



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ & ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Αλληλεπίδραση LASER με ανθρώπινο ιστό»**

**“Laser-tissue interactions”**

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστών:

**Ττοφαλλής Μιχαήλ**

**Μαλλί Αλεξία**

**Παζαρλής Μιχάλης**

Επιβλέπων καθηγητής:

**Θανόπουλος Ιωάννης**

**Αίγιο, 2015**

# Περιεχόμενα

	<b>Σελ.:</b>
<b>Περιεχόμενα Εικόνων</b>	<b>4</b>
<b>Περιεχόμενα Πινάκων</b>	<b>6</b>
<b>Περιεχόμενα Σχημάτων</b>	<b>6</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b>7</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>9</b>
<b>Κεφάλαιο 1:</b>	
<b>Η ακτινοβολία Laser</b>	<b>10</b>
1.1 Ορισμός της ακτινοβολίας Laser	10
1.2 Ιστορική ανασκόπηση της ακτινοβολίας Laser	11
1.3 Ο τρόπος λειτουργίας της ακτινοβολίας Laser	12
1.4 Περιγραφή της συσκευής ακτινοβολίας Laser	19
1.5 Αρχή λειτουργίας της ακτινοβολίας Laser	22
<b>Κεφάλαιο 2:</b>	
<b>Κατηγορίες και ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser</b>	<b>26</b>
2.1 Κατηγορίες ακτινοβολίας Laser	26
2.2 Βασικές ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser	31

### **Κεφάλαιο 3:**

<b>Επίδραση της ακτινοβολίας Laser στους ιστούς</b>	<b>36</b>
3.1 Ιδιότητες του δέρματος	38
3.2 Φαινόμενα που προκαλεί η ακτινοβολία Laser στους ιστούς	41
3.3 Θερμική επίδραση	45
3.3.1 Εκλεκτική φωτο-θερμόλυση	45
3.3.2 Επέκταση της εκλεκτικής φωτοθερμόλυσης	46
3.3.3 Κλασματική φωτο-θερμόλυση	47
3.4 Φωτομηχανική δράση	48
3.5 Φωτοχημική δράση	48

### **Κεφάλαιο 4:**

<b>Κίνδυνοι και προστασία από την ακτινοβολία Laser</b>	<b>49</b>
---	-----------

<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>55</b>
---------------------	-----------

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>57</b>
---------------------	-----------

## Περιεχόμενα Εικόνων

Σελ.:

<b>Εικόνα 1.1:</b> Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ατόμων, α. θεμελιώδης κατάσταση, β, γ. απορρόφηση, δ. αυθόρμητη εκπομπή, ε, στ. εξαναγκασμένη εκπομπή	13
<b>Εικόνα 1.2:</b> Παραστατική λειτουργία Laser	18
<b>Εικόνα 1.3:</b> Σχηματιστική απεικόνιση συσκευής ακτινοβολίας Laser	20
<b>Εικόνα 1.4:</b> Αρχή λειτουργίας του Laser: α. Ενεργό υλικό του Laser – οπτικό αντηχείο, β. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης, γ. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο, ε. Χαμηλότερης ανακλαστικότητας κάτοπτρο - Διάταξη εξόδου δέσμης, στ. Δέσμη Laser	23
<b>Εικόνα 2.1:</b> Μήκος κύματος της ακτινοβολίας που παράγεται από διάφορες συσκευές laser, ανάλογα με το ενεργό μέσο	27
<b>Εικόνα 2.2:</b> Μορφές της παραγόμενης ακτινοβολίας laser. Η κλίμακα κάθε διαγράμματος υποδηλώνεται από τις μονάδες μέτρησης της ισχύος και του χρόνου. Το εμβαδόν της χρωματισμένης περιοχής εκφράζει το ποσό ενέργειας που μεταφέρεται με την δέσμη σε δεδομένο χρονικό διάστημα	28
<b>Εικόνα 2.3:</b> Η πραγματική διασπορά της τιμής του $\lambda$ (αριστερά) σε σχέση με τη θεωρητική (δεξιά)	31
<b>Εικόνα 2.4:</b> Μέτωπα σφαιρικών επίπεδων κυμάτων	32
<b>Εικόνα 2.5:</b> Παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας με χρόνο συμφωνίας $\tau_0$	33
<b>Εικόνα 2.6:</b> Κοκκίωση δέσμης laser	34
<b>Εικόνα 2.7:</b> Λαμπρότητα α. Λαμπρότητα πηγής ΗΜ κυμάτων στο σημείο Ο. β. Λαμπρότητα δέσμης laser διαμέτρου D και γωνιακής απόκλισης $\theta$ .	35
<b>Εικόνα 3.1:</b> Η απορρόφηση της ακτινοβολίας laser σε σχέση με το μήκος κύματος, για διάφορες βιολογικές ουσίες	40
<b>Εικόνα 3.2:</b> Μεταβολές των ιστών από την επίδραση της θερμότητας	43

