπορεί να διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Δέσμη Laser στέλνεται στην επιφάνεια της σελήνης, ανακλάται, επιστρέφει στη γη και μετρά την απόσταση των δυο ουρανίων σωμάτων με ακρίβεια χιλιοστού του μέτρου.

1.3.3 Συμφασικότητα

Εφόσον η ΗΜΑ είναι κυματικό φαινόμενο, κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορεί να περιγραφηθεί ως το άθροισμα – συνισταμένη ημιτονοειδών κυμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο:

$$y = A \cos (\omega t + \varphi)$$

Όπου A είναι το πλάτος ταλάντωσης

$\omega = 2\pi\nu$ είναι η γωνιακή συχνότητα

φ είναι η αρχική φάση του κύματος

$\omega t + \varphi$ η στιγμιαία φάση του κύματος

Συμφασικά λέγονται τα κύματα που διατηρούν σταθερή τη σχετική φάση τους.

Η HMA Laser συναποτελείται από κύματα ίδιου μήκους κύματος που ξεκινούν την ίδια στιγμή από την πηγή τους (ενεργό υλικό), επομένως έχουν την ίδια φάση.

Το άθροισμα αυτών των κυμάτων δίνει όμοιο κύμα μεγαλύτερου πλάτους ταλάντωσης.

2. Μηχανισμός δημιουργίας της HMA Laser

Η HMA Laser παράγεται μέσα στην ύλη και ο μηχανισμός δημιουργίας της έχει άμεση σχέση με τις ενεργειακές στιβάδες - επίπεδα των ατόμων της ύλης.

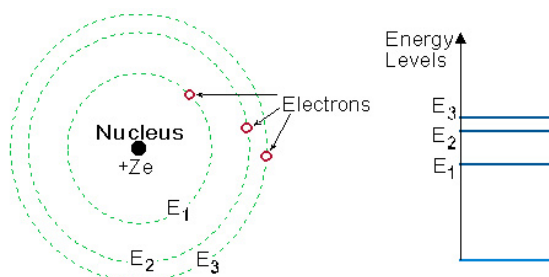
2.1 Το πρότυπο Bohr στη δομή του ατόμου

Το πρότυπο Bohr δέχεται ότι το άτομο αποτελείται από ένα πυρήνα (στον οποίο είναι εγκαταστημένη σχεδόν όλη η μάζα) με θετικό ηλεκτρικό φορτίο (Ze) και ηλεκτρόνια που περιφέρονται σε καθορισμένες τροχιές γύρω από τον πυρήνα.

Z είναι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα

e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb)

Σε κάθε «επιτρεπόμενη» τροχιά για τα ηλεκτρόνια αντιστοιχεί συγκεκριμένη τιμή ενέργειας. Το ενεργειακό επίπεδο είναι τόσο ψηλότερο όσο η τροχιά έχει μεγαλύτερη ακτίνα. Επομένως σε κάθε άτομο αντιστοιχούν συγκεκριμένα ενεργειακά επίπεδα ένα για κάθε τροχιά των ηλεκτρονίων του (οι ενδιάμεσες τιμές δεν είναι επιτρεπτές) (σχήμα 3).



2.2 Ενεργειακά επίπεδα και φωτόνια

Γενικότερα σε κάθε άτομο και σε κάθε μόριο αντιστοιχεί μια ομάδα συγκεκριμένων (για το καθένα) ενεργειακών επιπέδων, στα οποία “επιτρέπεται” η διέγερση.

Το χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο είναι και το προτιμητέο για κάθε υλικό. Όταν ένα άτομο δεχθεί ενέργεια (ηλεκτρική, χημική, θερμική κ.ά.) την απορροφούν τα ηλεκτρόνια του που μεταπηδούν σε ψηλότερο ενεργειακό επίπεδο και τότε λέγεται ότι το άτομο είναι διεγερμένο.

Όταν το άτομο εκπέμπει την περισσευούμενη ενέργεια, τα ηλεκτρόνια του μεταπηδούν σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο και το άτομο αποδιεγείρεται.

Η ενέργεια που θα «εγκαταλείψει» το άτομο είναι αριθμητικά ίση με την ενεργειακή διαφορά των επιπέδων «αναχώρησης» (ψηλότερο) και «άφιξης» (χαμηλότερο) του ή των ηλεκτρονίων. Η ενέργεια «εγκαταλείπει» το άτομο σε διακριτές ποσότητες που ονομάζονται κβάντα (ενέργειας), δηλαδή φωτόνια.

Η μεταφορά – μετάδοση ενέργειας προς και από ένα άτομο μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο διαφορετικούς τρόπους:

- (α) με συγκρούσεις με άλλα άτομα (μεταφορά κινητικής ενέργειας)
- (β) με απορρόφηση και εκπομπή ΗΜΑ

Όσον αφορά τον μηχανισμό δημιουργίας της ΗΜΑ Laser, ο πρώτος τρόπος παρεμβαίνει (σε μερικά Laser) στην διαδικασία προετοιμασίας του ενεργού υλικού. Ο δεύτερος τρόπος είναι βασικότερος για την όλη διαδικασία και αναλύεται λεπτομερέστερα στα επόμενα υποκεφάλαια.

Όταν ΗΜΑ απορροφάται ή εκπέμπεται από ένα υλικό, τα ηλεκτρόνια των ατόμων του υλικού μεταπηδούν σε ψηλότερη ή χαμηλότερη ενεργειακή στιβάδα αντίστοιχα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_2 - E_1 = h\nu = \hbar\omega$$

Όπου: E_2 η ανώτερη ενεργειακή στιβάδα

E_1 η κατώτερη

h η σταθερά του Planck

$$\hbar = h / 2\pi$$

$v = \eta$ συχνότητα του κύματος

$\omega = \eta$ γωνιακή συχνότητα

Τα ηλεκτρόνια κάθε ατόμου θα απορροφήσουν και θα επανεκπέμψουν φωτόνια συγκεκριμένου μόνον μήκους κύματος, αυτού που αντιστοιχεί στη διαφορά των επιπέδων ενέργειας του ατόμου π.χ. $E_2 - E_1$. Αυτά τα μήκη κύματος είναι τα «δακτυλικά αποτυπώματα» του ατόμου (σχήμα 4). Αν αέριο ατόμων νατρίου φωτιστεί με λευκό φως, θα απορροφήσει (και θα επανεκπέμψει, όταν θα είναι δυνατόν) μόνον την κίτρινη «συνιστώσα». Οι λάμπες νέου εκπέμπουν μόνον καθαρό κόκκινο φως, αυτό ακριβώς που απορροφά το αέριο όταν προσπέσει σε αυτό ευρύτερη ΗΜΑ.

2.3 Η απορρόφηση της ΗΜΑ–φωτονίων, το χρώμα της ύλης

Αναφέρθηκε προηγουμένως πως ένα υλικό απορροφά ένα φωτόνιο με την μεταπήδηση των ηλεκτρονίων των ατόμων του υλικού σε ψηλότερα ενεργειακά επίπεδα, δηλαδή με διεγέρσεις. Αυτό αφορά την «μικροσκοπική» άποψη.

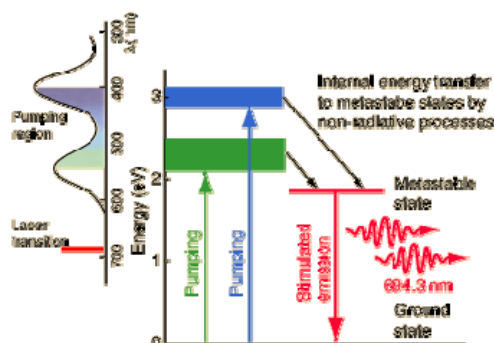
Σε μακροσκοπική θεώρηση, όταν ΗΜΑ διαπερνά ύλη, μέρος της απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο την διαπερνά.

Η ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας (I) από ένα ομοιογενές υλικό πάχους x , περιγράφεται από την (πειραματική) εκθετική εξίσωση.

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

όπου I_0 η ένταση της εισερχόμενης ακτινοβολίας

και α ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού, που είναι διαφορετικός για κάθε υλικό, εξαρτάται όμως και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχήμα 4. Επιτρεπόμενα ενεργειακά επίπεδα και η μετασταθερή κατάσταση [5]

Για να αλληλεπιδράσει ΗΜΑ με ένα υλικό (π.χ. το Laser με βιολογικό ιστό) πρέπει η ενέργεια της ακτινοβολίας να απορροφηθεί από τα άτομα ή μόρια του υλικού.

Ένα στέρεο σώμα έχει το χρώμα της ακτινοβολίας που ανακλά. Αν φωτισθεί με λευκό φως θα απορροφήσει ένα μέρος της ακτινοβολίας (κάποια μήκη κύματος) και την υπόλοιπη ακτινοβολία (τα υπόλοιπα μήκη κύματος) θα την επανεκπέμψει στο περιβάλλον. Το μάτι του παρατηρητή δέχεται τη συνισταμένη των μηκών κύματος που ανακλώνται στο υλικό σώμα και την ερμηνεύει ως το χρώμα του στερεού σώματος.

Λίγο διαφορετική είναι η περίπτωση των υγρών των οποίων το χρώμα καθορίζεται από τη συνισταμένη των μηκών κύματος που διαπερνούν τη μάζα τους (όχι τα ανακλώμενα).

Ο τρόπος απορρόφησης φωτός από τα άτομα καθορίζεται από τις ενεργειακές αποστάσεις των τροχιών των ηλεκτρονίων τους. Δύο τροχιές μπορεί να απέχουν κατά ενέργεια που αντιστοιχεί στο ορατό ή στην περιοχή Χ ή στην περιοχή του υπέρυθρου.

Τα μόρια και οι κρυσταλλικές δομές συνιστούν πιο πολύπλοκα συστήματα, συνήθως πιο σταθερά, δηλαδή οι μεταπηδήσεις ηλεκτρονίων «κοστίζουν» μεγαλύτερο ποσό ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν ενώνεται το νάτριο με χλώριο παράγεται το χλωριούχο νάτριο, το γνωστό μας αλάτι. Η ενέργεια που απορροφά το νάτριο είναι στο ορατό και το χρώμα του είναι προς το κίτρινο (αυτό που ανακλά-επανεκπέμπει). Το αλάτι απορροφά στο υπεριώδες και το χρώμα του είναι άσπρο (επανεκπέμπει όλο το ορατό).

Τα μέταλλα δίνουν χαρακτηριστικά ζωηρά χρώματα (κόκκινο του καδμίου, κίτρινο του χρωμίου, μπλε του κοβαλτίου) που συναντάμε και σε φυσικά συστήματα. Σίδηρος υπάρχει στη αιμοσφαιρίνη (που μεταφέρει το οξυγόνο στο αίμα) και μαγνήσιο στη χλωροφύλλη (χρωστική για τη φωτοσύνθεση). Χημικά συμπλέγματα με κατάλληλες «ενεργειακές αποστάσεις» περιέχονται στην καροτίνη (τύπος βιταμίνης Α) και στην χρυσοκίτρινη χρωστική του αμφιβληστροειδή χιτώνα.

2.3.1 Φασματοφωτόμετρο. Φάσμα απορρόφησης

Είναι η συσκευή με την οποία μετράται η απορρόφηση φωτός από ένα υλικό. Περιέχει μια πηγή λευκού φωτός και έναν αναλυτή, π.χ. πρίσμα από ειδικό διαφανές υλικό, που αναλύει το λευκό φως στις συνιστώσες του. Η πρώτη συνιστώσα οδηγείται και προσπίπτει στο υπό έρευνα υλικό με το οποίο έχει παρασκευασθεί κατάλληλο διάλυμα γνωστής συγκέντρωσης. Ανιχνευτική διάταξη (από την άλλη-απέναντι μεριά του διαλύματος) μετρά με ακρίβεια την ένταση του εξερχόμενου φωτός και υπολογίζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε.

Το ίδιο επαναλαμβάνεται για όλες τις συνιστώσες του αρχικού φωτός. Στην έξοδο της διάταξης λαμβάνεται το φάσμα απορρόφησης του συγκεκριμένου υλικού, δηλαδή μια γραφική παράσταση στην οποία ο κατακόρυφος άξονας είναι ο συντελεστής απορρόφησης και ο οριζόντιος άξονας το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τα βιολογικά υλικά έχουν συνήθως πολύπλοκα φάσματα απορρόφησης.

Όταν οι «γραμμές» απορρόφησης είναι πυκνές, στην πράξη δεν ξεχωρίζονται και το αποτέλεσμα είναι μια συνεχής καμπύλη (συνεχές φάσμα).

2.3.2 Το χρώμα του αίματος και της μελανίνης (οξυγονόμετρο, φωτοεξάτμιση)

Εκτός από το συντελεστή απορρόφησης, το χρώμα μιας ουσίας εξαρτάται και από τη συγκέντρωση των μορίων. Το αίμα μιας πληγής είναι σκούρο κόκκινο, αν όμως διαλυθεί σε νερό, γίνεται ροζ.

Η χρωστική του αίματος απορροφά έντονα το πράσινο και επιτρέπει στο κόκκινο «να περάσει ελεύθερα» μέσα από τη μάζα του. Όμως το «τελικό» ποσοστό της απορρόφησης καθορίζεται από την πυκνότητα των μορίων της ουσίας.

Η αιμοσφαιρίνη περιέχει την αιματίνη, μια ένωση πρωτοπορφυρίνης και σιδήρου που απορροφά στο ορατό φως και δίνει στο μόριο το χαρακτηριστικό του χρώμα. Η ένωση αυτή έχει επίσης την ικανότητα να δεσμεύει οξυγόνο. Όμως, όταν έχει δεσμευμένο οξυγόνο, το χρώμα της αλλάζει. Συνέπεια αυτού είναι ότι το οξυγονομένο (αρτηριακό) αίμα είναι έντονο κόκκινο, ενώ το φτωχό σε οξυγόνο (φλεβικό) αίμα είναι πιο σκούρο.

Το οξυγονόμετρο μετρά την περιεκτικότητα του αίματος σε οξυγόνο με την επεξεργασία του φάσματος απορρόφησης του αίματος.

Παρόμοια λειτουργία έχει και η συσκευή μέτρησης του σακχάρου στο αίμα.

Η μελανίνη είναι μια καφέ χρωστική που βρίσκεται στο δέρμα. Απορροφά σε όλα τα μήκη κύματος του ορατού, όπως ένα μαύρο αντικείμενο, όμως η απορρόφησή της είναι εντονότερη στα μικρότερα μήκη κύματος, με αποτέλεσμα τη σκούρα κιτρινο-κόκκινη απόχρωση του καφέ.

Προκειμένου να επέμβουμε με HMA Laser στο ανθρώπινο σώμα, πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος απορρόφησης της ακτινοβολίας, η εξάρτηση της απορρόφησης από το μήκος κύματος και οι μεταβολές στην απορρόφηση που οφείλονται σε χημικές αντιδράσεις.

Σε γενικές γραμμές, ο μαλακός ιστός συνιστάται κατά 70% από νερό με ποικίλλες συγκεντρώσεις βιολογικών μορίων τα οποία απορροφούν αναλόγως την HMA στην περιοχή του υπέρυθρου, ορατού ή υπεριώδους. Το ίδιο το νερό, ενώ είναι διαφανές στο ορατό, απορροφά έντονα και το υπεριώδες (κάτω των 300 nm) και το υπέρυθρο (πάνω από τα 1300 nm).

Οι πρωτεΐνες γενικά απορροφούν περισσότερο στο υπεριώδες από όσο στο ορατό. Συνέπεια των ανωτέρω είναι ότι οι μαλακοί ιστοί απορροφούν τις υπεριώδεις ακτίνες και τα μικρά μήκη κύματος του ορατού (μπλε και πράσινο), ενώ αφήνουν πιο «ελεύθερο πέρασμα» στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο.

Το υπέρυθρο Laser του Nd:YAG ή του CO₂ μπορεί να δώσει ισχυρή HMA, προσφιλές εργαλείο στην φωτο-εξάτμιση. Η ακτίνα του Nd:YAG (1064 nm) δεν απορροφάται από το αίμα, το νερό ή τους ιστούς, αλλά μεταδίδει αποδοτικά μεγάλο ποσό ενέργειας στους περισσότερους ιστούς μέσω έντονης διάχυσης, η οποία δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος. Η ακτίνα του CO₂ (10600 nm) αντίθετα, απορροφάται πολύ από το νερό. Πάχος ύδατος 50 μm απορροφά 99% της υπέρυθρης δέσμης του Laser CO₂.

Η υπέρυθρη ακτίνα του Er:YAG απορροφάται επίσης έντονα, αλλά επειδή το μήκος κύματος είναι μικρότερο του αντίστοιχου CO₂, η δέσμη του μπορεί να εστιαστεί σε μικρές διατομές και να καταστεί ικανή να τρυπήσει οστά ή το σμάλτο των δοντιών.

Η εξάρτηση της απορρόφησης από το είδος των μορίων και του βιολογικού ιστού καθιστά δυνατή χειρουργική επέμβαση μεγάλης ακρίβειας.

Παράδειγμα η επέμβαση στον οφθαλμό. Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας αποτελείται από επάλληλα στρώματα ιστών, το καθένα από τα οποία περιέχει διαφορετικά κύτταρα: φωτοϋποδοχείς, αίμα, μελανίνη κλπ.

Ο χειρουργός θα χρησιμοποιήσει το κόκκινο του Laser Kr, όταν θελήσει να «πειράξει» τα μόρια της μελανίνης στη χρωστική του επιθήλιου, ενώ το πράσινο του Laser Ar θα απορροφηθεί από το αίμα σχηματίζοντας συσσωματώματα.

Το ορατό φως απορροφάται πολύ λίγο στο φακό του οφθαλμού, ενώ απορροφάται έντονα στους φωτοϋποδοχείς, δηλαδή τα κύτταρα του αμφιβληστροειδή που μετατρέπουν την ορατή ακτινοβολία σε ηλεκτρικούς παλμούς, που «ταξιδεύουν» στο οπτικό νεύρο και καταλήγουν στον οπτικό φλοιό του εγκεφάλου.

2.4 Αυθόρμητη εκπομπή ΗΜΑ – φωτονίων

Μια από τις βασικές αρχές της φυσικής (κυρίως της θερμοδυναμικής) είναι ότι κάθε φυσικό σύστημα τείνει να βρίσκεται στην κατώτερη επιτρεπόμενη ενεργειακή κατάσταση (επίπεδο), που καλείται και θεμελιώδης.

Όταν προσφέρεται ενέργεια στο σύστημα, τα άτομα του υλικού διεγείρονται και το σύστημα μεταπηδά σε ανώτερη ενεργειακή κατάσταση (επίπεδο).

Οι όροι «διεγερμένα άτομα», «διεγερμένη κατάσταση» και «διεγερμένα ηλεκτρόνια» αποκτούν εδώ την ίδια έννοια.

Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια θα παραμείνουν κάποιο μικρό χρονικό διάστημα σε αυτήν την κατάσταση και θα επανέλθουν στη θεμελιώδη εκπέμποντας την περίσσεια ενέργεια στο περιβάλλον με τη μορφή ΗΜΑ – φωτόνια των οποίων η ενέργεια θα είναι ακριβώς ίση με την ενεργειακή διαφορά του ανώτερου (εκκίνησης) με το κατώτερο επίπεδο (άφιξης).

Κάθε διεγερμένο άτομο ενός υλικού εκπέμπει το φωτόνιό του σε τυχαία χρονική στιγμή και εντελώς ανεξάρτητα από το πότε θα εκπέμψει το διπλανό ή το παραδιπλανό άτομο. Αυτή η τυχαία και ανεξάρτητη εκπομπή φωτονίων από μια διεγερμένη ομάδα ατόμων, καλείται αυθόρμητη εκπομπή.

Η αυθόρμητη εκπομπή ανήκει σε μια ομάδα διεργασιών που καλούνται διεργασίες χαλάρωσης (relaxation processes), μέσω των οποίων ομάδα διεγερμένων ατόμων επιστρέφει σε ισορροπία (θεμελιώδης κατάσταση).

Η κλασική θεωρία προϋποθέτει ότι οι συχνότητες της εκπεμπόμενης ΗΜΑ από τα διεγερμένα άτομα θα είναι οι συγκεκριμένες χαρακτηριστικές συχνότητες των ατόμων αυτών, δηλαδή το εκπεμπόμενο φάσμα θα είναι ταυτόσημο με το απορροφούμενο.

Όμως η κλασική θεωρία δεν είναι αρκετή για να ερμηνεύσει φαινόμενα όπως ο φθορισμός (εκπομπή ΗΜΑ ταυτόχρονη με την απορρόφηση, μεγαλύτερου όμως μήκους κύματος) και ο φωσφορισμός (εκπομπή ΗΜΑ που διαρκεί αρκετό χρόνο μετά την απορρόφηση).