**Εικόνα 4.1:** α. Ειδικά σήμα που τοποθετείται στην είσοδο χώρων όπου λειτουργούν συσκευές laser. β. Ειδικό σήμα που τοποθετείται στο περίβλημα συσκευών laser 54

## Περιεχόμενα Πινάκων

Σελ.:

<b>Πίνακας 3.1:</b> Φαινόμενα κατά την επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς	41
<b>Πίνακας 3.2:</b> Χρόνος θερμικής χαλάρωσης (TRT) των κυριότερων στόχων	46
<b>Πίνακας 4.1:</b> Μεγίστη επιτρεπτή έκθεση (Maximum Permissible Exposure, MPE) για Nd:YAG Laser	51
<b>Πίνακας 4.2:</b> Βασικές αρχές της Διεθνούς Ταξινόμησης (ANSI) των συσκευών laser, ανάλογα με τον κίνδυνο για πρόκληση βλαβών στους οφθαλμούς και το δέρμα	51

## Περιεχόμενα Σχημάτων

Σελ.:

<b>Σχήμα 1.1.α.:</b> Εξαναγκασμένη απορρόφηση, β. Αυθόρμητη εκπομπή, γ. Εξαναγκασμένη εκπομπή (παραγωγή Laser)	14
--	----

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η μελέτη της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας Laser με τον ανθρώπινο ιστό.

Η δράση των laser είναι αποτέλεσμα της μετατροπής της παρεχόμενης φωτεινής ενέργειας, μετά την απορρόφησή της από τους ιστούς, σε θερμική, μηχανική ή χημική ενέργεια. Πρόκειται για σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας και των χρησιμοποιούμενων συσκευών: μήκος κύματος, ισχύς εξόδου, διάρκεια παλμού, μέγεθος δέσμης και από τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες του ιστού.

Τέλος, θα θέλαμε να αναφερθούμε στην άψογη συνεργασία μας και στην πολύτιμη βοήθεια του επιβλέποντα καθηγητή μας, κ. Θανόπουλο Ιωάννη, για την στήριξη του στην προσπάθεια διεκπεραίωσης της πτυχιακής μας εργασίας. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειές μας για την συμπαράσταση στην φοιτητική μας πορεία.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας Laser με τον ανθρώπινο ιστό. Αποτελεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση που αρχικά μελετά την ακτινοβολία Laser, δηλαδή δίνεται ο ορισμός της ακτινοβολίας Laser, η ιστορική ανασκόπηση της, ο τρόπος λειτουργίας της ακτινοβολίας Laser, περιγράφεται η συσκευή ακτινοβολίας Laser και η αρχή λειτουργίας της ακτινοβολίας Laser.

Έπειτα, παρουσιάζονται οι κατηγορίες και οι ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser και μετέπειτα διερευνάται η επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του δέρματος, τα φαινόμενα που προκαλεί η ακτινοβολία laser στους ιστούς, η θερμική επίδρασή της, η φωτομηχανική και η φωτοχημική δράση.

Τέλος, αναλύονται οι κίνδυνοι και οι τρόποι προστασία του ατόμου από την ακτινοβολία laser.



## **ABSTRACT**

Aim of final work is the study of interaction of radiation Laser with the human web. It constitutes bibliographic examination that studies the radiation Laser, that is to say is initially given the definition of radiation Laser, her historical examination, the way of operation of radiation Laser, is described the appliance of radiation Laser and the beginning of operation of radiation Laser.

Then, are presented the categories and the attributes of radiation Laser and later are investigated the effect of radiation laser in the webs. More concretely are presented the attributes of skin, the phenomena that cause the radiation laser in the webs, her thermal effect, the photomechanical and photochemical action.

Finally, are analyzed the dangers and the ways protection of individual from the radiation laser.

## **Κεφάλαιο 1:**

### **Η ακτινοβολία Laser**

#### **1.1 Ορισμός της ακτινοβολίας Laser**

Το φως αποτελεί συνιστώσα διαφορετικών ακτινοβολιών διαφορετικής συχνότητας, οι οποίες αποτελούν τα διαφορετικά χρώματα όπως τα αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Ενώ στη φύση δεν υπάρχει μονοχρωματική ακτινοβολία, το laser αποτελεί τη μοναδική διάταξη η οποία παράγει μονοχρωματική ακτινοβολία ή αλλιώς δέσμη φωτός ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος, υψηλής έντασης.