2.5 Θερμοδυναμική (θερμική) ισορροπία

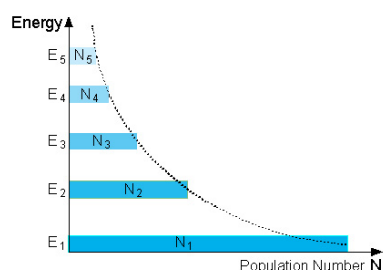
Από τη θεωρία της θερμοδυναμικής είναι γνωστό ότι μια ομάδα ατόμων σε θερμοκρασία T ($^{\circ}\text{K}$), σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον, κατανέμεται με τρόπο ώστε σε κάθε ενεργειακό επίπεδο να υπάρχουν τόσα άτομα (πληθυσμός), ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση Boltzmann:

$$N_i = \text{const} * e^{-E_i/kT}$$

N_i ο πληθυσμός του ενεργειακού επιπέδου E_i (αριθμός ατόμων ανά μονάδα όγκου)

k η σταθερά Boltzmann = $1,38 * 10^{23}$ Joule/ $^{\circ}\text{K}$

T η απόλυτη θερμοκρασία ($^{\circ}\text{K}$)



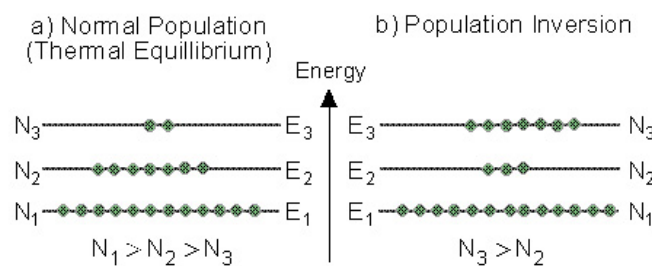
Σχήμα 5. Η κατανομή του πληθυσμού [8]

Η εξίσωση δείχνει ότι ο πληθυσμός κάθε ενεργειακού επιπέδου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και μειώνεται με την αύξηση του «ύψους» του ενεργειακού επιπέδου (σχήμα 5).

2.6 Αντιστροφή πληθυσμών-Οπτική Άντληση

Γενικότερα ισχύει πως ο πληθυσμός των υψηλότερων ενεργειακών καταστάσεων είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο χαμηλότερης ενεργειακής στάθμης. Σε ένα υλικό φυσιολογικής κατάστασης, ένα προσπίπτον φωτόνιο θα απορροφηθεί από ένα άτομο που θα «ανεβεί» με ψηλότερη ενεργειακή κατάσταση-στάθμη.

Όταν σε ένα υλικό (πολλά άτομα) προσφερθεί αρκετή ενέργεια είναι δυνατόν να παρατηρηθεί «αντιστροφή πληθυσμών» δηλαδή τουλάχιστον ένα ενεργειακό επίπεδο να αποκτήσει (προσωρινό) πληθυσμό μεγαλύτερο από ένα από τα «κατώτερα» από αυτό επίπεδα (σχήμα 6).



Σχήμα 6. Αντιστροφή πληθυσμού [8]

Η αντιστροφή πληθυσμών είναι μια από τις προ-απαιτούμενες καταστάσεις για τη δημιουργία της HMA Laser.

Η αύξηση του αριθμού των διεγερμένων ατόμων καλείται άντληση (pumping) και αν γίνει με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καλείται οπτική άντληση.

2.7 Εξαναγκασμένη εκπομπή

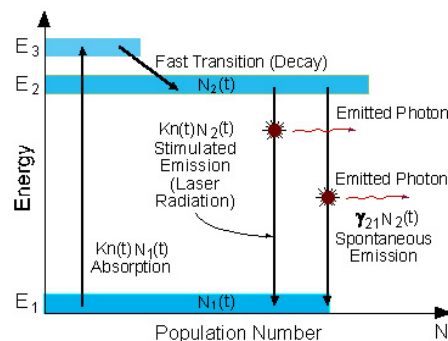
Τα άτομα παραμένουν στην διεγερμένη κατάσταση για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, της τάξης των 10^{-8} του δευτερολέπτου. Επιστρέφουν στη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση με αυθόρμητη εκπομπή (ενέργειας) (σχήμα 7).

Κάθε ενεργειακό επίπεδο έχει μια «μέση ζωή» που το χαρακτηρίζει. Με την παρέλευση μιας μέσης ζωής θα έχουν απομείνει στη διεγερμένη αυτή κατάσταση: $1/e$ ή 37% των διεγερμένων ατόμων.

Η κβαντική θεωρία περιγράφει την «κατάβαση» από ένα ενεργειακό επίπεδο σε άλλο ως στατιστική πιθανότητα. Η πιθανότητα μετάβασης από υψηλότερο σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέσης ζωής του υψηλότερου ενεργειακού επιπέδου. Η μετάβαση πραγματοποιείται ακολουθώντας κάποιους συγκεκριμένους κανόνες επιλογής (π.χ. οι πιθανότητες διαμοιράζονται μεταξύ των μεταβάσεων από το επίπεδο $4 \rightarrow 3$ ή $4 \rightarrow 2$ ή $4 \rightarrow 1$).

Όταν η πιθανότητα μετάβασης (εγκατάλειψης) από ένα ενεργειακό επίπεδο είναι χαμηλή και η μέση ζωή του της τάξης του 10^{-3} του δευτερολέπτου, το ενεργειακό επίπεδο καλείται μετασταθερό και μπορεί να συγκεντρώσει μεγάλο πληθυσμό ατόμων. Η ύπαρξη μετασταθερού ενεργειακού επιπέδου είναι απαραίτητη ιδιότητα του υλικού που θα εκπέμψει την ΗΜΑ Laser (σχήμα 4).

Σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών μεταξύ δυο ενεργειακών επιπέδων υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι τυχόν πρόσπτωση φωτονίου κατάλληλης ενέργειας θα εξαναγκάσει το διεγερμένο άτομο να επιστρέψει στο χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο εκπέμποντας ένα δεύτερο, ίδιο, φωτόνιο.



Σχήμα 7. Αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή [8]

Η πιθανότητα της εξαναγκασμένης εκπομπής εξαρτάται από την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου και τη σχέση της με την ενεργειακή διαφορά του αρχικού με το τελικό επίπεδο της μεταπήδησης-μετάβασης (σχήμα 7).

Δηλαδή κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή το εκπεμπόμενο φωτόνιο είναι ίδιο με το προσπίπτον φωτόνιο και έχουν

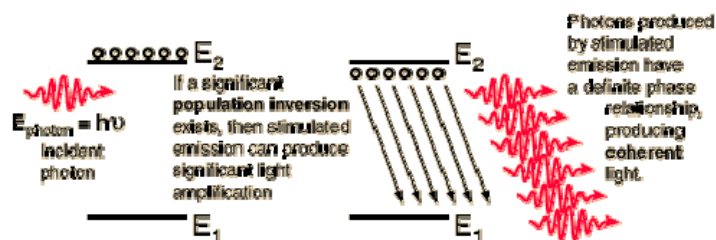
(α) ίδιο μήκος κύματος (άρα και συχνότητα) \Rightarrow μονοχρωματικότητα

(β) ίδια κατεύθυνση στο χώρο \Rightarrow κατευθυντικότητα

(γ) ίδια φάση \Rightarrow συμφασικότητα

Αυτές είναι και οι ιδιότητες του φωτός Laser.

Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της εξαναγκασμένης εκπομπής έχουμε την παραγωγή δύο ή περισσότερων ταυτόσημων φωτονίων, όταν ένα φωτόνιο προσπέσει σε κατάλληλα διεγερμένο άτομο. Επομένως έχουμε ενίσχυση της ΗΜΑ με την έννοια ότι αυξάνεται ο αριθμός των παραγομένων φωτονίων (σχήμα 8).



Σχήμα 8. Εξαναγκασμένη και ταυτόχρονη εκπομπή [5]

2.8 Εξισώσεις για το ρυθμό ροής φωτονίων κατά την αυθόρμητη εκπομπή

Για λόγους απλούστευσης θεωρούμε πως:

(α) το υλικό αποτελείται από πολλά ίδια άτομα

(β) κάθε άτομο έχει μόνον δυο ενεργειακά επίπεδα: E_1 και E_2

(γ) ο μοναδικός μηχανισμός αποδιέγερσης είναι η αυθόρμητη εκπομπή

(δ) στη χρονική στιγμή t υπάρχουν N_1 άτομα στο ενεργειακό επίπεδο E_1 και N_2 άτομα στο επίπεδο E_2 .

Αν t_2 η μέση ζωή στο ενεργειακό επίπεδο E_2 και g_{21} η σταθερά μετάβασης από το επίπεδο 2 στο επίπεδο 1, ισχύει:

$$t_2 = 1/g_{21}$$

και

$$N_2(t) = N_2(0) \exp(-g_{21}t) - N_2(0) \exp(-t/t_2)$$

Δηλαδή έχουμε μια εκθετική μείωση του πληθυσμού του επιπέδου E_2 . Σημειώνεται ότι η αυθόρμητη εκπομπή δεν επηρεάζεται από τον πληθυσμό του χαμηλότερου επιπέδου E_1 .

2.9 Εξαναγκασμένες μεταπηδήσεις και ροή φωτονίων

Το οπτικό σήμα είναι ένα ταλαντούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και κάθε άτομο μπορεί να περιγραφηθεί ως ηλεκτρικό δίπολο.

Όταν οπτικό σήμα κατάλληλης ενέργειας ($h\nu = E_2 - E_1$) πλησιάσει ένα σύνολο όμοιων ατόμων, θα αρχίσουν να ταλαντώνονται και τα άτομα που βρίσκονται στο ενεργειακό επίπεδο E_1 και τα άτομα του ενεργειακού επιπέδου E_2 .

Επομένως θα ξεκινήσουν δυο εξαναγκασμένες διαδικασίες: απορρόφηση και εκπομπή.

Πολλά από τα άτομα του επιπέδου E_1 θα απορροφήσουν ενέργεια με ρυθμό ανάλογο του γινομένου: πυκνότητα προσπίπτοντων φωτονίων επί τον πληθυσμό του επιπέδου E_1 . Κάθε φωτόνιο μπορεί να διεγείρει ένα άτομο.

Το οπτικό σήμα προκαλεί συγχρόνως και μεταπηδήσεις-αποδιεγέρσεις από το επίπεδο E_2 στο επίπεδο E_1 . Ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής είναι ανάλογος του γινόμενου: πυκνότητα προσπίπτοντων φωτονίων επί τον πληθυσμό του επιπέδου E_2 .

Υπάρχει μια σταθερά αναλογίας K στα δυο προαναφερθέντα γινόμενα, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη συχνότητα των προσπίπτοντων φωτονίων και έχει μέγιστη τιμή όταν είναι ίση με την συχνότητα μεταπήδησης.

Σε κάθε μεταπήδηση αντιστοιχεί μια λεπτή ζώνη συχνοτήτων. Αν η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτονίου ανήκει σε αυτήν την λεπτή ζώνη, η μεταπήδηση μπορεί να συμβεί, αλλιώς η σταθερά αναλογίας είναι μηδέν.

Η αυθόρμητη εκπομπή και η εξαναγκασμένη εκπομπή συμβαίνουν παράλληλα και ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Οι ρυθμοί τους μπορούν να προστεθούν. Όμως η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι αποτέλεσμα συντονισμού του ατόμου στο προσπίπτον σήμα και παράγονται δυο

συμφασικά φωτόνια στο χώρο και στο χρόνο (ίδια φάση, ίδιο πλάτος ταλάντωσης). Ενώ η αυθόρμητη εκπομπή παράγει φωτόνια προς όλες τις κατευθύνσεις και χρονικά ανεξάρτητα μεταξύ τους (μη συμφασικά).

2.10 Ενίσχυση

Μέχρι τώρα είδαμε δυο διαδικασίες που μειώνουν τον πληθυσμό του ανώτερου ενεργειακού επιπέδου E_2 (η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή) και μια διαδικασία που αυξάνει τον πληθυσμό του (η απορρόφηση).

Υπάρχουν επίσης δυο δυνατές καταστάσεις για κάθε ομάδα ατόμων:

(α) ενεργειακά επίπεδα με φυσιολογικό πληθυσμό (θερμική ισορροπία), όπου όσο υψηλότερο το επίπεδο, τόσο μικρότερος ο πληθυσμός του

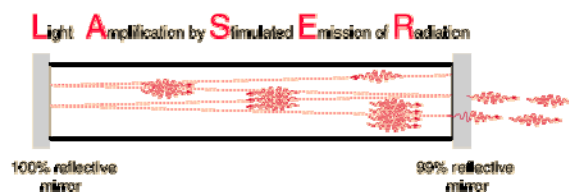
(β) ενεργειακά επίπεδα με αντιστροφή πληθυσμών

Στην (α) περίπτωση είναι δυνατή μόνον η απορρόφηση, επομένως η ένταση του προσπίπτοντος σήματος θα μειώνεται.

Στην περίπτωση (β) συμβαίνει το αντίθετο: το σύστημα των ατόμων προσφέρει ενέργεια στο προσπίπτον σήμα και το ενισχύει, με ρυθμό ανάλογο του γινομένου της διαφοράς των πληθυσμών και της έντασης του σήματος.

Η πιθανότητα εξαναγκασμένης μεταπήδησης (μέσω της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) είναι ίδια για τις δυο διαδικασίες (απορρόφηση και εκπομπή). Η κατεύθυνση κατά την οποία θα συμβούν περισσότερες μεταπηδήσεις εξαρτάται από τους εκάστοτε πληθυσμούς στα δυο ενεργειακά επίπεδα.

Αν ο ρυθμός απορρόφησης είναι ανάλογος του N_1 και ο ρυθμός εκπομπής ανάλογος του N_2 , με την ίδια σταθερά αναλογίας, τότε ο αριθμός των φωτονίων στην εξερχόμενη δέσμη Laser θα εξαρτάται από τη διαφορά $N_1 - N_2$.



Σχήμα 9. Ενίσχυση της δέσμης των φωτονίων με πολλαπλές διελεύσεις [5]

Πιο απλά, η περιγραφή της ενίσχυσης μπορεί να γίνει και ως εξής: Σε κατάσταση αντεστραμμένων πληθυσμών, η πρώτη εξαναγκασμένη εκπομπή

(με προσπίπτον φωτόνιο) θα δώσει δύο πανομοιότυπα φωτόνια, που με τη σειρά τους θα προκαλέσουν εξαναγκασμένη εκπόμπη, σε γειτονικά άτομα, κ.ο.κ.

Όταν τα διεγερμένα άτομα βρίσκονται σε κλειστό μακρόστενο χώρο, τα δύο άκρα του οποίου κλείνουν με καθρέφτες, τα φωτόνια θα διασχίζουν ξανά και ξανά το χώρο, αυτοπολλαπλασιαζόμενα (σχήμα 9). Βέβαια, στο «παιχνίδι» παραμένουν μόνον τα φωτόνια που προσπίπτουν (και ανακλώνται) κάθετα στους δύο καθρέφτες. Τα υπόλοιπα απορροφώνται στην παράπλευρη επιφάνεια του χώρου.

2.11 Laser τριών επιπέδων

Έστω ότι υπάρχουν 3 ενεργειακά επίπεδα E_1 , E_2 και E_3 . Έστω ότι η εκπομπή Laser συμβαίνει μεταξύ των επιπέδων E_1 και E_2 . Σε αυτές τις περιπτώσεις το υλικό απορροφά ενέργεια τόση ώστε να επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών μεταξύ E_1 και E_2 .

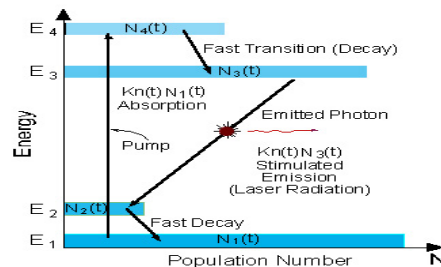
Τα άτομα απορροφούν ενέργεια και μεταπηδούν από τη θεμελιώδη κατάσταση E_1 , στην κατάσταση E_3 , όπου και παραμένουν για ελάχιστο χρονικό διάστημα, της τάξης των 10^{-8} s. Ακολουθεί αποδιέγερση (συνήθως χωρίς εκπομπή ΗΜΑ) προς το μετασταθερό ενεργειακό επίπεδο E_2 . Εκεί η μέση ζωή είναι σχετικά μεγάλη (10^{-3} s) και προλαβαίνουν να συγκεντρωθούν πολλά άτομα, να επιτευχθεί η αντιστροφή πληθυσμών και να δημιουργηθούν οι συνθήκες για την εκπομπή Laser.

2.12 Laser τεσσάρων επιπέδων

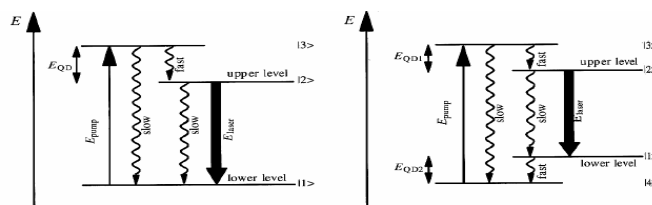
Το τέταρτο ενεργειακό επίπεδο είναι συνήθως το πρώτο πάνω από το θεμελιώδες (δηλαδή είναι E_2) και έχει πολύ μικρή μέση ζωή. Η εκπομπή Laser γίνεται μεταξύ των επιπέδων E_3 και E_2 . Η άντληση ενέργειας διεγείρει τα άτομα από το E_1 στο E_4 και από εκεί μεταπηδούν στο E_3 , όπου και συγκεντρώνονται μέχρι να σχηματιστεί η αντιστροφή πληθυσμών, μεταξύ E_3 και E_2 . Ο πληθυσμός του E_2 μειώνεται πολύ γρήγορα προς το θεμελιώδες E_1 και πρακτικά το N_2 είναι σχεδόν 0 (μηδέν). Επομένως και μικρή μόνο άντληση ατόμων προς την E_4 , δηλαδή τελικά στην E_3 , είναι ικανή να δημιουργήσει τις

απαραίτητες συνθήκες για εκπομπή HMA Laser. Το Laser τεσσάρων επιπέδων μπορεί να παρέχει συνεχή εκπομπή, ενώ το Laser τριών επιπέδων εκπομπή κατά παλμούς (σχήματα 10 και 11).

Ακόμη το Laser τεσσάρων επιπέδων έχει χαμηλό κατώφλι (απαιτείται μικρό ποσό αρχικής ενέργειας) και καλύτερη απόδοση.



Σχήμα 10. Laser τεσσάρων επιπέδων [8]



Σχήμα 11. Laser τριών και Laser τεσσάρων επιπέδων [11]

3. Η διάταξη του συστήματος παραγωγής

Η διάταξη του συστήματος παραγωγής των ακτίνων Laser είναι παρόμοια με ηλεκτρονικό ταλαντωτή.

Ταλαντωτής είναι το σύστημα που παράγει ταλαντώσεις χωρίς εξωτερικό μηχανισμό καθοδήγησης-τροφοδοσίας.

Παράδειγμα αναλόγου συστήματος είναι ο ενισχυτής ήχου που αποτελείται από μικρόφωνο, ενισχυτή και μεγάφωνο. Όταν το μικρόφωνο τοποθετείται μπροστά στο μεγάφωνο, σχηματίζεται κλειστό κύκλωμα και ακούγεται ένα ενοχλητικό σφύριγμα. Το σφύριγμα δημιουργείται χωρίς την παρεμβολή πηγής ήχου και αυτο-ενισχύεται όσο χρόνο το μικρόφωνο στέκεται μπροστά στο μεγάφωνο. Είναι ένα φαινόμενο «θετικής ανάδρασης».

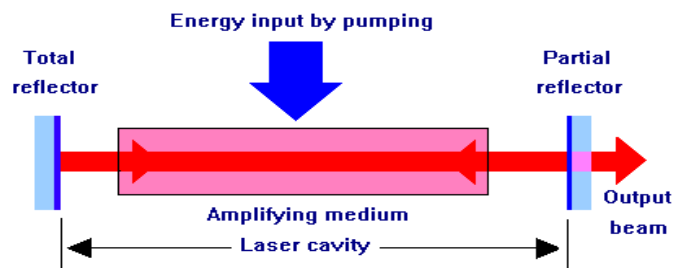
Γενικά, κάθε ταλαντωτής αποτελείται από 4 κύρια μέρη:

(α) πηγή ενέργειας

- (β) ενισχυτής
- (γ) ανάδραση θετικού συντονισμού
- (δ) σύζευξη εξόδου

Στη συσκευή Laser (σχήμα 12) τα αντίστοιχα μέρη είναι:

- (α) μηχανισμός διέγερσης
- (β) ενεργό υλικό (οπτικός ενισχυτής - οπτικό αντηχείο)
- (γ) οπτική ανάδραση
- (δ) σύζευξη εξόδου



Σχήμα 12. Σχηματική παράσταση της οπτικής κοιλότητας

3.1 Το ενεργό υλικό

Είναι μία ή δυο ή τρεις ομάδες ατόμων ή μορίων ή ιόντων, τουλάχιστον μια από τις οποίες μπορεί να διεγερθεί και να οδηγηθεί σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών. Η ομάδα αυτή μπορεί επίσης να αποδώσει ΗΜΑ με εξαναγκασμένη εκπομπή.

Έχουν δημιουργηθεί εκατοντάδες ενεργά υλικά σε στερεή, υγρή, αέρια μορφή όπως και σε μορφή πλάσματος, καθένα από τα οποία εκπέμπει το δικό του χαρακτηριστικό μήκος κύματος, ανάλογα με τις ενεργειακές διαφορές των επιτρεπόμενων επιπέδων του.

3.2 Ο μηχανισμός διέγερσης

Είναι η πηγή ενέργειας που διεγείρει τα άτομα (ή μόρια, ή ιόντα), του ενεργού υλικού δημιουργώντας την αντιστροφή των πληθυσμών.

Σύμφωνα με τον νόμο της διατήρησης της ενέργειας, η εξερχόμενη ΗΜΑ από τη συσκευή Laser πρέπει πάντοτε να έχει λιγότερη ενέργεια από όση

πρόσφερε ο μηχανισμός διέγερσης. Υπάρχουν Laser με απόδοση μικρότερη του 1%, όπως υπάρχουν και άλλα με απόδοση κοντά στο 100%.

Μηχανισμοί διέγερσης είναι:

(α) οπτική άντληση (διέγερση με φωτόνια)

Είναι ο συνηθέστερος μηχανισμός διέγερσης όταν το ενεργό υλικό είναι στερεής ή υγρής μορφής και πρόκειται για ΗΜΑ-φωτόνια που απορροφάται από το ενεργό υλικό.

Η ΗΜΑ «τροφοδοσίας» προέρχεται από λυχνίες αερίου (π.χ. ξέnon, κρυπτόν ή ήλιον) χαμηλής πίεσης από χαλαζία ή από άλλα Laser ή από πηγές κοινού φωτός.

(β) ηλεκτρική διέγερση (αερίου ενεργού υλικού)

με ηλεκτρική εκκένωση κατάλληλου αερίου, που βρίσκεται σε σωλήνα ηλεκτρικά ουδέτερο. Όταν εφαρμοστεί υψηλό ηλεκτρικό δυναμικό με τη βοήθεια ζεύγους καθόδου-ανόδου, ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν την κάθοδο, επιταχύνονται προς την άνοδο και στην πορεία τους συγκρούονται με τα μόρια του αερίου στα οποία και μεταδίδουν την κινητική τους ενέργεια, διεγείροντάς τα. Στην πράξη υπάρχει μια διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου στα άκρα του σωλήνα και ένας ισχυρός ηλεκτρικός παλμός δημιουργεί την εκφόρτιση με ηλεκτρική εκκένωση.

Σημειώνεται πως δύσκολα πετυχαίνονται οι κατάλληλες συνθήκες για άμεση διέγερση του αερίου ενεργού υλικού.

(γ) συγκρούσεις με άτομα

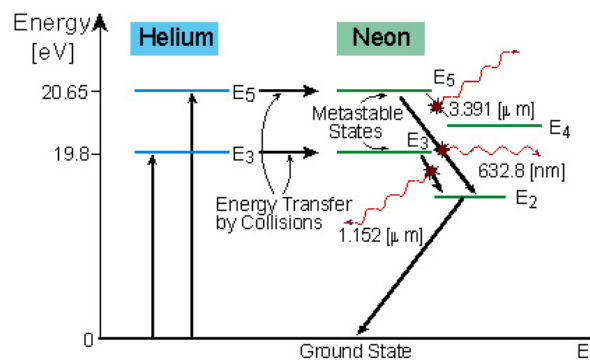
Είναι ο μηχανισμός που επιλέγεται για τα κοινά Laser He-Ne (σχήμα 13) και CO₂ και απαιτεί την ύπαρξη δύο τουλάχιστον αερίων μέσα στο σωλήνα.

Το ένα αέριο δέχεται την ενέργεια από τις συγκρούσεις με τα επιταχυνόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια, ενώ το δεύτερο δέχεται ενέργεια με τις συγκρούσεις με τα διεγερμένα μόρια του πρώτου αερίου.

Π.χ. στο Laser He-Ne η μάζα του ατόμου He είναι περίπου πέντε φορές μικρότερη από τη μάζα του ατόμου Ne, αλλά τα άτομα He είναι 6 φορές περισσότερα και επομένως έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης με τα ηλεκτρόνια και διέγερσής τους. Τα ενεργειακά επίπεδα E₃ και E₅ του νέon είναι πολύ κοντά στα αντίστοιχα διεγερμένα του ηλίου και «απορροφούν» με συγκρούσεις την ενέργειά τους. Είναι το φαινόμενο της συντονισμένης διέγερσης.

(δ) χημική διέγερση

(ε) ηλεκτρικό ρεύμα σε διόδους



Σχήμα 13. Το Laser He-Ne [8]

3.3 Ο μηχανισμός ανάδρασης

Ο μηχανισμός ανάδρασης επιστρέφει πίσω, στο εσωτερικό του ενεργού υλικού, μέρος της ΗΜΑ Laser που έχει δημιουργηθεί. Συνήθως επιτυγχάνεται με τη βοήθεια καθρεφτών, στα δύο άκρα του ενεργού υλικού, τοποθετημένων με τρόπο που να εξαναγκάζει την ΗΜΑ να διασχίζει επανειλημμένα το υλικό μπρος-πίσω, ανακλώμενη στις δυο παράλληλες και αντιμέτωπες επιφάνειές τους.

Όλο αυτό το σύστημα αποτελεί την «οπτική κοιλότητα - οπτικό αντηχείο». Ο ένας καθρέφτης είναι 100% αποδοτικός, ενώ ο δεύτερος 10-99%, ανάλογα με τον τύπο του Laser. Από τον δεύτερο καθρέφτη έχουμε την έξοδο της ΗΜΑ Laser κατά το υπόλοιπο (μέχρι το 100) ποσοστό (σχήμα 12).

Ο μηχανισμός ανάδρασης έχει στόχο την ενίσχυση της ακτινοβολίας μέσω των πολλαπλών «περασμάτων» του κάθε φωτονίου στο ενεργό υλικό. Όμως ο ίδιος μηχανισμός οδηγεί και στην «κατευθυντικότητα» της εξερχόμενης ΗΜΑ καθώς στη δέσμη παραμένουν μόνον τα φωτόνια που διατηρούν πορεία με διεύθυνση κάθετη στις επιφάνειες των καθρεφτών.

3.4 Ο συγχρονισμός στην έξοδο (σύζευξη εξόδου)

Πρόκειται για τον μηχανισμό που επιτρέπει την έξοδο της ΗΜΑ Laser από το ενεργό υλικό, μέσω του ημι-διαπερατού καθρέφτη.

Στα «συνεχή» Laser εξέρχεται μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας. Στα Laser κατά παλμούς εξέρχεται μεγάλο ποσοστό αλλά μόνον σε επιτρεπόμενες χρονικές στιγμές.

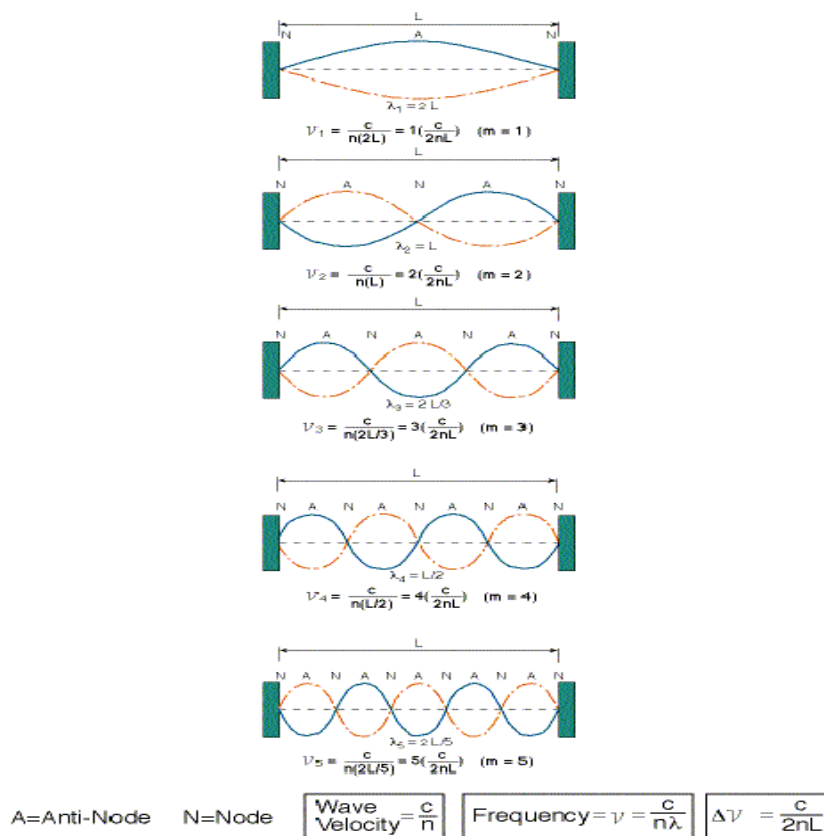
4. Οπτική κοιλότητα (οπτικό αντηχείο) και μορφή της ακτινοβολίας

Το υποκεφάλαιο αυτό εξηγεί τις συνθήκες που καθορίζουν τη μορφή της HMA Laser στις συνηθισμένες συσκευές.

4.1 Στάσιμα κύματα

Είναι γνωστό από τη θεωρία των κυμάτων ότι όταν δυο κύματα με παραπλήσια πλάτη ταλάντωσης και ίδια συχνότητα κινούνται στην ίδια ευθεία με αντίθετες κατευθύνσεις, «προστίθενται» δημιουργώντας μια ταλάντωση που φαίνεται σταθερή στο χώρο: ένα στάσιμο κύμα.

Ένα ΗΜ κύμα στο ενεργό υλικό της συσκευής Laser που κινείται από αριστερά προς τα δεξιά, ανακλάται από τον δεξί καθρέφτη και αρχίζει να κινείται (από τα δεξιά) προς τα αριστερά. Το πριν την ανάκλαση κύμα δημιουργεί ζεύγος κυμάτων με το ανακλώμενο, ίδιας συχνότητας και πλάτους, που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Δηλαδή έχουμε στάσιμα κύματα κατά μήκος του οπτικού (κεντρικού) άξονα του ενεργού υλικού (και) της οπτικής κοιλότητας (σχήμα 14). Τα ΗΜ κύματα στην οπτική κοιλότητα είναι τριών διαστάσεων.



Σχήμα 14. Στάσιμα κύματα στην οπτική κοιλότητα [8]

4.2 Το μήκος της οπτικής κοιλότητας

Για να διατηρηθεί η ίδια φάση των κυμάτων στο επίπεδο του καθρέφτη θα πρέπει η απόσταση ανάμεσα στους καθρέφτες (L) να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος (λ).

$$\text{Δηλαδή } \lambda_m = 2L/m \quad (1)$$

όπου m ο αριθμός των μισών μηκών κύματος
και λ_m το μήκος κύματος στη συγκεκριμένη λειτουργία

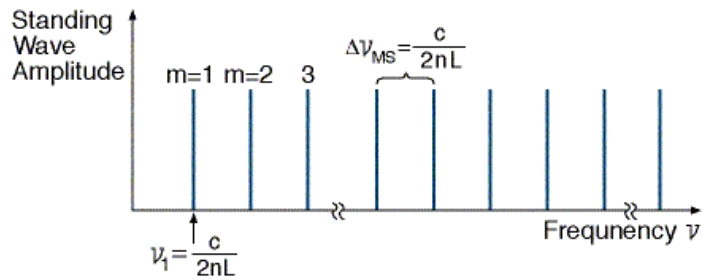
$$\text{Ισχύει, ταυτόχρονα, και } c = \lambda_0 \nu = n \lambda_m \nu_m \quad (2)$$

όπου c η ταχύτητα της ΗΜΑ στο κενό
 λ_0 το μήκος κύματος της ΗΜΑ στο κενό
 n ο δείκτης διάθλασης του ενεργού υλικού

$$\text{Δηλαδή } \lambda_m = \lambda_0/n \quad (3)$$

Από τις (1) και (3) έχουμε ότι στη βασική λειτουργία ($m = 1$ και $\lambda = 2L$) της οπτικής κοιλότητας θα ισχύει $\nu = c/2nL$ (4)

και στις υπόλοιπες $\nu = m (c/2nL)$ (σχήμα 15) (5)



Σχήμα 15. Οι "επιτρεπόμενες" συχνότητες [8]

Επίσης προϋπόθεση για τη διατήρηση των στάσιμων κυμάτων είναι να αντιστοιχούν «κόμβοι» στο επίπεδο των καθρεφτών.

Όταν $m = 1$ οι κόμβοι είναι δύο, ένας σε κάθε καθρέφτη.

Όταν $m = 2$, οι κόμβοι είναι τρεις (προστίθεται ένας στη μέση), κ.ο.κ.

Προσοχή χρειάζεται στους υπολογισμούς και όσον αφορά στον δείκτη διάθλασης. Θεωρείται $n =$ σταθερό για όλο το μήκος της οπτικής κοιλότητας. Πολλές φορές όμως οι καθρέφτες δεν τοποθετούνται ακριβώς στα άκρα του ενεργού υλικού και οι υπολογισμοί περιπλέκονται.

Για την παραγωγή HMA Laser στο ορατό, ο αριθμός m πρέπει να είναι πολύ μεγάλος. Π.χ. στο (εκπαιδευτικό) αέριο Laser He-Ne η χαρακτηριστική του ερυθρά ακτινοβολία με $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ εκπέμπεται όταν $m = 10^6$ ($L = 30 \text{ cm}$).

4.3 Κατώφλι ενίσχυσης

Καθώς ΗΜ κύματα διαπερνούν το ενεργό υλικό πολλές φορές, υφίστανται σημαντική απορρόφηση. Επομένως εξέρχονται της συσκευής μόνο τα κύματα που έχουν ενισχυθεί αρκετά ώστε να επιζήσουν.

Η ελάχιστη ενίσχυση που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της συσκευής Laser λέγεται κατώφλι ενίσχυσης.

Η ύπαρξη του κατωφλίου ενίσχυσης περιορίζει τον αριθμό των κόμβων που είναι επιτρεπτοί για τη δημιουργία δέσμης Laser.

Ανάλογα με την προτιθέμενη εφαρμογή του Laser γίνεται και η επιλογή των παραμέτρων στην κατασκευή της διάταξης.

(α) Στις εφαρμογές με ισχυρή δέσμη όπως στην επεξεργασία υλικών ή στην χειρουργική, απαιτείται μεταφορά ενέργειας σε συγκεκριμένο στόχο. Δεν έχει σημασία η ιδιαίτερη ακρίβεια στο μήκος κύματος.

(β) Σε εφαρμογές όπου κυριαρχεί το φαινόμενο της συμβολής, όπως στην ολογραφία ή σε μετρήσεις ακρίβειας, το μήκος κύματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν συγκεκριμένο και χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές.

(γ) Ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια (στο μήκος κύματος) απαιτείται σε εφαρμογές φασματοσκοπίας και φωτοχημείας.

(δ) Ακρίβεια απαιτείται και για εφαρμογές Laser με ισχυρούς παλμούς, μικρής διάρκειας, όπου ειδικός μηχανισμός «κλειδώνει τη συμπεριφορά της διάταξης» σε ορισμένη θέση.

4.4 Η μορφή της ακτινοβολίας στο χώρο

Εξαρτάται και καθορίζεται από

(α) τη συχνότητα (ν) ή το μήκος κύματος (λ)

(β) την κατανομή της έντασης κατά μήκος του άξονα διάδοσης – οπτικού άξονα, που συνδέεται με τον αριθμό των κόμβων στα στάσιμα κύματα.

(γ) την κατανομή της έντασης στην επιφάνεια μιας κάθετης διατομής της δέσμης (επιφάνεια κάθετη στο άξονα διάδοσης)

Στην περίπτωση (γ) δεν ανιχνεύεται ιδανική κατανομή Gauss, αλλά κάποιες παραμορφώσεις που εξαρτώνται από το πλάτος και το ύψος της οπτικής κοιλότητας, όπως και την παραλληλία των δύο καθρεφτών μεταξύ τους. Πολύ μικρή απόκλιση μπορεί να προκαλέσει σημαντικές διαφορές «δρόμου» μεταξύ των ακτίνων στο εσωτερικό της συσκευής Laser.

5. Ενίσχυση – Απόδοση

Η ισχύς της εξερχόμενης HMA Laser σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή καθορίζεται από δυο παράγοντες (αντιμαχόμενους)

(α) την ενίσχυση της HMA στο ενεργό υλικό, που εξαρτάται από

(i) την αντιστροφή πληθυσμών

(ii)την αυθόρμητη εκπομπή με φθορισμό που συνοδεύει την εξαναγκασμένη εκπομπή

(β) τις απώλειες κατά τη δημιουργία της Laser, δηλαδή:

(i) το ποσοστό ανάκλασης στους καθρέφτες

(ii) την απορρόφηση και σκέδαση της ακτινοβολίας μέσα στο ενεργό υλικό

(iii) την περίθλαση της ακτινοβολίας στα μικρά αντικείμενα της διάταξης

Ο πρώτος παράγοντας πρέπει να έχει τουλάχιστον ίση απόδοση (θετική) με την (αρνητική) απόδοση του δεύτερου παράγοντα, προκειμένου να «γεννηθεί» η HMA Laser.

5.1 Φθορισμός

Η δημιουργία HMA Laser είναι δυνατή μόνο σε υλικά τα οποία εκπέμπουν με φθορισμό τουλάχιστον σε έναν από τους τρόπους αποδιέγερσης. Όταν η μεταπήδηση συμβεί μεταξύ δυο καθορισμένων και «ευκρινών» ενεργειακών επιπέδων, η γραφική παράσταση της ΗΜ ισχύος σε συνάρτηση με την συχνότητα είναι μια πολύ στενή «καμπάνα» (σχήμα 16). Όσο δε πιο στενή η γραφική παράσταση, τόσο πιο εύκολα θα επιτευχθεί η αντιστροφή πληθυσμών.

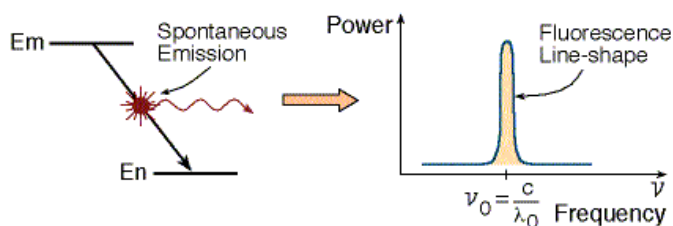
Στην πράξη όμως τα ενεργειακά επίπεδα (και της «αναχώρησης» και της «άφιξης») είναι πολλαπλά, με αποτέλεσμα το εύρος της καμπάνας-φάσματος να είναι σημαντικό (πολλές, παραπλήσιες συχνότητες HMA εκπομπής) (σχήμα 17).

Το εύρος του φάσματος (φθορισμού) υπακούει και στην αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg:

$$\Delta E * \Delta t > h \quad \text{ή}$$

$$\Delta \nu > 1/\Delta t \quad (\text{εφόσον } \Delta E = h * \Delta \nu)$$

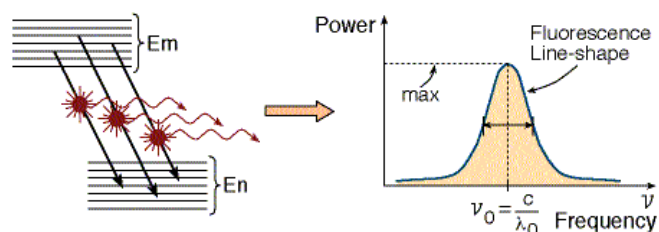
Δηλαδή όσο μακροβιότερο είναι το ενεργειακό επίπεδο, τόσο στενότερο θα είναι το φάσμα της ΗΜ εκπομπής.



Σχήμα 16. Δημιουργία και φάσμα της ΗΜ εκπομπής [8]

Στα Laser αερίου (και κυρίως αερίου χαμηλής πίεσης) υπάρχει ένας ακόμη μηχανισμός διεύρυνσης του φάσματος εκπομπής, που πηγάζει από το φαινόμενο Doppler: η πραγματική συχνότητα ενός κύματος ανιχνεύεται λίγο μετατοπισμένη όταν υπάρχει σχετική ταχύτητα μεταξύ πηγής και ανιχνευτή. Τα μόρια των αερίων βρίσκονται σε συνεχή κίνηση προς τυχαίες κατευθύνσεις. Ακόμα και για τα μόρια που εκπέμπουν ΗΜΑ μιας συγκεκριμένης συχνότητας, η συχνότητά τους θα λαμβάνεται ως ζώνη συχνοτήτων από τον δέκτη, εξαιτίας του φαινομένου Doppler.

Στα Laser αερίου η ζώνη συχνοτήτων γίνεται ακόμη ευρύτερη εξαιτίας των συγκρούσεων μεταξύ των μορίων του αερίου. Το πλάτος της ζώνης αυξάνει ανάλογα με την πίεση του αερίου.



Σχήμα 17. Δημιουργία και φάσμα της διευρυμένης ΗΜ εκπομπής [8]

5.2 Επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις

Κάθε φορά που η ΗΜΑ Laser διασχίζει το ενεργό υλικό, ενισχύεται. Όμως υπάρχουν απώλειες από:

- (α) σκέδαση και απορρόφηση στους καθρέφτες
- (β) σκέδαση και απορρόφηση στο ενεργό υλικό και στα τοιχώματα
- (γ) περίθλαση στα μικρά αντικείμενα της διάταξης

(δ) ατέλειες του συστήματος συγχρονισμού κατά την έξοδο

Για να φτάσει η HMA Laser στην έξοδο θα πρέπει η ενίσχυση να είναι τουλάχιστον λίγο μεγαλύτερη από τις απώλειες.

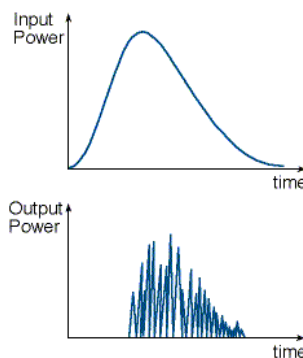
Τυπική τιμή αυτοπολλαπλασιασμού στο Laser He-Ne για ένα «πέρασμα» είναι 5%, ενώ 200 «περάσματα» πολλαπλασιάζουν 17000 φορές!

5.3 Καμπύλη ενίσχυσης

Η ενίσχυση εξαρτάται από το βαθμό της αντιστροφής πληθυσμών και από το εύρος της ζώνης των συχνοτήτων.

Σε Laser συνεχούς εκπομπής, όταν προσφέρεται συνεχώς ενέργεια στο ενεργό υλικό, θα παρατηρούνται σταθερή ενίσχυση και σταθερή ισχύς στην έξοδο.