Πιο συγκεκριμένα, το laser είναι μια συσκευή που εκπέμπει φως (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) μέσω μιας διαδικασίας οπτικής ενίσχυσης με βάση τη διεγερμένη εκπομπή φωτονίων. Είναι το βασικό δομικό συστατικό των τεχνολογιών για την παραγωγή σύντομων παλμών φωτός. Μόνο δύο δεκαετίες μετά την εφεύρεσή του, η διάρκεια του συντομότερου παλμού που μπορεί να παραχθεί είχε συρρικνωθεί προς τα κάτω έξι τάξεις μεγέθους, από το νανοδευτερόλεπτο στο femtosecond.

Ο όρος laser προέρχεται από την αγγλική λέξη Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) και αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τόσο τις συσκευές όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία που αυτές παράγουν. Η λειτουργία των laser ερμηνεύεται από την θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής (Rullière, 2004).

## 1.2 Ιστορική ανασκόπηση της ακτινοβολίας Laser

Η θεωρητική τεκμηρίωση της λειτουργίας των laser ξεκίνησε στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, όταν ο Planck, στηριζόμενος στην Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία του Maxwell (1862), ανέπτυξε την ιδέα της δυαδικής φύσης του φωτός, δηλαδή ότι το φως εμφανίζει τόσο κυματικές όσο και σωματιδιακές ιδιότητες.

Επεκτείνοντας την παραπάνω θεώρηση του φωτός, ο Einstein (1917) το 1905 πρότεινε την Κβαντική Θεωρία του Φωτός, βασικό στοιχείο της οποίας ήταν η παραδοχή ότι η μεταφορά ενέργειας με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία γίνεται σε ασυνεχείς ποσότητες με τα φωτόνια..

Το 1913 ο Bohr έδωσε την θεωρητική ερμηνεία της αυθόρμητης εκπομπής ενώ ο Einstein διατύπωσε λίγα χρόνια μετά (1917) την αρχή της εξαναγκασμένης εκπομπής.

Το 1951 οι Purcell και Pound έθεσαν τη θεωρητική βάση της λειτουργίας του maser, προγόνου του laser. Η λέξη MASER προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων *microwave amplification by stimulated emission of radiation* (Ενίσχυση Μικροκυμάτων με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας). Το πρώτο maser κατασκευάστηκε το 1955 από τους Gordon και συν (1955).

Το 1958 οι Schawlow και Towns υποστήριξαν τη δυνατότητα κατασκευής ενός laser βασιζόμενοι στο maser.

Το 1960 ο Maiman κατασκεύασε το πρώτο laser με ενεργό μέσο έναν κρύσταλλο ρουμπινίου και τον ίδιο χρόνο έγινε η πρώτη εφαρμογή του στην οφθαλμολογία.

### 1.3 Ο τρόπος λειτουργίας της ακτινοβολίας Laser

Για να γίνει καλύτερα κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας των laser θα παραθέσουμε ορισμένα στοιχεία από την Ατομική Φυσική.

Σύμφωνα με το Ατομικό Πρότυπο του Bohr (το οποίο δε θεωρείται ορθό σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, αλλά εξυπηρετεί καλύτερα από το μοντέλο της Κβαντομηχανικής την ανάγκη για απλότητα και κατανόηση), το άτομο αποτελείται από έναν πυρήνα γύρω από τον οποίο περιφέρονται τα ηλεκτρόνια ( $e^-$ ) σε καθορισμένες, θερμοδυναμικά επιτρεπτές τροχιές συγκεκριμένης ενέργειας.

Υπό συνθήκες ενεργειακής ισορροπίας, τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν τις χαμηλότερες δυνατές ενεργειακές στάθμες, οπότε το άτομο βρίσκεται στο κατώτερο επίπεδο ενέργειας που λέγεται θεμελιώδης κατάσταση ( $E_0$ ). Στην κατάσταση αυτή βρίσκεται σε ηρεμία και διατηρείται σταθερό. Για την προσέγγιση των φαινομένων θα θεωρήσουμε ένα άτομο που φέρει ένα ηλεκτρόνιο σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα του (Εικόνα 1.1.α).