Σε παλμικό Laser η ενέργεια προσφέρεται με μορφή παλμών ώστε η ισχύς στην έξοδο να είναι μεγαλύτερη. Κάθε παλμός HMA Laser στην έξοδο διαρκεί περίπου 1 ms (millisecond), αλλά αποτελείται από εκατοντάδες μικρότερους παλμούς-σπίθες που διαρκούν περίπου 1 μs (microsecond) και διαφέρουν μεταξύ τους και στη διάρκεια και στην ισχύ (σχήμα 18).



Σχήμα 18. Κάθε παλμός στην έξοδο αποτελείται από εκατοντάδες μικρότερους παλμούς-σπίθες [8]

Σε μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παλμικών λέιζερ, που ονομάζεται **Q-switching**, ένας ηλεκτρομαγνητικός διακόπτης εισάγεται στο υλικό του λέιζερ και εμποδίζει την εκπομπή λέιζερ μπλοκάροντας την έξοδο του φωτός όταν η πληθυσμιακή αναστροφή φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα. Όταν ο διακόπτης ανοίγει, το φως του λέιζερ εκπέμπεται απελευθερώνοντας μεγάλα ποσά ενέργειας σε σύντομο χρονικό

διάστημα. Επειδή τα παλμικά λέιζερ αποθηκεύουν ενέργεια και την εκπέμπουν σε έναν πολύ σύντομο παλμό και όχι συνεχώς, τα επίπεδα ισχύος κατά τη διάρκεια του σύντομου παλμού είναι εξαιρετικά υψηλά. Ένας τυπικός παλμός έχει χρονική διάρκεια μερικά nanoseconds (10^{-9} s) και μεταφέρει ενέργεια (της τάξης μερικών J) ικανή να εξαερώσει έναν μικρό όγκο ιστού. Ο ρυθμός επανάληψης είναι αρκετοί παλμοί ανά δευτερόλεπτο (1-10 Hz). Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την επίτευξη στιγμιαίας ισχύος πάνω από ένα εκατομμύριο watts (1 megawatt) και επίσης πολύ υψηλών τιμών πυκνότητας ισχύος σε ένα παλμό.

6. Είδη Laser και οι χαρακτηριστικές τους ιδιότητες

6.1 Περιληπτικά

Τα Laser διαιρούνται σε ομάδες σύμφωνα με:

- (α) την κατάσταση του ενεργού υλικού (στερεό, υγρό, αέριο, πλάσμα)
- (β) την ζώνη μήκους κύματος (ορατό, υπέρυθρο, υπεριώδες...)
- (γ) τη μέθοδο διέγερσης του ενεργού υλικού (οπτική, ηλεκτρική,...)
- (δ) τα χαρακτηριστικά της εξερχόμενης ΗΜΑ Laser
- (ε) τον αριθμό των ενεργειακών επιπέδων που παίρνουν μέρος στη διαδικασία.

Το ενεργό υλικό καθορίζει:

1. το μήκος κύματος της εξερχόμενης δέσμης
2. τη μέθοδο διέγερσης που ενδείκνυται
3. την τάξη μεγέθους της εξερχόμενης ισχύος
4. την αποδοτικότητα του συστήματος

Το ενεργό υλικό καθορίζει πολλές ιδιότητες του Laser και επί πλέον πρέπει να είναι «διαφανές» στο μήκος κύματος που το ίδιο «παράγει».

Θα δούμε, στα επόμενα κεφάλαια, τις κατηγορίες των Laser ανάλογα με την κατάσταση και το είδος του ενεργού υλικού.

A. Τα αέρια Laser χωρίζονται σε τέσσερις υπο-ομάδες:

- (i) ατομικά (π.χ. He-Ne και He-Cd)

- (ii) ατμών μετάλλου (Cu, Au)
- (iii) μοριακά (CO₂, N₂, χημικά, μακρινού υπέρυθρου, excimer)
- (iv) ιοντικά (Ar⁺, Kr⁺)

B. Τα υγρά Laser είναι κυρίως χρωστικών dye

Γ. Τα στερεά Laser χωρίζονται σε:

- (i) μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη, σαπφείρου)
- (ii) ημιαγωγών (διόδων)

Δ. Ειδικά Laser

- (i) ακτίνων X
- (ii) ελεύθερου ηλεκτρονίου

6.2 Laser αέριας κατάστασης

Τα περισσότερα αέρια (άτομα ή μόρια) μπορούν να οδηγηθούν σε κατάσταση κατάλληλη για εκπομπή HMA Laser, κυρίως όταν βρίσκονται υπό χαμηλή πίεση.

Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους διευκολύνει η χαμηλή πίεση είναι:

- (α) για να είναι δυνατή η ηλεκτρική εκκένωση μακράς πορείας, κατά μήκος του σωλήνα με το ενεργό υλικό, στα δυο άκρα του οποίου εμβαπτίζονται τα δύο ηλεκτρόδια.
- (β) για να παραχθεί ΗΜ φάσμα πολύ μικρού εύρους συχνοτήτων, το οποίο ευρύνεται όταν παρεμβάλλονται συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων.

Το πρώτο αέριο Laser κατασκευάστηκε από τους Maiman TH και Javan A, το 1961, ήταν He-Ne, εξέπεμπε στο κοντινό υπέρυθρο (1152 nm). (Το πρώτο Laser ήταν ρουβινίου και είχε κατασκευαστεί ένα χρόνο νωρίτερα).

Τα αέρια Laser μπορούν να διεγερθούν με ηλεκτρική εκκένωση που προκαλείται με εφαρμογή υψηλού δυναμικού στα ηλεκτρόδια στα άκρα του σωλήνα. Ηλεκτρόνια αποσπώνται από την κάθοδο, επιταχύνονται προς την άνοδο, συγκρούονται με τα μόρια του αερίου και τους μεταδίδουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας διεγείροντάς τα (η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται στις λάμπες φθορισμού).

Η οπτική άντληση ως μέθοδος διέγερσης είναι δύσκολη για τα Laser αερίου. Για να απορροφηθεί αρκετό ποσό ενέργειας απαιτείται το φάσμα απορρόφησης του υλικού να είναι παρόμοιο με το φάσμα εκπομπής της πηγής. Όμως οι κοινές πηγές φωτός έχουν ευρύ φάσμα εκπομπής, ενώ τα άτομα του αερίου απορροφούν σε «λεπτές γραμμές». Γενικά η οπτική άντληση δεν επιλέγεται για τη διέγερση του ενεργού υλικού αέριων Laser. Εξαίρεση είναι η χρήση της δέσμης Laser CO₂ για την οπτική άντληση του ενεργού υλικού του μακρινού υπέρυθρου αερίου Laser.

6.2.1 Αέρια ατόμων

Το ενεργό υλικό είναι ένα ευγενές αέριο σε ουδέτερη κατάσταση ή ατμοί μετάλλου.

Το ενεργό αέριο είναι αναμεμιγμένο με δεύτερο αέριο, που βοηθά στην αύξηση της απόδοσης της διαδικασίας.

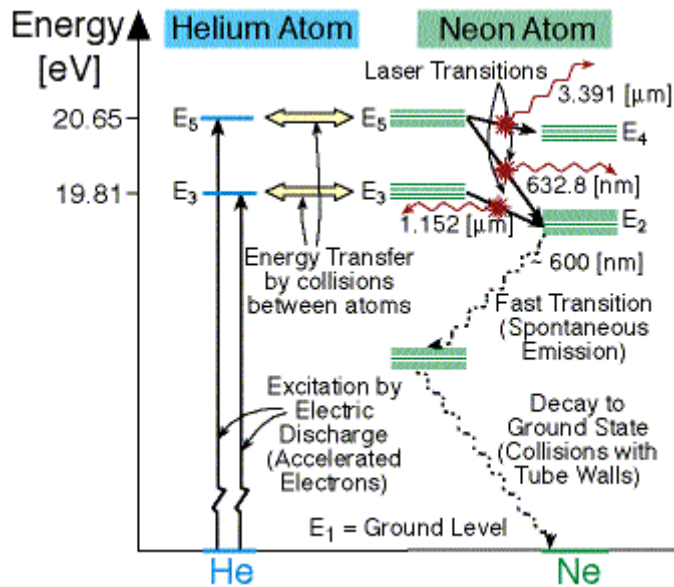
Για μεγαλύτερη ενίσχυση απαιτείται μικρή διάμετρος του σωλήνα. Τα αέρια Laser ατόμων συνήθως λειτουργούν με συνεχή τρόπο.

6.2.1.1 Laser He-Ne

(σχήμα 19)

Ήταν το πιο διαδεδομένο Laser μέχρι πριν λίγα χρόνια που εμφανίστηκε το Laser διόδων.

Το ενεργό υλικό είναι το νέον (Ne) που έχει τέσσερα ενεργειακά επίπεδα.



Σχήμα 19. Το νέον έχει δύο μετασταθερά ενεργειακά επίπεδα [8]

Δύο μετασταθερά ενεργειακά επίπεδα δρουν ως άνω επίπεδα, ενώ υπάρχουν άλλα δυο που δρουν ως κάτω επίπεδα. Δηλαδή έχουμε τρία εκπεμπόμενα μήκη κύματος: λ_{54} , λ_{52} , λ_{32} .

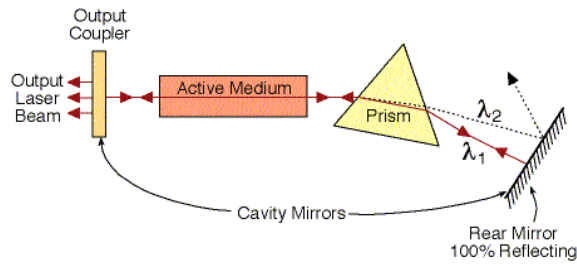
Η παρουσία του αερίου He βοηθά για δύο κύριους λόγους:

(α) η απευθείας διέγερση του Ne είναι πολύ λιγότερο αποδοτική σε σχέση με το He (περίπου 1:200)

(β) 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 λ_{52} που έχει και τη μεγαλύτερη ένταση, η οποία θα ήταν ακόμη εντονότερη αν δεν υπήρχε η αποδιέγερση λ_{54} που μειώνει και αυτή (παράλληλα) τον πληθυσμό του E_5 .

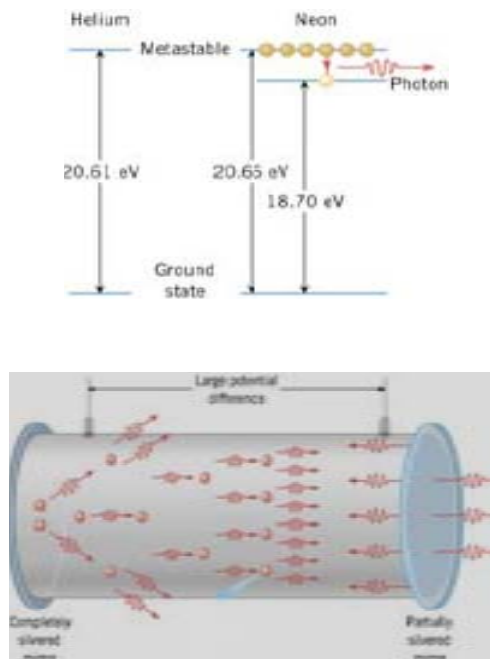
Ειδική επικάλυψη των καθρεφτών και της παράπλευρης επιφάνειας πριμοδοτεί την ανάκλαση των επιθυμητών λ και απορροφά τα υπόλοιπα, έτσι ώστε να ενισχυθεί μόνο το επιλεγμένο μήκος κύματος (σχήματα 20 και 21).



Σχήμα 20. Η ειδική επικάλυψη στους καθρέφτες προμηδοτεί την ενεργή επιστροφή μόνον των επιθυμητών λ , εδώ το λ_1 [8]

Στο Laser He-Ne ο χρόνος ημιζωής του χαμηλού Laser ενεργειακού επιπέδου δεν είναι αρκετά σύντομος, όμως βελτιώνεται με τις συγκρούσεις. Οι συγκρούσεις πολλαπλασιάζονται όταν τα τοιχώματα του σωλήνα πλησιάζουν, επομένως η απόδοση του Laser αυξάνει όσο ο σωλήνας έχει μικρότερη διάμετρο (π.χ. 2 mm).

Στο εργαστήριο έχει λειτουργήσει Laser He-Ne με ισχύ εξόδου 100 mW, όμως τα He-Ne του εμπορίου έχουν έξοδο 0,5-50 mW.



Σχήμα 21. Διατηρούνται τα φωτόνια της παράλληλης με τον άξονα πορείας
http://instructor.physics.lsa.umich.edu/winter2008/126/Lec22_Atomic_post.pdf

6.2.1.2 Laser ατμών μετάλλου

Διακρίνονται σε δύο είδη: (α) ουδέτερα (χαλκού Cu, χρυσού Au) και

(β) ιοντισμένα (ηλίου-καδμίου He-Cd) και εκπέμπουν (με υψηλή απόδοση) ΗΜΑ ορατού με τη μορφή πυκνών παλμών.

Στο Laser ατμών μετάλλου ο σωλήνας είναι γεμάτος με ένα αδρανές αέριο (π.χ. νέον) και με 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 αυξάνεται πολύ, ξεπερνώντας τους 1083 °C, δηλαδή το 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 ΗΜ κύματα, ένα πράσινο ($\lambda=511$ nm) και ένα κίτρινο ($\lambda=578$ 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 100 ns.

Τα Laser ατμών χαλκού βρίσκουν εφαρμογή:

(α) ως πηγή ενέργειας για Laser χρωστικής
(β) για φωτισμό αντικειμένων στη φωτογράφιση μεγάλης ταχύτητας (π.χ. μιας σφαίρας όπλου)

(γ) 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

(δ) στη φωτοδυναμική θεραπεία: ειδικό φάρμακο χορηγείται στον καρκινοπαθή και το φως Laser καταστρέφει επιλεκτικά καρκινικά κύτταρα (όσα έχουν απορροφήσει το φάρμακο)

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

Στο εμπόριο η ισχύς των Laser χαλκού φτάνει μέχρι 100 W, αλλά σε ειδικά εργαστήρια έχει φτάσει και 6000 W.

Το Laser ατμών χρυσού έχει πολλά στοιχεία και ιδιότητες κοινά με το Laser χαλκού. Το Laser χρυσού εκπέμπει στο κόκκινο ($\lambda=628$ nm).

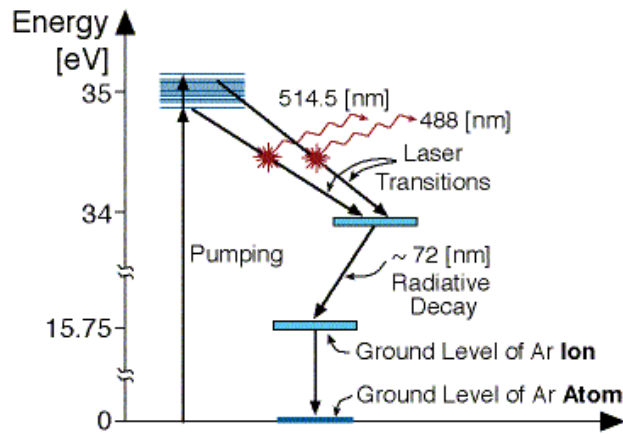
6.2.1.3 Ηλίου Καδμίου

Το Laser ηλίου-καδμίου περιέχει-βασίζεται στο μέταλλο κάδμιο, η λειτουργία του όμως είναι παρόμοια με τη λειτουργία του Laser He-Ne. Τα ελαφρά ιοντισμένα άτομα καδμίου δίνουν πολλά εκπεμπόμενα μήκη κύματος Laser στην περιοχή του ιώδους και του υπεριώδους. Η κύρια εφαρμογή τους είναι στην οπτική, ειδικότερα στην ολογραφία.

6.2.2 Αέρια Ιόντων

Τα πιο κοινά είναι τα ιόντα των ευγενών αερίων αργόν (Ar^+) (σχήμα 22) και κρυπτόν (Kr^+). Ο σωλήνας π.χ. του πρώτου περιέχει αέριο αργόν που μετατρέπεται σε πλάσμα όταν διεγερθεί. Πλάσμα είναι 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^+ .

Τα βασικά μήκη κύματος του Laser Ar^+ είναι ένα μπλε ($\lambda=0.488$ μm) και ένα πράσινο ($\lambda=0.515$ μm), υπάρχουν όμως και δυο υπεριώδη.



Σχήμα 22. Laser Ar⁺ [8]

Από τις ελκυστικές εφαρμογές του Laser Ar⁺ 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⁺ απαιτεί μεγάλη πυκνότητα ρεύματος (100-500 A/cm²), (επομένως και στενό σωλήνα) και συνεχές δυναμικό μερικών εκατοντάδων Volts. Παράγονται μεγάλα ποσά θερμότητας, που καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων ψύξης και ανθεκτικών υλικών κατασκευής (οξείδιο βυρηλλίου). Όποιος δουλεύει με Laser αργού πρέπει να μην παραλείπει ειδικά μέτρα προστασίας (π.χ. ειδικά γυαλιά).

Τα Laser Ar⁺ βρίσκουν εφαρμογή:

- (α) ως πηγή ενέργειας για Laser χρωστικής
- (β) στη γενική χειρουργική (απορρόφηση ενέργειας σε συγκεκριμένα μήκη κύματος)
- (γ) στην οφθαλμολογία (στην αποκόλληση του αμφιβληστροειδή)
- (δ) στην τοξικολογία – ιατροδικαστική (μετρήσεις με φθορισμό υλικών)
- (ε) στην ολογραφία (επειδή έχει αρκετή ισχύ στο ορατό μέρος του φάσματος)

Το Laser Kr⁺ έχει παρόμοιο τρόπο δημιουργίας και ιδιότητες, αλλά ακόμη χαμηλότερη απόδοση και ισχύ εξόδου της τάξης των 100 mW.

Η κύρια εφαρμογή του είναι στη διασκέδαση (φανταστικά οπτικά εφέ στην περιοχή του κίτρινου-κόκκινου).

6.2.3 Αέρια μορίων

Κατά την μέχρι τώρα ανάλυση των ειδών Laser η δημιουργία της δέσμης Laser βασιζόταν 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.

6.2.3.1 Laser CO₂

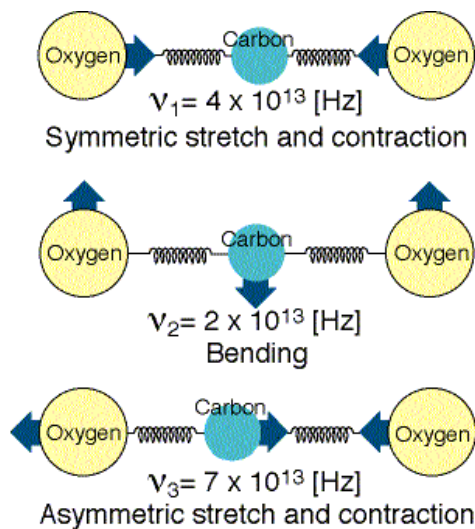
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το Laser CO₂. Το CO₂ είναι το ενεργό υλικό και δω όμως προστίθενται, άλλα αέρια που αυξάνουν την αποδοτικότητα της συσκευής: N₂ (άζωτο) και He, η αναλογία των οποίων εξαρτάται από τον μηχανισμό διέγερσης και το είδος της λειτουργίας (π.χ. συνεχής).

Το μόριο του CO₂ παρουσιάζει τρεις δυνατούς τρόπους ταλάντωσης-δόνησης (σχήμα 23):

(α) τον συμμετρικό (κατά μήκος του άξονα του επιμήκους μορίου) με συχνότητα ν_1

(β) τον με κάμψη (σε διεύθυνση κάθετη ως προς τον άξονα) με συχνότητα ν_2

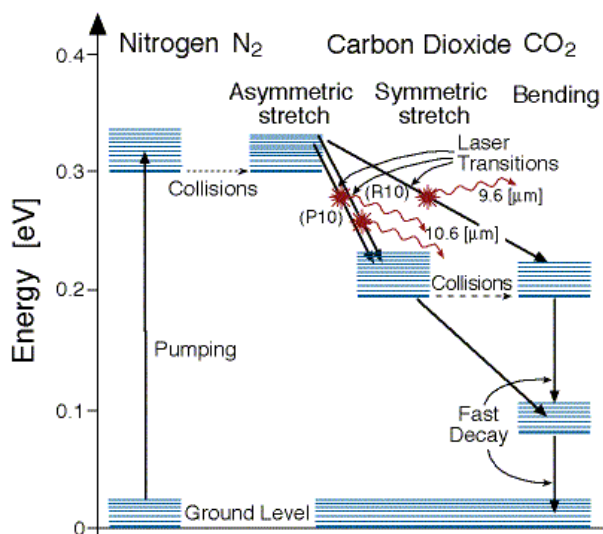
(γ) τον ασύμμετρο (όπως ο πρώτος τρόπος αλλά με διαφορετική κατεύθυνση) με συχνότητα ν_3



Σχήμα 23. Το μόριο του CO₂ με τους τρεις δυνατούς τρόπους ταλάντωσης-δόνησης [8]

Η αποδιέγερση που δημιουργεί την HMA 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 CO₂ επιταχύνει ηλεκτρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια μεταφέρεται σε συγκρούσεις στα μόρια του N₂ και του CO₂ (σχήμα 24). Τα μόρια του N₂ βοηθούν τη διαδικασία διέγερσης των CO₂. Τα μόρια/άτομα He βοηθούν κυρίως στην απομάκρυνση των «ενοχλητικών» ποσών θερμότητας (έχουν ειδική θερμότητα 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του N₂).



Σχήμα 24. Laser CO₂ [8]

Τυπική αναλογία αέριων όγκων: 10% CO₂, 10 % N₂ και 80% He.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι Laser CO₂:

- (i) συνεχούς ροής/τροφοδοσίας, που επιλέγεται όταν απαιτείται ισχύς (μερικές εκατοντάδες Watts)
- (ii) σφραγισμένου αερίου, που απαιτεί την ύπαρξη καταλύτη, επειδή με το χρόνο το CO₂ διασπάται σε CO + O₂. Ισχύς < 200 Watts. Σύγχρονα Laser αυτής της κατηγορίας διεγείρονται με ραδιοκύματα και αποδεικνύονται φθηνά και αξιόπιστα.
- (iii) Έχουν κατασκευασθεί Laser CO₂ με σωλήνα διαμέτρου 1 mm, ώστε το ΗΜ κύμα να κινείται κατά μήκος του με πολύ μικρές απώλειες.

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 kWatts), ακόμη και με μεγάλες πιέσεις των αέριων στο εσωτερικό.

Η ακτινοβολία από το Laser CO₂ συνήθως είναι συνεχής.

Ενώ θεωρούμε ότι τα Laser είναι αποτέλεσμα τεχνολογίας, επιστήμονες ανακάλυψαν CO₂ Laser που υπάρχει στη φύση. Μπορεί να δημιουργηθεί αντιστροφή πληθυσμών κάτω από πολύ ειδικές συνθήκες, όπως στην καυτή 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 ΗΜΑ 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 (τη σημαντική) διαφορά ότι το αέριό του είναι δηλητηριώδες και επικίνδυνο, ενώ το CO₂ δεν έχει καμία τοξικότητα.

6.2.3.2 Laser N₂

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 Laser ακτινοβολία προκύπτει από μεταπηδήσεις μεταξύ ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης. Βραχείς παλμοί υψηλής τάσης (30-40 kV) 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 επαναδιασχίζει, δηλαδή οι καθρέφτες δεν είναι απαραίτητοι. Στην πράξη υπάρχει μόνο ο «πίσω» καθρέφτης με την 100% ανακλαστικότητα.

Το Laser N₂ εκπέμπει στην υπεριώδη περιοχή, είναι απλό και φθινό. Η ακτινοβολία του δίνει μερικά mJ ανά παλμό, με διάρκεια παλμού της τάξης των ns και πυκνότητα περίπου 1000 Hz.

Εφαρμογές του Laser N₂:

- (α) προσφορά ενέργειας για τη διέγερση Laser χρωστικής
- (β) φασματοσκοπία υπεριώδους
- (γ) αντοχή υλικών στη θερμότητα
- (δ) μέτρηση φθορισμού υλικών
- (ε) μέτρηση πολύ ταχέων διαδικασιών (φωτογράφιση με βραχείς παλμούς)

6.2.3.3 Laser (διεγερμένων) διμερών (excimer)

Υπάρχει μια οικογένεια Laser 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). Το μόριο αυτό υπάρχει μόνο σε διεγερμένη κατάσταση. Όταν αποδιεγερθεί, τα άτομα διαχωρίζονται. Η διεγερμένη κατάσταση διαρκεί περίπου 10 ns. Excimer είναι ο συνδυασμός των λέξεων excited και dimmer, δηλαδή ένα μόριο, δύο άτομα, κατάσταση διεγερμένη.

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, NF₃)
- λίγο αδρανές αέριο (αργό, κρυπτό ή ξένο)
- σχεδόν 90% νέον ή ήλιον

Η διέγερση γίνεται με σύντομους παλμούς ηλεκτρικής ισχύος ως μερικά MW/cm³.

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 100 W. Είναι σχετικά ακριβό.

Το excimer Laser έχει συμπυκνωμένη ενέργεια και χρησιμοποιείται ως κοπτικό εργαλείο για σχεδόν όλα τα υλικά.

Έχει επίσης εφαρμογή

- (α) στην φωτολιθογραφία (πολύ μεγάλη ακρίβεια)
- (β) στην κοπή βιολογικού ιστού (δεν επηρεάζονται γειτονικά κύτταρα)
- (γ) στην διορθωτική της όρασης (αλλαγή της καμπυλότητας του κερατοειδή)
- (δ) σημάδεμα οποιουδήποτε υλικού (πλαστικό, γυαλί, μέταλλο) (επειδή η ακτινοβολία του μικρού μήκους κύματος απορροφάται από την ύλη).

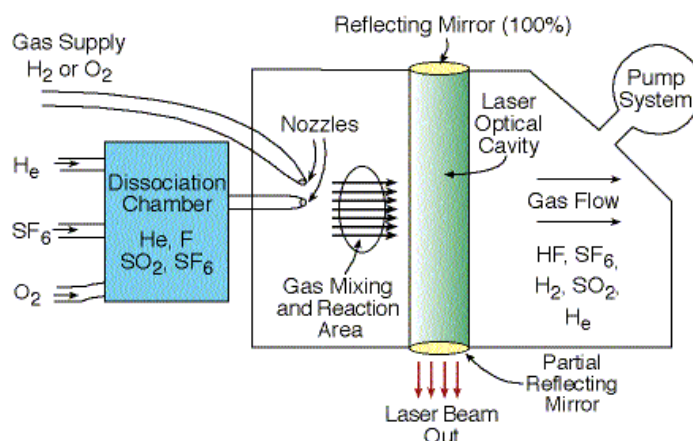
6.2.3.4 Χημικό Laser

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 (σχήμα 25). 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.



Σχήμα 25. Το χημικό Laser βασίζεται στην ταχεία εκτόνωση θερμού αερίου υπό πίεση, καθώς περνά σε σχεδόν κενό θάλαμο μέσω ειδικής βελόνας [8]

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 (SF_6) ή φθοριούχο άζωτο (NF_3) χρησιμεύουν ως πηγή φθορίου.

Στα χημικά Laser του εμπορίου προστίθεται οξυγόνο για να αντιδράσει με το θείο και να δώσουν μόρια 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.

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 8 kV και σε μερικά προηγείται έκθεση του αερίου σε ΗΜΑ 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).

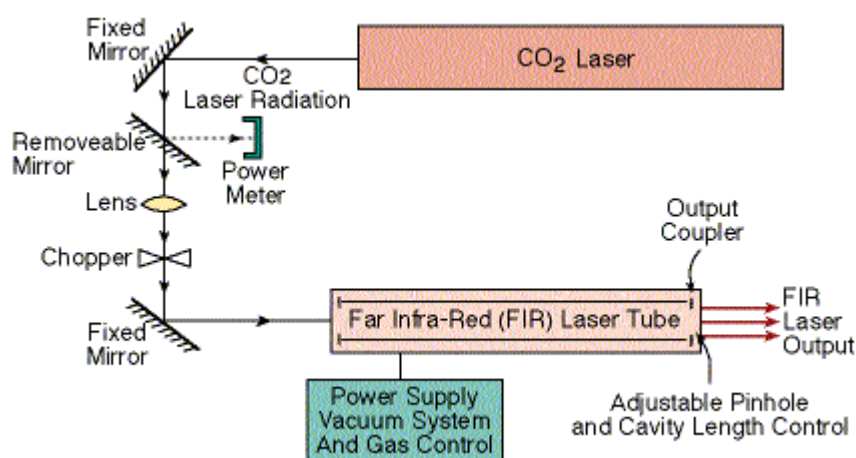
Ακόμη μικρότερου μήκους κύματος (~1 μm) είναι το Laser COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) (χημικό Laser ιωδίου οξυγόνου), που χρησιμοποιείται επίσης για στρατιωτικούς σκοπούς.

6.2.3.5 Laser μακρινού υπέρυθρου (FIR, Far Infra Red)

Είναι επίσης Laser αερίου και έχει μήκος κύματος μέχρι και 1000 μm (~1 mm). Οι μεταπηδήσεις συμβαίνουν μεταξύ των υπο-επιπέδων περιστροφής των μορίων του ενεργού υλικού, συνήθως του ίδιου επιπέδου ταλάντωσης-δόνησης. Το ενεργό υλικό είναι ένα απλό, οργανικό μόριο, όπως C_2H_4 , CF_4 , NH_3 , με πολύ λεπτά ενεργειακά επίπεδα. Η αντιστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται με Laser μικρότερου μήκους κύματος, όπως το CO_2 (σχήμα 26).

Στο εργαστήριο μπορούν να παραχθούν χιλιάδες γραμμές (συχνότητες) FIR και η εφαρμογή τους επικεντρώνεται στην φασματοσκοπία.

Επειδή το Laser που προσφέρει την ενέργεια δρα κατά μήκος του άξονα στο σωλήνα, το υλικό του καθρέφτη στο τέλος της διαδρομής πρέπει να είναι διαφανές π.χ. στο CO_2 και μη διαφανές στο Laser του ενεργού υλικού, το οποίο παγιδεύεται και ενισχύεται μετά από πολλές εσωτερικές διαδρομές.



Σχήμα 26. Laser FIR [8]

6.3 Laser στερεής κατάστασης

Τα άτομα στη στερεά κατάσταση βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους και αλληλοεπιδρούν. Γι' αυτό το εύρος των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των αερίων.

Ευρύ φάσμα απορρόφησης σημαίνει πως η προσφορά ενέργειας μπορεί να γίνει από πηγή φωτός και μάλιστα όχι απαραίτητα Laser.

Το ενεργό υλικό στο Laser στερεής κατάστασης είναι ένα συγκεκριμένο υλικό, όπου όμως έχει γίνει έγχυση άλλου υλικού με τη μορφή ιόντων. Τα ιόντα του υλικού πρόσμιξης αντικαθιστούν άτομα του υλικού βάσης και είναι αυτά που παρέχουν τα κατάλληλα ενεργειακά επίπεδα για τη μεταπήδηση Laser. Το υλικό βάσης επηρεάζει λίγο το μήκος κύματος της ΗΜΑ εκπομπής. Το ίδιο υλικό πρόσμιξης σε δύο διαφορετικά υλικά βάσης έχει ως αποτέλεσμα παρόμοια ΗΜΑ Laser. Το υλικό βάσης 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 ΗΜΑ 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.

6.3.1 Laser ρουβίνιου

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

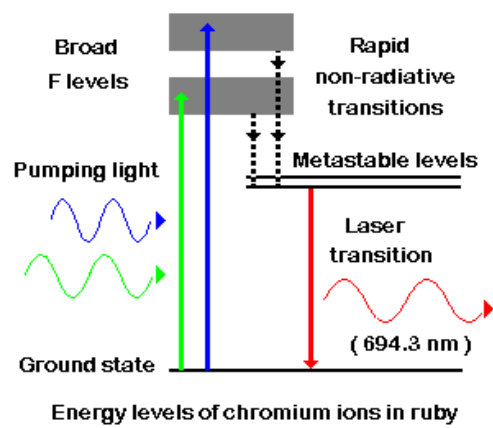
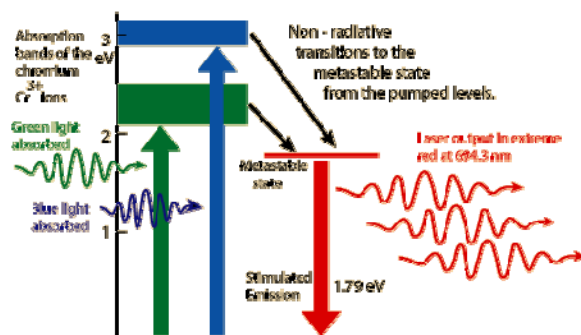
πολύτιμος λίθος. Καλείται και σάπφειρος (ζαφείρι). Το ρουβίνιο υφίσταται έγχυση ιόντων χρωμίου (Cr^{+3}) -ως πρόσμιξη- που αντικαθιστούν άτομα Al.

Μια λάμπα ξέnon προσφέρει ενέργεια στο ενεργό υλικό και τα ιόντα Cr απορροφούν μήκη κύματος της περιοχής 500-600 nm και μεταβαίνουν στο ενεργειακό επίπεδο E_3 , από το οποίο, αποδιεγειρόμενα «πέφτουν» στο μετασταθερό επίπεδο E_2 χωρίς εκπομπή ακτινοβολίας, αλλά με δονήσεις που μετατρέπονται σε θερμότητα (σχήμα 27). Ο χρόνος ημιζωής του E_2 είναι 5 ms.

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 εξαναγκάζονται από τους καθρέφτες και διασχίζουν το ενεργό υλικό μπρος-πίσω πολλές φορές, αυτοπολλαπλασιαζόμενα. 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 0,6-2,0 cm και μήκος από 7-20 cm.



Σχήμα 27. Laser ρουβινίου [5]

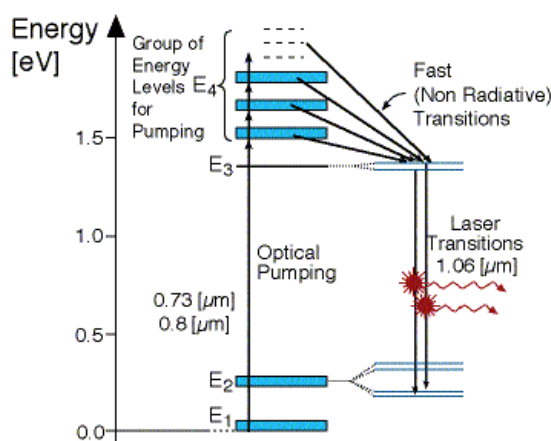
6.3.2 Laser νεοδυμίου

Τα ιόντα νεοδυμίου Nd^{+3} προστίθενται ως προσμίξεις και αντικαθιστούν άτομα τριών (βασικά) στερεών σωμάτων.

- ύαλος
- YAG (Yttrium Aluminum Garnet) κρύσταλλος
- YLF ($LiYF_4$) κρύσταλλος

(α) Ο ύαλος (γυαλί) προτιμάται όταν η εφαρμογή απαιτεί ισχυρούς και αραιούς παλμούς. Το ενεργό υλικό μπορεί να έχει μορφή δίσκου ή κυλίνδρου, διαμέτρου ακόμα και μισού μέτρου και μήκους αρκετών μέτρων, επειδή το γυαλί είναι ισότροπο υλικό και εύκολο στη διαμόρφωση του επιθυμητού σχήματος. Μειονέκτημα της υάλου είναι η μικρή της θερμο-αγωγιμότητα, δηλαδή είναι δύσκολη η απομάκρυνση των παραγόμενων ποσών θερμότητας.

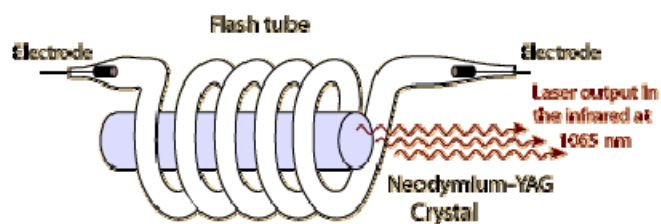
(β) Για συχνούς παλμούς προτιμάται ο κρύσταλλος YAG με μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα, αλλά οι διαστάσεις του είναι περιορισμένες (διάμετρος μέχρι 15 mm και μήκος μέχρι 30 cm) και η τιμή του υψηλή (σχήμα 28).



Σχήμα 29. Laser νεοδυμίου Nd^{+3} [8]

Τα Laser Nd εκπέμπουν στην εγγύς υπέρυθρη περιοχή και διεγείρονται με ΗΜΑ. Είναι Laser τεσσάρων ενεργειακών επιπέδων (σχήμα 29).

Το Laser KTP-532 (potassium titanyl phosphate) λειτουργεί διαβιβάζοντας μια δέσμη Laser Nd:YAG διαμέσου ενός κρυστάλλου KTP, καταλήγοντας σε εκπομπή στο μισό μήκος κύματος (532 nm), το οποίο βρίσκεται στο ορατό.



Σχήμα 28. Laser νεοδυμίου [5]

6.3.3 Laser Αλεξανδρίτη (Cr^{+3} : BeAl_2O_4)

Ο κρύσταλλος είναι BeAl_2O_4 και έχει προσμίξεις ιόντων Cr^{+3} . Η ενεργειακή του διάταξη μοιάζει με την αντίστοιχη του ρουβινίου. Μπορεί όμως να λειτουργήσει είτε ως Laser τριών επιπέδων στα 680 nm είτε ως Laser τεσσάρων επιπέδων στα 720-800 nm.

Με τις προσμίξεις του χρωμίου ο κρύσταλλος γίνεται ασύμμετρος και ουσιαστικά δημιουργείται πηγή ταλαντώσεων-δονήσεων με αποτέλεσμα το Laser Αλεξανδρίτη (όπως και του σαπφείρου-τιτανίου) να μπορεί να εκπέμψει πολλά συνεχόμενα μήκη κύματος. Με ειδικό φίλτρο (π.χ. ένα πρίσμα) στην έξοδο της οπτικής κοιλότητας, επιλέγεται κάθε φορά το ένα μήκος κύματος, το κατάλληλο για κάθε εφαρμογή.

6.3.4 Laser τιτανίου – σαπφείρου

Το υλικό βάσης είναι κρύσταλλος σάπφειρος (Al_2O_3) και οι προσμίξεις είναι ιόντα Ti^{+3} , που αντικαθιστούν άτομα Al.

Εκπέμπουν συνεχές ή παλμικό Laser στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου και συχνά οι χρήστες τα προτιμούν από τα Laser χρωστικών (dye Lasers), επειδή είναι πιο αξιόπιστα και εύκολα στους χειρισμούς. Με κατάλληλη ρύθμιση εκπέμπουν και στο ορατό. Η προσφορά ενέργειας γίνεται συνήθως με οπτική άντληση με άλλο Laser - όπως π.χ. Laser Ar^+ - και έχει πολύ καλή απόδοση.

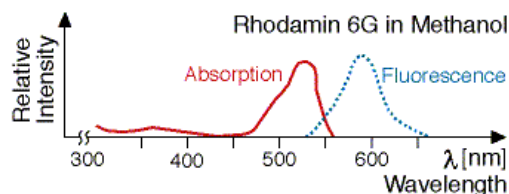
Τα χρησιμοποιούν σε ερευνητικά εργαστήρια και ειδικότερα στη φασματοσκοπία. Βοηθούν όμως και στη μέτρηση υδρατμών και αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα, όπως και στη μελέτη των επιπτώσεών τους.

Με προσεκτική ενίσχυση μπορούν να δώσουν παλμούς Laser ισχύος και μέχρι 10^{12} W και διάρκειας ως 10^{-15} sec, επαλαμβανόμενους με 10 Hz.

6.4 Laser υγρού (dye-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.

Μόρια χρωστικής (dye) συνήθως είναι οργανικά φθορίζοντα συμπλέγματα, που περιέχουν μεγάλο αριθμό κυκλικών δομών. Το ενεργό υλικό Laser χρωστικής είναι τέτοια μόρια χρωστικής διαλελυμένα συνήθως σε αλκοόλη (σχήμα 30). Από την αλληλεπίδραση των μορίων χρωστικής με το διαλύτη διευρύνεται η ζώνη των ενεργειακών επιπέδων ταλάντωσης-δόνησης και σχηματίζεται ευρεία ζώνη εκπεμπόμενων (αλλά και απορροφούμενων) συχνοτήτων.



Σχήμα 30. Φάσμα απορρόφησης και εκπομπής ροδαμίνης σε μεθανόλη

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 ΗΜΑ 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 (σχήμα 30).

Είναι εφικτή σημαντική ισχύς της ΗΜΑ Laser 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.

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 της παραγόμενης 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 κωνιορτοποίηση λίθων στους νεφρούς με κρουστικά κύματα που δημιουργούν οι βραχείς παλμοί του Laser.

7. Εφαρμογές του Laser στην Ιατρική

Τα Laser είναι εργαλείο χειρουργικής επέμβασης και θεραπείας. Το φως του Laser μπορεί να οδηγηθεί στο σώμα, στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό, συνήθως με τη βοήθεια διάταξης ενδοσκοπίου. Το φως Laser μπορεί να εστιαστεί και να αποκτήσει πολύ μικρή διατομή στην επιφάνεια που ενδιαφέρει, ώστε να κάψει και να απομακρύνει τον ιστό-στόχο, αφήνοντας σημάδι - ουλή χωρίς αιμορραγία.

Οι εφαρμογές στην Ιατρική μπορούν να ομαδοποιηθούν:

- ανάλογα με το όργανο-ιστό προς θεραπεία:
 - Οφθαλμολογία
 - Γενική χειρουργική
 - Οδοντιατρική
 - Δερματολογία
 - Αγγεία / Καρδιά
 - ΩΡΛ

- Γαστρεντερολογία
- Πλαστική χειρουργική
- Γυναικολογία
- Ουρολογία
- Ογκολογία
- Ορθοπαιδική
- Νευροχειρουργική
- Κτηνιατρική
- ανάλογα με το είδος του Laser:
 - CO₂
 - YAG
 - Argon
- ανάλογα με το είδος της θεραπείας:
 - 7.1 Τα Laser στην Ιατρική Χειρουργική
 - 7.2 Τα Laser στην διαγνωστική και θεραπευτική Ιατρική. Συνδυασμός με φάρμακα
 - 7.3 Ειδικές εφαρμογές των Laser: μαλακά (soft) Lasers

Για την εφαρμογή των Laser σε οποιοδήποτε τομέα της Ιατρικής πρέπει να είναι εκ των προτέρων γνωστός και σαφής ο τρόπος αλληλεπίδρασης HMA και βιολογικού ιστού (Πίνακας 2).

Η αλληλεπίδραση της HMA Laser με το βιολογικό ιστό εξαρτάται από:

- το μήκος κύματος του Laser (δηλαδή την ενέργεια κάθε φωτονίου)
- την ένταση της HMA (και ειδικότερα: Watt*time/διατομή δέσμης)
- το σχήμα της ακτινοβολήσης (συνεχής ή με παλμούς)

Από γενικότερη άποψη όταν η ακτίνα Laser (όπως και οποιαδήποτε HMA) προσπίπτει σε υλικό μπορεί να συμβεί:

- ανάκλαση (γωνία ανάκλασης ίση με τη γωνία πρόσπτωσης)
- διάχυση-σκέδαση (ανάκλαση προς όλες τις κατευθύνσεις)
- διάβαση (η HMA διασχίζει το υλικό)
- απορρόφηση (μέρος ή όλη η ενέργεια της HMA μεταπηδά στο υλικό)

Θερμικό αποτέλεσμα ή χημική αντίδραση έχουμε μόνο στην τελευταία περίπτωση.

Μια απλουστευμένη παράθεση:

- Η ενέργεια απλού χημικού δεσμού μεταξύ δύο ατόμων άνθρακα είναι περίπου $6 \cdot 10^{-19}$ J
- Η ενέργεια ενός μέσου φωτονίου ακτίνων X είναι περίπου $1 \cdot 10^{-14}$ J (10000 φορές μεγαλύτερη). Μπορεί να διασπάσει το χημικό δεσμό.
- Η ενέργεια ενός μέσου φωτονίου μικροκυμάτων είναι περίπου $2 \cdot 10^{-22}$ J (1000 φορές μικρότερη). Δεν μπορεί να διασπάσει το χημικό δεσμό.
- Η ενέργεια ενός μέσου ορατού φωτονίου είναι περίπου $4 \cdot 10^{-19}$ J (λίγο μικρότερη). Συνήθως δεν αρκεί για διάσπαση χημικών δεσμών.

Τα μικροκύματα μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στο βιολογικό ιστό μόνο μέσω αύξησης της θερμοκρασίας, ενώ οι ακτίνες X και οι υπεριώδεις ακτίνες έχουν αρκετή ενέργεια και διασπούν χημικούς δεσμούς.

Οι περισσότερες «χημικές ζημιές» επιδιορθώνονται σχετικά γρήγορα από επανορθωτικούς μηχανισμούς «αυτοπροστασίας» του ανθρώπινου οργανισμού, αλλά χημικές ζημιές στο μόριο του DNA (που «κουβαλά» τη γενετική πληροφορία του σώματός μας) μπορούν να οδηγήσουν σε καρκίνο.

Το ορατό και το υπέρυθρο φως συνήθως προκαλούν μόνο θερμικές αλλαγές στον οργανισμό μας. Εκτός από ειδικές περιπτώσεις.

Γενικότερα: Για Laser ισχύος μέχρι μερικά Watts, η αλληλεπίδραση είναι τριών βασικών ειδών:

- στην περιοχή απόμακρων UV τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τις πρωτεΐνες RNA και DNA και συνήθως θανατώνουν τα κύτταρα
- στην περιοχή εγγύς UV και ορατού μικρού μήκους κύματος γίνονται φωτοχημικές αντιδράσεις (όπως η φωτοσύνθεση), κυρίως με Laser excimer
- στην περιοχή ορατού μεγάλου μήκους κύματος και εγγύς υπέρυθρες έχουμε θερμικές επιδράσεις με απορρόφηση της H₂O, ήτοι:
 - μέχρι 60°C: αύξηση της θερμοκρασίας του ιστού, πιθανή συνένωση αγγείων
 - 60 – 65°C: συσσωμάτωση κυττάρων, δημιουργία θρόμβων
 - 65 – 90°C: αλλοίωση των πρωτεϊνών

- 90 – 100°C: ελαχιστοποίηση των υγρών (στέγνωμα)
- 100 + °C: εξάτμιση και απανθράκωση

Ειδικότερα, θερμικές επιδράσεις προκαλούνται από Laser συνεχούς ακτινοβολίας όπως τα CO₂, YAG και αργού. Η ενέργειά τους απορροφάται από το βιολογικό ιστό και αυξάνεται η θερμοκρασία τοπικά.

Τα μόρια στους ιστούς του σώματος, εκτός από χημική δομή (πόσα άτομα οξυγόνου, υδρογόνου, άνθρακα ή ποιό το είδος του δεσμού) έχουν και διάταξη στο χώρο, από την οποία εξαρτάται η λειτουργία τους. Ειδικότερα, τα μόρια των πρωτεϊνών (βρίσκονται στους μυς, στους συνδετικούς ιστούς, στα αγγεία) (όπως η μυοσφαιρίνη που μεταφέρει το απαραίτητο οξυγόνο στους μυς) αποτελούνται από αλυσίδα αμινοξέων και είναι «χτισμένες» σε καθορισμένη μορφή στο χώρο.

Σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 50°C, η τρισδιάστατη μορφή της μυοσφαιρίνης αρχίζει να χαλάει και το μόριο μπλέκεται. Μπορεί να παραμένει η ίδια χημική δομή, όμως ούτε η μυοσφαιρίνη ούτε η αιμοσφαιρίνη μπορούν να μεταφέρουν οξυγόνο στους μυς ή το αίμα αντίστοιχα.

Θερμική επίδραση HMA Laser πολύ μεγάλης πυκνότητας ισχύος ώστε να σημειωθούν θερμοκρασίες στους ιστούς μεγαλύτερες των 100 °C, προκαλεί το βρασμό του ύδατος και μετατροπή του σε ατμό.

Το Laser αυτής της περίπτωσης δρα είτε ως νυστέρι είτε ως εργαλείο αφαίρεσης - απόξεσης πολύ λεπτού στρώματος ιστού. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις η αιμορραγία είναι μηδαμινή επειδή όσον αφορά αιμοφόρα αγγεία, το «ψήσιμο» με το Laser τα «σφραγίζει», μειώνοντας άμεσα και δραστικά την αιμορραγία (αιμοστατικό φαινόμενο) και συντομεύοντας σημαντικά τη διάρκεια της επέμβασης.

Το κολλαγόνο επίσης σκληραίνει με την άνοδο της θερμοκρασίας, που σημαίνει πως ... μπορούμε να μασήσουμε το μαγειρεμένο κρέας! Το Laser ουσιαστικά «ψήνει» τον ιστό-στόχο που χάνει την μηχανική του ακεραιότητα και καθίσταται εύκολη η απομάκρυνση των μορφωμάτων που πρέπει να αφαιρεθούν.

Όταν όμως στο βιολογικό υλικό προσπέσει Laser με μορφή σύντομων και ισχυρών παλμών, η θερμική ενέργεια εναποτίθεται σε μικρή περιοχή για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η πολύ γρήγορη εξάτμιση σε πολύ περιορισμένο χώρο είναι ουσιαστικά μία έκρηξη που δημιουργεί κρουστικό κύμα και «ταράζει» τους γύρω ιστούς. Η δράση αυτού του Laser είναι

μηχανικής φύσεως, όπως και στη λιθοτριψία λίθων της χοληδόχου κύστης και της ουροφόρου οδού. Εκμετάλλευση αυτού του φαινομένου γίνεται στη διαδικασία διάλυσης οπισθίας κύστης για τη θεραπεία δευτερογενούς καταρράκτη του οφθαλμού.

Ισχυρή δέσμη υπεριώδους Laser μπορεί να διασπάσει επιλεκτικά χημικούς δεσμούς σε βιολογικό ιστό, χωρίς αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας.

Εκμετάλλευση χημικών διεργασιών έχουμε στη φωτοδυναμική θεραπεία και στις εφαρμογές του Laser excimer όπως στον ανασχηματισμό του κερατοειδή χιτώνα του οφθαλμού.

Σε οποιοδήποτε υλικό, τα άτομα (οι δομικοί λίθοι γενικότερα) βρίσκονται σε σταθερή, τυχαία κίνηση, ταλαντούμενα γύρω από μια θέση ισορροπίας. Η θερμοκρασία του υλικού χαρακτηρίζει τη μέση ενέργεια αυτής της ταλάντωσης.

Η ενέργεια που προσφέρει στο υλικό προσπίπτον φως, συνήθως μετατρέπεται σε κινητική, αυξάνοντας το πλάτος ταλάντωσης των ατόμων και επομένως αυξάνοντας τη θερμοκρασία του υλικού.

Το προσπίπτον φως μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον ιστό, αν προέρχεται από πηγή αρκετής ισχύος, δηλαδή αν προσφερθεί στον ιστό μεγάλο ποσό ενέργειας σε μικρό χρόνο. Επειδή δε, κάθε φωτόνιο «κουβαλά» συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, η βλάβη του ιστού θα εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και τον αριθμό των φωτονίων που θα δεχθεί.

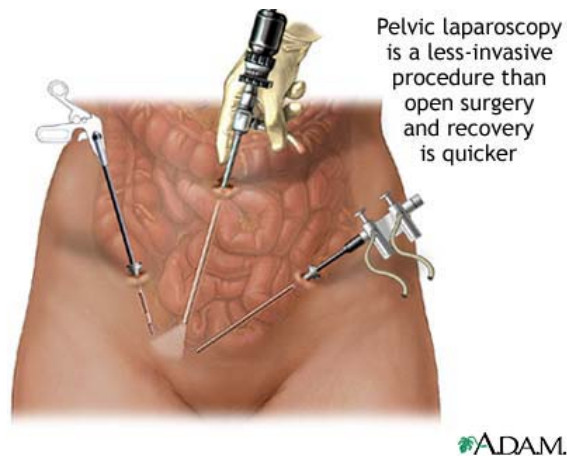
Εστιασμένο φως Laser καίει εύκολα τον ιστό-στόχο, πολύ περισσότερο μάλιστα, εφόσον το φως Laser είναι ήδη συγκεντρωμένο σε παράλληλη δέσμη πολύ μικρής διατομής.

Πίνακας 2. Μερικά είδη ιατρικών LASER και τα χαρακτηριστικά τους (CW = συνεχούς εκπομπής)

LASER	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (nm)	ΙΣΧΥΣ (Watt)	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Excimer	190-350 (υπεριώδεις)	<1-20	Οφθαλμολογική χειρουργική (PRK και LASIK)
Dye	400-800	<1-5	Αφαίρεση κηλίδων και χρωστικών
Αργού (CW)	514 (πράσινο) και 488 (μπλε-πράσινο)	<1 και 20	Εγχείρηση γλαυκώματος
Ατμών χαλκού	578 (κίτρινο) και 511 (πράσινο)	≤1	Οφθαλμολογική χειρουργική
Ατμών χρυσού	630 (κόκκινο)	≤1	Φωτοδυναμική θεραπεία, οφθαλμολογική χειρουργική
Ηλίου-Νέου (CW)	632,8 (κόκκινο)	<1-25 milliwatts	Οφθαλμολογική χειρουργική
Κρυπτού (CW)	676,4 (κόκκινο)	≤5	Οφθαλμολογική χειρουργική
Ρουβιδίου (παλμικό)	694 (κόκκινο)		Αφαίρεση τατουάζ
Δίοδου ή ημιαγωγού	750-1550 (κόκκινο και κοντά στο υπέρυθρο)	≤10	Φωτοπηξία στη γενική χειρουργική, αποτρίχωση
Erbium:YAG (παλμικό)	1540 (υπέρυθρο)		Αποτρίχωση, αναδόμηση δέρματος
Nd:YAG	1064 (υπέρυθρο) με διπλασιασμό συχνότητας: 532 (πράσινο)/355 (υπεριώδεις)	<1 και >100	Γενική χειρουργική, οφθαλμολογική χειρουργική, λιθοτριψία
Holmium:YAG (παλμικό)	2140 (υπέρυθρο)	≤60	Γενική χειρουργική
Διοξειδίου του άνθρακα (CW ή παλμικό)	10600 (υπέρυθρο)	<100	Γενική χειρουργική, αναδόμηση δέρματος

Τα Laser ορατού διεισδύουν σε βάθος περίπου 1 mm στους ιστούς. Το Laser Nd:YAG –υπέρυθρου- φτάνει σε βάθος 4 mm (απορροφάται ελάχιστα από το νερό). Το βάθος διείσδυσης του Laser CO₂ -επίσης υπέρυθρου- είναι μόνο 30 μm (απορροφάται πολύ από το νερό), κάτι που το καθιστά εξαιρετικό διατμητικό εργαλείο.

7.1 Τα Laser στην Ιατρική Χειρουργική



Σχήμα 31. Λαπαροσκοπική επέμβαση [12]

- Τα πλεονεκτήματα της χρήσης Laser στη χειρουργική είναι αρκετά:
- το «πεδίο δράσης» διατηρείται σχετικά στεγνό επειδή η ενέργεια του Laser αμέσως μετά το κόψιμο ενός μικρού αγγείου, σφραγίζει (σαν οξυγονοκόλληση) τις δύο ανοιχτές διατομές και περιορίζει την διαρροή του αίματος
 - ο μετεγχειρητικός πόνος είναι πολύ λιγότερος, επειδή «σφραγίζονται» και τα άκρα των νεύρων
 - αποφεύγεται η σχολαστική αποστείρωση, επειδή δεν απαιτείται χρήση και επαφή μηχανικών εργαλείων
 - καθαρό οπτικό πεδίο, επειδή δεν παρεμβαίνουν-παρεμβάλλονται μηχανικά μέρη
 - επιλέγοντας το μήκος κύματος μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή αντίδραση και μόνον αυτή
 - είναι δυνατή η εκτέλεση μικροχειρουργικής με τη βοήθεια μικροσκοπίου και μάλιστα με τη δέσμη Laser να περνά μέσα από το ίδιο μικροσκόπιο
 - είναι δυνατή η εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων μέσα στο σώμα χωρίς την τυπική διάνοιξη, με απλή διεύθυνση οπτικού αγωγού (οπτικές ίνες) που μεταφέρει την ΗΜΑ Laser στον εσωτερικό στόχο (σχήμα 31)
 - το Laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως νυστέρι μεγάλης ακρίβειας
 - το Laser εργαλείο μπορεί να συνδεθεί και να καθοδηγείται μέσω υπολογιστή και για επεμβάσεις σε πολύ περιορισμένο χώρο

Σε οποιαδήποτε χειρουργική διαδικασία κατά την οποία απαιτείται αφαίρεση ιστού ή δημιουργία τομής μπορεί να χρησιμοποιηθεί Laser.

Σε επεμβάσεις με αναμενόμενη αιμορραγία, κατάλληλο εργαλείο είναι το Nd-YAG Laser. Η συνεχής ακτινοβολία του εισέρχεται βαθιά στους ιστούς, απελευθερώνει μεγάλο ποσό θερμότητας και δημιουργούνται θρόμβοι ακόμα και σε εκτεταμένη περιοχή στόχο.

Η HMA του Nd-YAG συνήθως μεταδίδεται μέσω οπτικών ινών και έτσι μπορεί να οδηγηθεί με ακρίβεια. Ο οπτικός αγωγός εισέρχεται από το στόμα ή από μικρές τομές στο δέρμα. Ο οπτικός αγωγός μαζί με το σύστημα για την πλοήγησή του καλείται ενδοσκόπιο. Οι οπτικές ίνες είναι από χαλαζία. Στην έξοδο του οπτικού αγωγού τοποθετείται συχνά κομμάτι από σάπφειρο κατασκευασμένο σε διάφορα σχήματα για τη λεγόμενη «χειρουργική επαφής»:

- σε σχήμα δρέπανου διευκολύνει το κόψιμο που άμεσα ακολουθείται από δημιουργία θρόμβων
- σε σχήμα στρογγυλοποιημένο ή επίπεδης επιφάνειας βοηθά την ομοιογενή κατανομή της ακτινοβολίας σε μεγάλη έκταση

Η θερμοκρασία του σάπφειρου μπορεί να ανέβει σε πολύ υψηλές τιμές.

Το CO₂ Laser χρησιμοποιείται γενικότερα ως νυστέρι.

Η υπέρυθρη HMA του CO₂ Laser απορροφάται σε μεγάλο βαθμό από το νερό. Ο βιολογικός ιστός αποτελείται κατά 75-90% από νερό. Επομένως η ενέργεια της δέσμης Laser του CO₂ απορροφάται σε πολύ λεπτό στρώμα ιστού.

Αν και ο χρόνος ακτινοβολήσης είναι μικρός, μόνον ιστός πάχους 0.1-0.2 mm θα επηρεαστεί από την πρόσπτωση της δέσμης.

Εστιασμένη δέσμη Laser CO₂ χρησιμοποιείται για τομές και οι γειτονικοί ιστοί επηρεάζονται ελάχιστα.

Μη εστιασμένη δέσμη χρησιμοποιείται για εξάτμιση επιφανειών. Μόνο εφόσον αφαιρεθεί η πρώτη λεπτή επιφάνεια, το Laser CO₂ μπορεί να προσεγγίσει και να δράσει στην επόμενη.

Μειονέκτημα του Laser CO₂ είναι ότι δεν έχει βρεθεί υλικό για οπτικές ίνες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν τη δέσμη του βαθύτερα στους ιστούς.

Όταν πρέπει να δημιουργηθεί «καθαρή τομή», χρησιμοποιείται το Laser excimer.

Ειδική περίπτωση ελαφράς χειρουργικής επέμβασης είναι και η θεραπεία του ροχαλητού με Laser.

7.1.1 Τα Laser στην Οδοντιατρική

Οι εφαρμογές του Laser στην οδοντιατρική χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

7.1.1.1 Εφαρμογές σε μαλακούς ιστούς

Είναι παρόμοιες με της απλής χειρουργικής και χρησιμοποιούνται αρκετά χρόνια. Οι ασθενείς μετά από επέμβαση στα ούλα νοιώθουν λιγότερο πόνο, παρουσιάζουν περιορισμένη αιμορραγία και δεν χρειάζονται ράματα.

Ο Οδοντίατρος χρησιμοποιεί Laser CO₂, Nd: YAG, holmium: YAG, Ar⁺.

7.1.1.2 Εφαρμογές σε σκληρούς ιστούς όπως τα δόντια

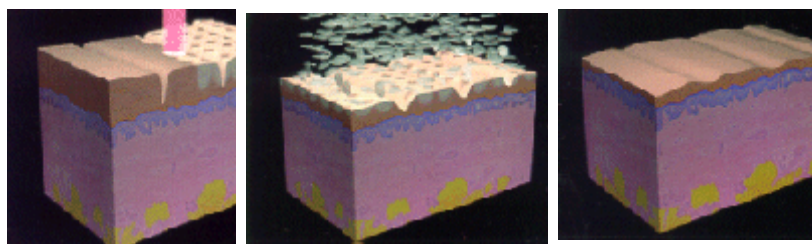
Είναι σχετικά καινούργιες. Το Μάιο 1997, ο αρμόδιος φορέας στην Αμερική επέτρεψε τη χρήση Laser Er-YAG για θεραπεία δοντιών σε ανθρώπους. Συγκρινόμενο με το συμβατικό τροχό, το Laser δρα χωρίς θόρυβο, χωρίς πίεση και χωρίς την ενοχλητική δόνηση για την αφαίρεση π.χ. της τερηδόνας και επιπλέον, χωρίς τη χορήγηση αναισθητικού.

Το φως Laser μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για λεύκανση, αφαίρεση οδοντικής πλάκας, ή/και ανασχηματισμό δοντιών.

Χρησιμοποιούνται Laser CO₂, Nd: YAG.

Ο φωτεινός καταλύτης για τη στερέωση του σφραγίσματος, τείνει και αυτός να αντικατασταθεί με φως Laser, αφήνοντας περιθώριο και για βελτίωση των βιο-υλικών και των «μηχανικών» τους ιδιοτήτων.

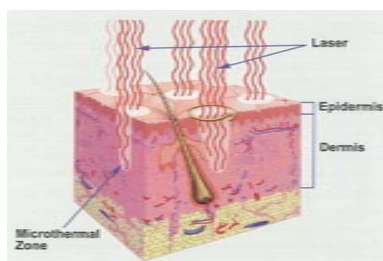
7.1.2 Τα Laser στη Δερματολογία



Η ΕΝΕΡΓΕΙΑ
ΤΟΥ CO₂ LASER
ΕΠΙΔΡΑ ΣΤΟ
ΔΕΡΜΑ ΜΕ
ΓΡΗΓΟΡΕΣ
ΑΛΛΑ ΙΣΧΥΡΕΣ
ΡΙΠΕΣ

ΤΟ LASER ΕΞΑΤΜΙΖΕΙ
ΤΟ ΠΑΛΑΙΟ ΔΕΡΜΑ

ΟΙ ΠΑΛΙΕΣ ΡΥΤΙΔΕΣ
ΑΜΒΛΥΝΟΝΤΑΙ ΚΑΙ
ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΤΑΙ
ΣΥΣΦΙΞΗ ΤΟΥ
ΚΟΛΛΑΓΟΝΟΥ



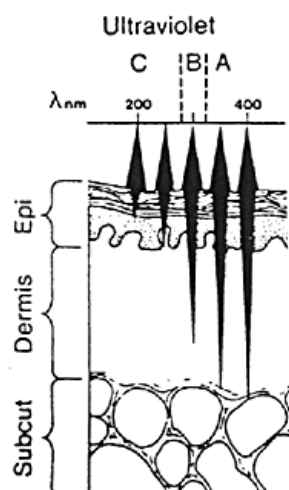
Σχήμα 32. Αλληλεπίδραση Laser - δέρματος

From: Kaufmann, et. al.: Dermatologische Operationen, Seite 54-55

Τα Laser είναι ικανά να αφαιρούν σχεδόν κάθε ανεπιθύμητο σημάδι-ατέλεια του δέρματος και συχνά είναι το μοναδικό όπλο για επεμβάσεις αισθητικής. Μειώνουν λεπτές ρυτίδες, εγκαύματα ήλιου, παλιές ουλές (σχήμα 32).

Οι περισσότερες επεμβάσεις με Laser γίνονται με τοπική μόνο αναισθησία.

Μεταξύ των άλλων αφαιρούνται σχεδόν πλήρως σχέδια τατουάζ, των οποίων κάθε χρώμα «αντιμετωπίζεται» με διαφορετικό μήκος κύματος. Με Laser επίσης ακτινοβολούνται καλοήθη και κακοήθη μορφώματα, σε μια ή συνήθως σε περισσότερες συνεδρίες (σχήμα 33).



Σχήμα 33. Η υπεριώδης ακτινοβολία στο δέρμα

Η αιμορραγία είναι ελάχιστη ως καθόλου και δεν απομένουν ουλές.

Χρησιμοποιείται το Laser αργού για αφαίρεση χρωματωμένης περιοχής δέρματος ή ειδικότερα ιστού με μελαγχρωμία. Εισχωρεί στο δέρμα σε βάθος μέχρι 2 mm.

Το Laser χρωστικών χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου απαιτείται λεπτομερής ρύθμιση του μήκους κύματος (tunability) για επιλεκτική απορρόφηση.

Το Laser CO₂ επίσης χρησιμοποιείται στη δερματολογία.

Συχνά, ο ακριβής χρόνος έκθεσης και η ένταση της δέσμης Laser για κάθε ειδική περίπτωση επέμβασης, καθορίζεται από υπολογιστή, αυξάνοντας το επίπεδο ασφάλειας και ακρίβειας της μεθόδου.

Πολλά είδη επέμβασης με Laser είναι ιδιαίτερα προσφιλή για την απόδοσή τους, γεγονός που οδηγεί στη συνεχή βελτίωση του εξοπλισμού, στην τεχνολογική εξέλιξη, στην αύξηση της ποικιλίας των συσκευών, ώστε να γίνονται ειδικά για κάθε διαφορετική περίπτωση.

7.1.3 Τα Laser στην Οφθαλμολογία

Το 1946 ο οφθαλμίατρος Gerd Meyer-Schwickerather ανακοίνωσε την πρώτη επέμβαση κατά της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδή αξιοποιώντας το φως του ήλιου ως πηγή φωτός-ενέργειας. Το 1956 εξέλιξε τη χειρουργική συσκευή του χρησιμοποιώντας ισχυρή λυχνία αέριου ξένου.

Σήμερα η σταθεροποίηση της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδή είναι μια από τις τυπικές εφαρμογές του Laser στην οφθαλμολογία.

Θα μπορούσε κάποιος να αναρωτηθεί γιατί το ακριβό Laser αντικατέστησε τις απλούστερες και φθηνότερες διατάξεις με συμβατικό φως. Η απάντηση βρίσκεται στο γεγονός ότι η ακτινοβολία Laser έχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Η θεραπεία της αποκόλλησης του αμφιβληστροειδή έγκειται σε «οξυγονοκόλληση» της περιμέτρου της βάσης της αποκολλημένης περιοχής με «κηλίδες εγκαύματος» που προκαλεί ο χειρουργός με ακτινοβολία. Η αποκολλημένη επιφάνεια δεν επανέρχεται, αλλά παύει να επεκτείνεται. Αν η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας είναι σχετικά μικρή, για κάθε έγκαυμα απαιτείται περισσότερο χρόνος και η παραγόμενη θερμότητα προλαβαίνει να διαχυθεί στις γύρω περιοχές, προκαλώντας βλάβες σε γειτονικούς ιστούς και πόνο στον ασθενή.

Οι περισσότερες επεμβάσεις με Laser στον οφθαλμό διεκπεραιώνονται γρήγορα σε εξωτερικά ιατρεία με χορήγηση απλού ηρεμιστικού.

Ο οφθαλμός ήταν το πρώτο όργανο που μελετήθηκε πειραματικά με Laser επειδή είναι διαφανής στην ΗΜΑ (ορατού) και επιπλέον ο φακός του οφθαλμού βοηθά στην εστίαση της εισερχόμενης δέσμης πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα (σχήμα 34).

Η σύσταση του αμφιβληστροειδή και του υπόλοιπου οφθαλμού είναι τέτοια, ώστε το ορατό φως να φτάνει σε μεγάλο ποσοστό σε αυτόν τον χιτώνα και να απορροφάται από αυτόν. Ορατό φως Laser που προσπίπτει στον οφθαλμό, μπορεί να έχει μικρή πυκνότητα ισχύος, η οποία θα ενισχυθεί με την εστίαση στον κερατοειδή και το φακό του οφθαλμού και θα αποκτήσει τη μέγιστη τιμή ακριβώς πάνω στον αμφιβληστροειδή.

Στο γλαύκωμα (αυξημένη ενδοφθάλμια πίεση εξαιτίας «παγιδευμένου» υδατώδους σώματος) προκαλείται επικίνδυνη πίεση στο οπτικό νεύρο και θεραπεύεται με τη βοήθεια πράσινου Laser Ar, με το οποίο διανοίγονται οπές για τη διαφυγή της περίσσειας του υγρού.

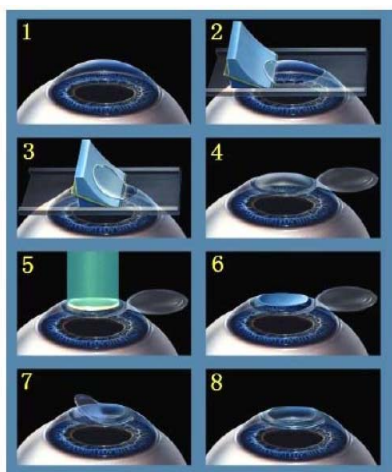
Στην διαβητική αμφιβληστροειδοπάθεια που οδηγεί σε τύφλωση, η επέμβαση με πράσινο Laser Ar καταστρέφει την επικίνδυνη πληθώρα αιμοφόρων αγγείων που δημιουργεί ο οργανισμός ως αντίδραση σε προβλήματα του κυκλοφορικού και που όμως παρουσιάζουν διαρροή-αιμορραγία.

Η αντιμετώπιση του καταρράκτη (θόλωση του φακού του οφθαλμού) γίνεται με τη βοήθεια υπερήχων που θρυμματίζουν το φακό. Τα τρίμματα αφαιρούνται με ειδικό απορροφητικό αγωγό. Στη θέση του φυσικού οφθαλμού τοποθετείται πλαστικός για να αποκαταστήσει την καθαρή όραση (δεύτερη εστίαση, βοηθητική της πρώτης που επιτελείται στον κερατοειδή).

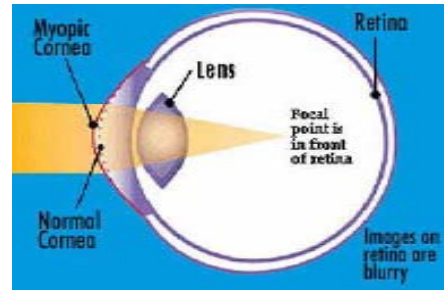
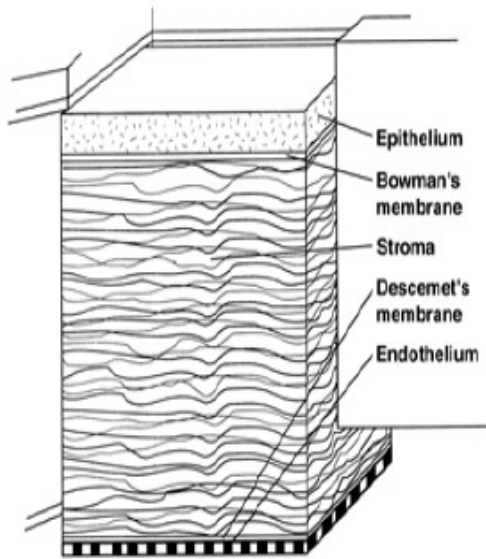
Όμως στο 25% περίπου των περιπτώσεων, μετά από παρέλευση μηνός «γεννιούνται» θολές περιοχές γύρω από τον πλαστικό φακό, παρεμποδίζοντας την όραση. Ο χειρουργός οφθαλμίατρος χρησιμοποιεί ειδικό Laser με το οποίο εξατμίζει τα ενοχλητικά μικρομορφώματα, τα υπολείμματα των οποίων απορροφούνται στους γύρω ιστούς χωρίς να δημιουργήσουν άλλα προβλήματα.

Το υπεριώδες φως από excimer Laser χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της εστίασης του οφθαλμού. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του έργου στον οφθαλμό το διεκπεραιώνει ο κερατοειδής χιτώνας. Εξαιτίας της διαφοράς του δείκτη διάθλασης του αέρα (από όπου προέρχεται η HMA) με τον αντίστοιχο του κερατοειδή χιτώνα, οι φωτεινές ακτίνες διαθλώνται εισερχόμενες στον οφθαλμό. Ο κερατοειδής πρέπει να έχει σωστή καμπυλότητα ώστε παράλληλη προσπίπτουσα δέσμη να εστιαστεί στον αμφιβληστροειδή χιτώνα στο πίσω μέρος του οφθαλμού (μικρή διόρθωση της πορείας επιτελείται από το φακό του οφθαλμού). Αν ο κερατοειδής δεν έχει την κατάλληλη καμπυλότητα η όραση είναι θολή (σχήμα 35).

Οι πρώτες διορθώσεις της οξύτητας της όρασης γίνονταν με μικρές τομές στον κερατοειδή (ακτινική κερατοειδοεκτομή). Το υπεριώδες φως της συσκευής επέμβασης απορροφάται εξ ολοκλήρου και δεν εισέρχεται στον οφθαλμό. Λειτουργεί ως ειδικό νυστέρι με κόψη από διαμάντι. Προηγείται τοπική αναισθησία



Σχήμα 36. Κερατομίλευση με Laser [13]



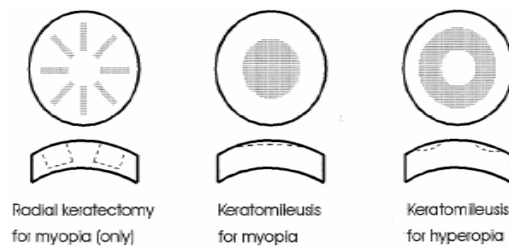
Σχήμα 35. Στον μυωπικό οφθαλμό η εστίαση γίνεται πριν από τον αμφιβληστροειδή. Διόρθωση της εστίασης επιτυγχάνεται με μεταβολή της καμπυλότητας του κερατοειδή [13]

Σχήμα 37. Δομή του κερατοειδή [13]

Δεύτερη μέθοδος, πάλι με φως από Laser excimer και τη βοήθεια υπολογισμών με συνδεδεμένο υπολογιστή, είναι η αφαίρεση λεπτότατου στρώματος του κερατοειδή, με τη μέθοδο που καλείται φωτο-διαθλαστική κερατοειδεκτομή, προκαλώντας αλλαγή της καμπυλότητας, όση ακριβώς απαιτείται κατά περίπτωση. Ο ασθενής παύει πλέον να χρειάζεται διορθωτικούς φακούς.

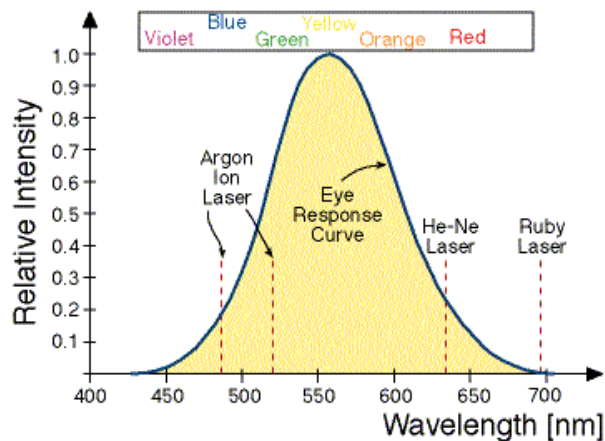
Τρίτη, νεότερη μέθοδος, είναι η κερατομίλευση, κατά την οποία ειδικό μαχαίρι (ο μικροκερατόμος) αφαιρεί κατά το ήμισυ (σαν πόρτα) το πρώτο λεπτό στρώμα του κερατοειδή. Ακολουθώς το excimer Laser σμιλεύει την κορυφή του κερατοειδή ώστε να μειωθεί η καμπυλότητά του όσο απαιτείται. Η «πόρτα» κλείνει και η επούλωση κρατά λίγες μέρες (σχήματα 36 και 37).

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι είναι όλες για την «επιδιόρθωση» μυωπίας, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη του φυσιολογικού καμπυλότητα του κερατοειδή. Επιδιόρθωση υπερμετροπίας (κερατοειδής με μικρότερη του φυσιολογικού καμπυλότητα) με Laser γίνεται με ανάλογο τρόπο (σχήμα 38).



Σχήμα 38. Επιδιορθώσεις του κερατοειδή [13]

Η επιδιόρθωση της μυωπίας με Laser δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ σε αρκετούς ασθενείς, μετά την επέμβαση, κρίνονται απαραίτητοι διορθωτικοί φακοί.



Σχήμα 34. Η ευαισθησία του οφθαλμού σε συνάρτηση με το λ της ΗΜΑ [8]

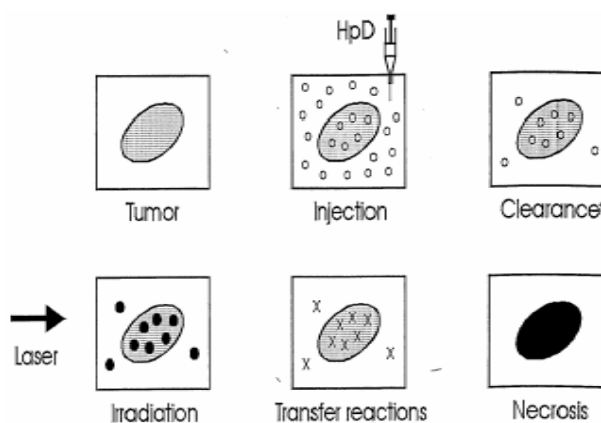
7.2 Τα Laser στη διαγνωστική και θεραπευτική Ιατρική. Συνδυασμός με φάρμακα

- Στη θεραπεία του καρκίνου βοηθούν τρεις διαφορετικές μέθοδοι:
- (α) χειρουργική αφαίρεση μέρους ή όλου του προσβεβλημένου οργάνου
 - (β) ακτινοβολήση με ιοντίζουσες ακτινοβολίες
 - (γ) ειδικές μέθοδοι τοπικής αύξησης της θερμοκρασίας

Τα Laser εισήγαγαν τη (δ) φωτοδυναμική θεραπεία (σχήμα 39) που συνίσταται στη χρήση ειδικών ουσιών (π.χ. ηπατοπορφυρίνη), οι οποίες ενίονται στο σώμα του πάσχοντος και έχουν την ιδιότητα να συγκεντρώνονται περισσότερο στα καρκινικά κύτταρα παρά στα υγιή.

Οι ουσίες αυτές είναι ταυτόχρονα ευαίσθητες στο φως, η κάθε μία σε συγκεκριμένη περιοχή μήκους κύματος. Όταν εκτεθεί η ουσία σε αυτό το φως από κατάλληλο dye Laser:

- ή απελευθερώνει χημικές ομάδες (π.χ. μονήρη οξυγόνο) που θανατώνουν τα γύρω κύτταρα
- ή εκπέμπει φθορίζον φως που μαρτυρεί τη θέση των καρκινικών κυττάρων



Σχήμα 39. Αρχή λειτουργίας της φωτοδυναμικής θεραπείας [13]

Η μέθοδος αυτή δεν είναι ακόμα πολύ αποτελεσματική, αλλά δεν ενέχει κίνδυνο (απλώς ο ασθενής μετά τη θεραπεία δεν θα πρέπει να εκτίθεται σε έντονο φως για μερικές μέρες) και δεν τραυματίζει.

Με τη βοήθεια οπτικών ινών γίνεται προσπέλαση εσωτερικών οργάνων, όπως περιοχές της γαστρεντερικής οδού.

7.3 Ειδικές εφαρμογές των Laser: μαλακά (soft) Lasers

Οι περισσότερες ιατρικές εφαρμογές των Laser βασίζονται στις θερμικές επιδράσεις με το βιολογικό ιστό.

Τελευταία αναπτύσσονται νέες εφαρμογές με μαλακά Laser μικρής ισχύος εξόδου (μικρότερης του 1 Watt). Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης δεν ξεκινά με προσφορά θερμότητας, αλλά η ερμηνεία του δεν είναι ακόμη σαφής.

Υπάρχουν ενδείξεις ότι μαλακά Laser:

- επιταχύνουν την επούλωση πληγών
- επιβραδύνουν την «κατολίσθηση» - εκφυλισμό πληγωμένων νευρικών κυττάρων

- επανενώνουν αιμοφόρα αγγεία
- ανακουφίζουν από πόνο
- μπορούν να μιμηθούν τον βελονισμό
- ανανεώνουν τα εξωτερικά κύτταρα της επιδερμίδας (αντικαθιστούν το χημικό peeling στην αισθητική)
- βοηθούν στην αποτρίχωση (καταστρέφουν μόνιμα τις ρίζες)
- βοηθούν στην μεταμόσχευση τριχών από μία περιοχή του σώματος σε άλλη του ίδιου ατόμου (το Laser δημιουργεί το νέο θύλακα)

7.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης Laser στην Ιατρική

Οποιαδήποτε μέθοδος που θα μπορούσε να διοχετεύσει θερμότητα σε σύντομο διάστημα στον ιστό-στόχο, θα ήταν αποτελεσματική στο να προκαλέσει την επιθυμητή βλάβη.

Το κύριο πλεονέκτημα των Laser στη διάνοιξη ιστών είναι το ότι σαν εργαλείο προσαρμόζεται εύκολα στις συνθήκες της εκάστοτε επέμβασης και δρα αιμοστατικά. Η ίδια ακτίνα Laser μπορεί να κόψει σε μικρά ή μεγάλα βάθη, με ακρίβεια, διατηρώντας το πεδίο δράσης καθαρό. Σε συνδυασμό με το ενδοσκοπιο μειώνουν σημαντικά το «βάρος» της επέμβασης, την απώλεια αίματος, τον κίνδυνο μόλυνσης.

Η δυνατότητα επιλογής του χρώματος (μήκος κύματος) επιτρέπει τη μεγαλύτερη ακρίβεια στη στόχευση συγκεκριμένου ιστού, ενώ είναι δυνατή η προσπέλαση ιστού σε βάθος (πχ. αμφιβληστροειδής) χωρίς καμία διάνοιξη.

Παρόλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις οι χειρουργοί προτιμούν το κλασικό νυστέρι ή τον ηλεκτρο-καυτηριασμό, που είναι μέθοδοι δοκιμασμένες, αξιόπιστες και φθηνές. Εξειδικευμένα Laser μπορεί να κοστίζουν δεκάδες χιλιάδες ευρώ και για ένα μέσο χειρουργείο απαιτούνται πάνω από ένα συστήματα. Οι χειρουργοί πρέπει να εξασκηθούν στη χρήση τους σε πειραματόζωα, που απαιτεί χρόνο προσαρμογής.

Υπάρχει πάντα και ο κίνδυνος ανάφλεξης (κυρίως εύφλεκτων υλικών όπως μαλλιά ή καλύμματα χειρουργείου), όπως και ο κίνδυνος τραυματισμού (π.χ. στα μάτια) του προσωπικού ή του ασθενή, πολύ περισσότερο στην περίπτωση χρήσης αόρατου (υπεριώδους ή υπέρυθρου) Laser. Τα συστήματα Laser μπορεί να προκαλέσουν εγκαύματα σε αεροφόρους οδούς από φωτιά σε ενδοτραχειακό σωλήνα όταν η δέσμη Laser χτυπήσει

ενδοτραχειακό σωλήνα από PVC. Συνεπώς, προτιμώνται σωλήνες τυλιγμένοι με ανακλαστική ταινία ή κατασκευασμένοι από ανακλαστικά μέταλλα.

Πρέπει να λαμβάνονται όλες οι απαραίτητες προφυλάξεις, όπως π.χ. η χρήση ειδικών προστατευτικών γυαλιών από το προσωπικό και τον ασθενή, ή η απομάκρυνση όλων των εύφλεκτων υλικών από την περιοχή του «δρόμου» της ακτίνας Laser. Καλύμματα και γάζες των οποίων η παρουσία κρίνεται απαραίτητη, διατηρούνται σε υγρή κατάσταση. Παρομοίως είναι καλό να υπάρχουν χειρουργικές κουρτίνες κατασκευασμένες από υλικό που επιβραδύνει τη φωτιά.

Για την ασφαλέστερη χρήση του αόρατου Laser, συνήθως είναι εξοπλισμένο με σύστημα παράλληλης εκπομπής (παράλληλης ακτίνας σε πολύ μικρή απόσταση) ορατού Laser (συνήθως He-Ne) χαμηλής ισχύος, που δρα ως «οδηγός».

Ορισμένους επιστήμονες αυτού του χώρου, προβληματίζει η σκέψη πως στα μόρια του ιστού που εξαχνώνεται (ατμοποιείται) κατά την θερμική επέμβαση Laser, μπορεί να επιζούν μικρόβια που θα «φωλιάσουν» όπου βρεθούν – καταπέσουν, ενώ πιθανή είναι και τοξική επίδραση των μικροσωματιδίων εξαέρωσης.

Επικίνδυνη ακτινοβολία προκύπτει και όταν η δέσμη Laser συναντά καπνό από την εξαέρωση. Ένα μέρος της ενέργειας μπορεί να μετατοπιστεί σε μήκος κύματος καταλήγοντας συχνά στο ορατό μέρος του φάσματος. Η δευτερογενής αυτή εκπομπή μπορεί να προκαλέσει προσωρινή τύφλωση.

Κατάλληλος εξαερισμός και προσεκτική απορρόφηση του ατμοποιημένου ιστού είναι πλέον από τις προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση Laser επεμβάσεων.

7.5 Φασματοσκοπία και Αναλυτική Χημεία

Κάθε υλικό έχει τα δικά του φάσματα απορρόφησης και εκπομπής. Με επιλεκτική διέγερση χρησιμοποιώντας ειδικά μήκη κύματος, είναι δυνατή η ταυτοποίηση υλικών με σημαντική βεβαιότητα, ακόμη και όταν πρόκειται για πολύ μικρή ποσότητα του υλικού.

Η φασματοσκοπία χρησιμοποιείται στην έρευνα που αφορά σε μόρια, διεγείροντάς τα με ορατή ακτινοβολία. Είναι ένα από τα βασικά εργαλεία στην έρευνα της δομής της ύλης.

Το φως Laser ενδείκνυται για τη φασματοσκοπία, εξαιτίας του ελεγχόμενου μήκους κύματος. Οι μετρήσεις με φως Laser έχουν πολύ καλή διακριτική ικανότητα. Όσο πιο συγκεκριμένο (και γνωστό) είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, τόσο ακριβέστερη είναι η διάκριση των διαφορετικών υλικών σε ένα μικρό κομμάτι ύλης.

Η φασματοσκοπία είναι συγγενικός κλάδος της φωτο-χημείας, της επιστήμης των χημικών μεταβολών που οφείλονται στο φως.

Παραδείγματα είναι:

- (α) το μαύρισμα του δέρματος όταν εκτίθεται στον ήλιο
- (β) η φωτοσύνθεση στα φυτά
- (γ) η διαδικασία της όρασης και ειδικότερα στα κύτταρα του αμφιβληστροειδή χιτώνα
- (δ) ο προκλητός φθορισμός, μία ιδιαίτερα ευαίσθητη μέθοδος, κατά την οποία επιτυγχάνεται επιλεκτική διέγερση ειδικών μορίων σε καθορισμένα ενεργειακά επίπεδα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά στην ιατροδικαστική για την ανίχνευση και ταυτοποίηση εναπομεινάντων ιχνών-μορίων.

Όταν το προσπίπτον φως (ορατό ή μη) είναι μονοχρωματικό (Laser) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- ελεγχόμενη διέγερση μορίων και μελέτη της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας
- μετρήσεις του χρόνου ημιζωής διεγερμένων ενεργειακών επιπέδων
- μελέτη της αντοχής χημικών δεσμών μορίων (excimer Laser)
- φασματοσκοπία Raman (διαδικασία ανελαστικής σκέδασης του φωτονίου από το μόριο. Το φωτόνιο απορροφάται και επανεκπέμπεται με διαφορετική συχνότητα. Μετρώντας τη διαφορά στη συχνότητα γίνεται ταυτοποίηση του μορίου):
 - σκέδαση Stokes (το φωτόνιο επανεκπέμπεται με μικρότερη συχνότητα, το μόριο διεγείρεται)
 - σκέδαση anti-Stokes (το φωτόνιο επανεκπέμπεται με μεγαλύτερη συχνότητα)

7.6 Ψύξη ατόμων

Όλα τα άτομα κινούνται, έχουν θερμική ενέργεια όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν ($^{\circ}\text{K}$).

Σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι δυνατόν να ακινητοποιηθούν άτομα με τη βοήθεια της ροπής φωτονίων ακτινοβολίας Laser.

Όταν η δέσμη φωτονίων κατευθυνθεί αντίθετα προς δέσμη ατόμων, τα φωτόνια και τα άτομα θα αλληλοεπιδράσουν με τρόπο ώστε τα άτομα να απορροφήσουν φωτόνια, αρκεί η ενέργεια των φωτονίων (που εξαρτάται από τη συχνότητά τους) να είναι ίση με την (ενεργειακή) διαφορά ενεργειακών επιπέδων των ατόμων.

Όταν το άτομο κινείται, λόγω του φαινομένου Doppler, «βλέπει» λίγο διαφορετική τη συχνότητα του φωτονίου που πλησιάζει.

Χρησιμοποιώντας περισσότερες δέσμες φωτονίων με αντίθετες κατευθύνσεις, είναι εφικτό τα φωτόνια να ακινητοποιήσουν τα άτομα.

Η συχνότητα της δέσμης Laser επιλέγεται τέτοια ώστε να βρίσκεται πολύ κοντά στη συχνότητα που απορροφά το άτομο, αλλά όχι απόλυτα ίση. Κάθε φορά που το άτομο ξεκινά με κατεύθυνση μία δέσμη Laser, το φαινόμενο Doppler προκαλεί την απορρόφηση της ακτινοβολίας από το άτομο, οπότε το άτομο επιστρέφει στην αρχική του θέση.

7.7 Αλληλεπίδραση HMA και γενετικού υλικού

Η HMA αλληλεπιδρά με την ύλη με αρκετούς διαφορετικούς μηχανισμούς. Η μελέτη των μηχανισμών αυτών είναι πολλά υποσχόμενο ερευνητικό πεδίο, σε θέματα Ιατρικής (τρόποι δράσης του Laser με ιστούς και ειδικότερα στην γενετική μηχανική), καθώς και επεξεργασίας υλικών στη βιομηχανία.

Στη γενετική μηχανική στόχος είναι να μεταβληθούν ελεγχόμενα ιδιότητες των γονιδίων με επέμβαση στα μόρια του DNA, μέσα στον πυρήνα των βιολογικών κυττάρων.

8. Ασφαλής χρήση των Laser

Στις μέρες μας υπάρχουν δύο ομοσπονδιακοί κανονισμοί σχετικά με την ασφαλή χρήση των Laser στις ΗΠΑ. Πρόκειται για το Εθνικό Πρότυπο για την Ασφαλή Χρήση των Laser (ANSI Z 136.1), το οποίο διέπει τη βιομηχανία Laser και το Ασφαλής Χρήση των Laser σε Εγκαταστάσεις Υγείας (ANSI Z 136.3), που καθορίζει την εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση των Laser σε μονάδες υγείας. Υπάρχει άλλο ένα πρότυπο, η Ασφαλής Χρήση των Laser σε Εκπαιδευτικά Ιδρύματα, το οποίο διέπει την ασφαλή χρήση κατά τη διάρκεια εκπαιδευτικών δραστηριοτήτων (ANSI Z 136.5).

Τα πρότυπα ασφάλειας κατανέμουν τις συσκευές Laser σε κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητες της ακτινοβολίας τους (δηλαδή τον κίνδυνο που εμπεριέχουν κατά τη χρήση 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.

Για τα Laser μικρής ισχύος η κύρια βλάβη, που υπάρχει κίνδυνος να συμβεί, είναι στον οφθαλμό.

8.1 Τα χαρακτηριστικά της HMA Laser

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια το φως Laser είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και η διαφορά του με το κοινό φως είναι:

- η μονοχρωματικότητά του
- η μεγάλη πυκνότητα ισχύος (ένταση ανά μονάδα κάθετης επιφάνειας)
- η συμφασικότητά του (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:
 - o 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.

8.2 Επιδράσεις της HMA Laser με βιολογικό ιστό

Το φως Laser είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά μη ιοντίζουσα. Μόνον οι ακτίνες X και γ είναι ηλεκτρομαγνητικές και ιοντίζουσες, επειδή έχουν πολύ μικρό μήκος κύματος.

Σε γενικές γραμμές η HMA επιδρά στο βιολογικό ιστό με τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς:

- ανάκλαση
- διάβαση
- απορρόφηση

Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε διαδικασίας στο τελικό «αποτέλεσμα» εξαρτάται από τις ιδιότητες της HMA και το είδος του ιστού.

Ο κύριος μηχανισμός πρόκλησης βλάβης στον ιστό είναι η απορρόφηση. Η HMA Laser που απορροφάται μπορεί να προκαλέσει:

- θερμική επίδραση [θέτει σε ταλάντωση-δόνηση τα μόρια του βιολογικού ιστού και παράγεται θερμότητα. Η βλάβη κυμαίνεται από μετουσίωση της λευκωματίνης μέχρι έγκαυμα (εξάτμιση)]
- θερμο-ακουστική επίδραση (ειδικά όταν η HMA Laser έχει τη μορφή ισχυρών και σύντομων -μικρότερων του ms- παλμών. Η ακαριαία εναποτιθέμενη μεγάλη ενέργεια προκαλεί πολύ υψηλή τοπική αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την ταχεία εξάτμιση του ύδατος και την έκρηξη του κυττάρου)
- φωτοχημική επίδραση (συμβαίνει όταν το μήκος κύματος της HMA Laser ταιριάζει με την απαιτούμενη ενέργεια-έναυσμα χημικής αντίδρασης μεταξύ συγκεκριμένων οργανικών μορίων)

Κατά τα τελευταία χρόνια ανακαλύφθηκαν ενδείξεις μη αντιστρεπτών μεταβολών σε βιολογικό ιστό μετά από παρατεταμένη έκθεσή του σε ΗΜΑ Laser χαμηλής ισχύος και με μήκη κύματος που μέχρι τότε εθεωρείτο πως δεν προκαλούν επιδράσεις.

8.2.1 Φως Laser και οφθαλμός

Ο οφθαλμός είναι «κατασκευασμένος» έτσι ώστε να δέχεται το φως. Επομένως είναι διαφανής στο ορατό και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ΗΜ φάσματος.

Ο ανθρώπινος οφθαλμός περιέχει μηχανισμό εστίασης του προσπίπτοντος φωτός πάνω στα κύτταρα του αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Η ισχύς εστίασης μετράται από τη σχέση μεταξύ διαμέτρου της ίριδας και διαμέτρου της σχηματιζόμενης φωτεινής κηλίδας στον αμφιβληστροειδή.

Η τελική διάμετρος είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη, δηλαδή το εμβαδόν μειώνεται κατά 6 τάξεις μεγέθους ή η πυκνότητα ισχύος της ΗΜΑ μπορεί να αυξηθεί κατά παράγοντα 10^6 .

Αυτό σημαίνει πως Laser ισχύος milli-watt εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή και η ισχύς του τρέπεται σε εκατοντάδες χιλιάδες watts ανά mm^2 , δηλαδή αναπόφευκτο έγκαυμα (σχήμα 40).

Συνήθως η βλάβη δεν γίνεται αισθητή και είναι πολύ μικρής επιφάνειας, είναι όμως συσσωρευτική. Ο οφθαλμίατρος διαπιστώνει το έγκαυμα με το οφθαλμοσκόπιο.

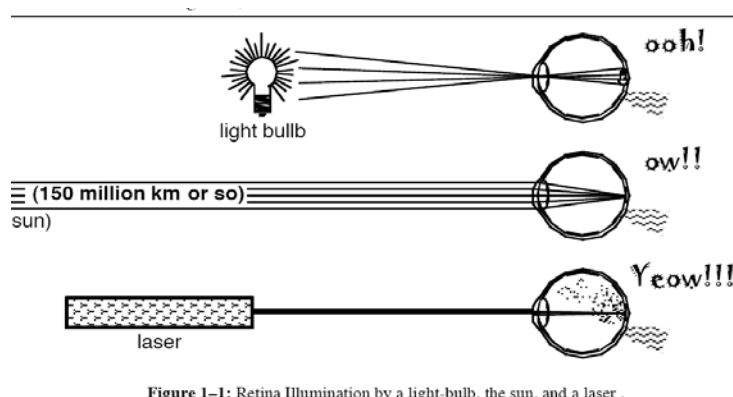


Figure 1-1: Retina Illumination by a light-bulb, the sun, and a laser.

Σχήμα 40. Το Laser βλάπτει τον οφθαλμό [Dept of Physics and Astronomy, Nebraska-Lincoln University, St. Ducharme, 2006]

8.3 Κανόνες ασφάλειας κατά τη χρήση Laser

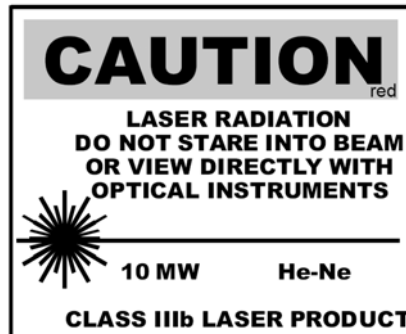
Ο υπεύθυνος πρέπει να επεξηγεί και να ενημερώνει για τους κινδύνους (π.χ. στο σχολείο: και τους καθηγητές και τους μαθητές).

Όλοι πρέπει να αποφεύγουν να κοιτάζουν απευθείας τη φωτεινή δέσμη.

Η καλύτερη προφύλαξη είναι η χρήση εγκεκριμένων γυαλιών ασφαλείας Laser από όλο το προσωπικό. Εάν είναι δυνατό, θα πρέπει και ο ασθενής να φορά τα ίδια γυαλιά. Εάν όμως παρεμβάλλονται με το εγχειρητικό πεδίο ή τη διαδικασία, χρειάζονται υγρά στείρα τολύπια από βαμβάκι ή υγρές πετσέτες ή μεταλλικά οφθαλμικά προστατευτικά να καλύψουν τα βλέφαρα.

Τα παράθυρα των χειρουργείων θα πρέπει να καλύπτονται με αδιαφανές υλικό στο μήκος κύματος του Laser που χρησιμοποιείται. Η δέσμη Laser πρέπει να ανάβει μόνον εφόσον έχει απομακρυνθεί από την πορεία της κάθε ανακλώσα επιφάνεια που θα μπορούσε να την οδηγήσει προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις.

Η χρήση ειδικής σήμανσης αυξάνει την συναίσθηση του κινδύνου στους παρόντες (σχήμα 41).



Σχήμα 41. Προειδοποιητικό σήμα στο χώρο λειτουργίας Laser [Dept of Physics and Astronomy, Nebraska-Lincoln University, St. Ducharme, 2006]

Πρέπει επίσης να αποφεύγεται κάθε επέμβαση-απόπειρα επισκευής της συσκευής Laser, όχι μόνο όσο είναι σε λειτουργία, αλλά και όσο είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό ρεύμα.

8.4 Κατηγοριοποίηση των Laser σε ομάδες, για λόγους ασφάλειας

Το Εθνικό Ίδρυμα Προτύπων της Αμερικής (ANSI) κατατάσσει τα Laser σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τον κίνδυνο που εμπεριέχουν κατά τη χρήση τους.

Για κάθε επόμενη κατηγορία (από την I στην IV) απαιτούνται πρόσθετα μέτρα ελέγχου και προστασίας του χρήστη και των παρόντων.

Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία (από τη συσκευή Laser) που μπορεί να προκαλέσει ζημιά-βλάβη καθορίζεται από δύο παραμέτρους:

- το άνοιγμα-παράθυρο εξόδου της δέσμης
- την απόσταση από τη συσκευή στην οποία πραγματοποιείται η μέτρηση

8.4.1 Επίπεδα Μέγιστης Επιτρεπόμενης Έκθεσης (ΜΕΕ)

Καθορίζουν τη μέγιστη ποσότητα ακτινοβολίας στην οποία μπορεί ο άνθρωπος να εκτεθεί με ασφάλεια.

Η ΜΕΕ εκφράζεται σε J/cm^2 ή W/cm^2 και εξαρτάται από:

- το μήκος κύματος της ΗΜΑ
- τη διάρκεια έκθεσης
- τη συχνότητα των εκπεμπόμενων παλμών
- τη φύση της έκθεσης (σε συγκεντρωμένη δέσμη ή σε διάχυτη)

Επιπλέον, για την ορατή ΗΜΑ, η ΜΕΕ για τον οφθαλμό, υπολογίζεται από την ολική ενέργεια ή ισχύ που μπορεί να περάσει μέσα από την ίριδα σε πλήρη διαστολή (προσαρμοσμένη στο σκοτάδι), δηλαδή διαμέτρου 7 mm (όριο ανοίγματος).

Για να καθορισθεί ο δυνητικός κίνδυνος πρέπει να υπολογισθεί η μέγιστη ενέργεια ή ισχύς που μπορεί να εισέλθει από τόσο άνοιγμα.

Για την υπέρυθη ή υπεριώδη ΗΜΑ το όριο ανοίγματος θεωρείται 1 mm. Όταν χρησιμοποιείται οπτικό σύστημα (π.χ. κυάλια) το όριο ανοίγματος λαμβάνεται ως 50 mm.

8.4.2 Οι τέσσερις ομάδες

Υπάρχουν δύο ακόμη παράμετροι που αφορούν στην ασφαλή χρήση των Laser:

- α) η θεωρητική «απόσταση οπτικής βλάβης» για κάθε τύπο Laser
- β) η οπτική πυκνότητα υλικού που απαιτείται για την προστασία του οφθαλμού

8.4.2.1 Η κατηγορία I

Περιέχει όλα τα Laser, τα οποία κάτω από φυσιολογικές συνθήκες εργασίας, δεν μπορούν να εκπέμψουν ακτινοβολία ικανή να προκαλέσει βλάβη. Στην πράξη αυτά τα Laser καλούνται «Laser ασφαλή για τον οφθαλμό» και δε βλάπτουν κάποιον, ακόμη και αν κοιτάξει απευθείας τη δέσμη για 8 ώρες και ανεξάρτητα από το μήκος κύματος.

Για παράδειγμα, η μέγιστη ισχύς Laser He – Ne που ανήκει στην κατηγορία I είναι 0.4 μW.

Τα Laser αυτής της κατηγορίας δεν μπορούν να εκπέμψουν ακτινοβολία που να ξεπερνά το όριο της MEE

8.4.2.2 Η κατηγορία II

Περιέχει όλα τα «ορατά» Laser χαμηλής ισχύος που διεγείρουν το ανακλαστικό της ίριδας να κλείνει για να προστατέψει τον οφθαλμό. Ο χρόνος της ανακλαστικής αντίδρασης είναι 0.25 του δευτερολέπτου. Τα Laser της κατηγορίας II εκπέμπουν μεγαλύτερη ισχύ, αλλά το ποσό της ενέργειας που εισέρχεται στον οφθαλμό περιορίζεται από το κλείσιμο της ίριδας.

Η μέγιστη ισχύς συνεχούς ορατού Laser της κατηγορίας II είναι 1mW. Αυτά τα Laser είναι κατάλληλα για πειράματα Φυσικής σε μαθητές.

Αν το μήκος κύματος ανήκει στο μη ορατό και η HMA Laser ξεπερνά τα όρια της κατηγορίας I, τότε κατατάσσεται απευθείας στην κατηγορία III.

8.4.2.3 Οι κατηγορίες IIIα και IIIβ

Στην κατηγορία IIIα ανήκουν όλα τα ορατά Laser που εκπέμπουν ακτινοβολία σε επίπεδο που δεν βλάπτει τον άνθρωπο με φυσιολογική λειτουργία οφθαλμού (ανακλαστική αντίδραση της ίριδας).

Η κατηγορία IIIα περιέχει όλα τα Laser μέσης ισχύος με έξοδο μεταξύ 1 και 5 φορές ισχυρότερη της κατηγορίας I, ανάλογα με τη διάρκεια της έκθεσης.

Αν χρησιμοποιούνται οπτικά συστήματα (όπως κυάλια), για την παρατήρηση της δέσμης Laser, μπορεί να προκληθεί βλάβη στον οφθαλμό.

Για Laser He – Ne και Laser διόδων στο ορατό, η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς είναι 5 mWatts.

Η κατηγορία IIIβ περιέχει όλα τα Laser που δεν ανήκουν στις κατηγορίες I ή II και έχουν μήκος κύματος (ορατό ή μη) ικανό να προκαλέσει βλάβη στον οφθαλμό του παρατηρητή, ακόμη και χωρίς τη χρήση οπτικών βοηθητικών εξαρτημάτων.

Η μέγιστη ισχύς των Laser της κατηγορίας IIIβ είναι 0.5 Watt και αδυνατούν να δώσουν περισσότερα από 125 mJ σε 0.25 δευτερόλεπτα.

8.4.2.4 Η κατηγορία IV

Περιέχει όλα τα Laser που δεν ανήκουν στις προηγούμενες κατηγορίες. Θεωρούνται Laser μεγάλης ισχύος.

Η ακτινοβολία τους μπορεί να προκαλέσει:

- βλάβη στον οφθαλμό ακόμη και από σκεδασμένη δέσμη
- βλάβη στο δέρμα
- πυρκαγιά

Οποιοδήποτε Laser με ισχύ εξόδου μεγαλύτερη του 0.5 Watt ανήκει στην κατηγορία IV.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Fundamentals of Physics, 6th ed., by Halliday, Resnick and Walker (Wiley, New York 2003).
2. Physics for Scientists and Engineers, 3rd ed., by Paul A. Tipler (Worth, New York 1991).
3. Modern Physics, 2nd ed., by R. Serway, C. J. Moses, C. A. Mayer (Saunders, Fort Worth 1997).
4. Lasers and Modern Optics in Undergraduate Physics by J. R. Brandenberger (Lawrence University, 1989).
5. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/qualig.html#c2>
6. Applications of Lasers, essay in Fundamentals of Physics, by Garmire, Elsa. 4th ed., by Halliday, Resnick and Walker (Wiley, 1993).
7. Contemporary College Physics, 2nd ed., by Jones, Edwin R (Rudy) and Childers, Richard L (Addison-Wesley, 1993).
8. <http://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Preface/Hp001.htm>
9. Introduction to Physics in Modern Medicine, 1st ed., by S. Amador Kane (Taylor and Francis, London and N.Y. 2003).
10. Lasers and Optical Filers in Medicine, by A. Katzir (Academic Press, San Diego 1993).
11. Low level LASER therapy (LLLT) Nevada Health Forum
<http://wolfweb.unr.edu/homepage/bruch/presentation/lllt.pdf>
12. <http://www.thelasermedic.com>
13. Introduction to Biomedical Engineering. Biomedical Optics II. Kung-Bin Sung, 16/4/2007