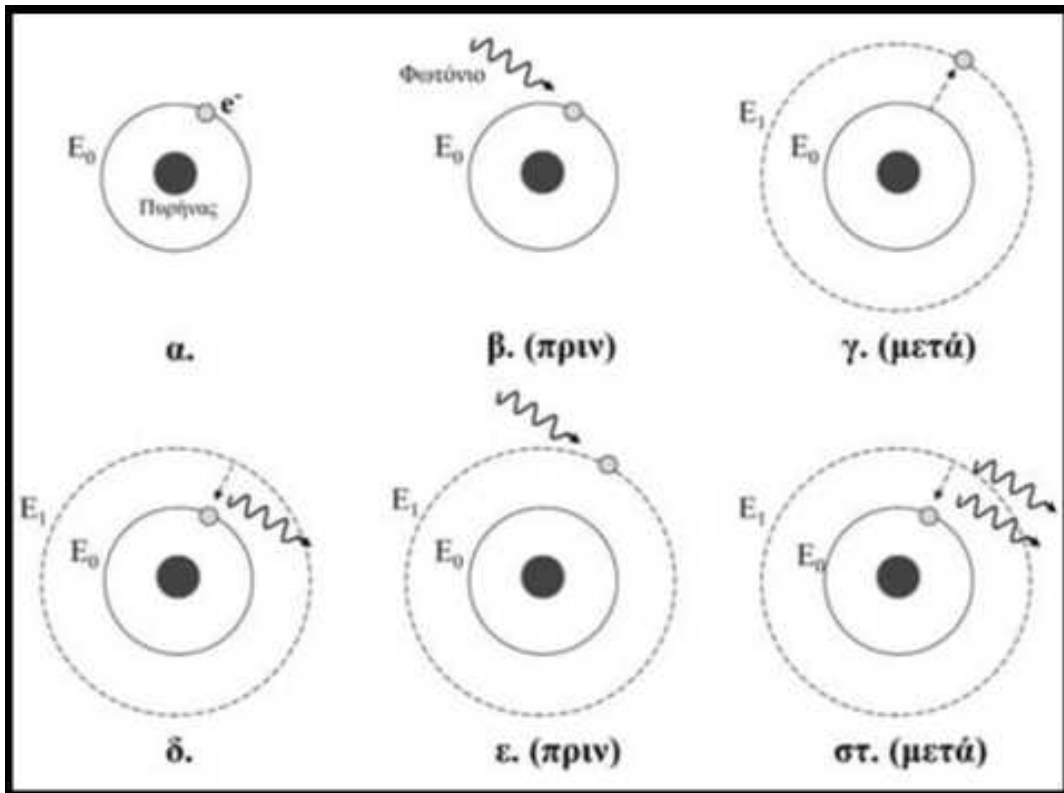
**Εικόνα 1.1:** Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ατόμων,

1.1.α. θεμελιώδης κατάσταση,

1.1.β, γ. απορρόφηση,

1.1.δ. αυθόρμητη εκπομπή,

1.1.ε, στ. εξαναγκασμένη εκπομπή.

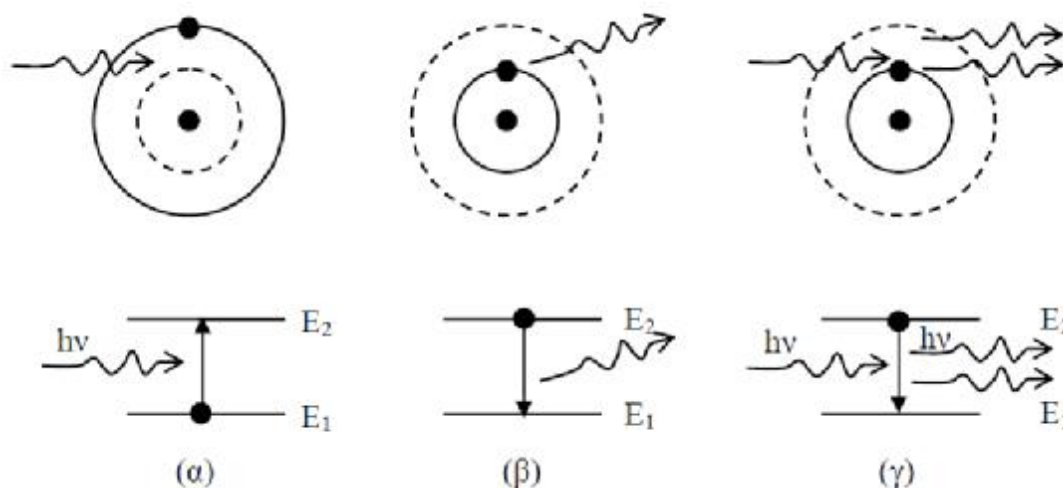


Πηγή: Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004

**Σχήμα 1.1.α.:** Εξαναγκασμένη απορρόφηση.

1.1.β. Αυθόρμητη εκπομπή

1.1.γ. Εξαναγκασμένη εκπομπή (παραγωγή Laser).



Πηγή: Μπενής, 2013

Όταν το άτομο δεχθεί την επίδραση ακτινοβολίας ορισμένης συχνότητας ( $\nu$ ), άρα και ορισμένου μήκους κύματος ( $\lambda$ ), μπορεί να απορροφήσει ένα φωτόνιο και τότε ένα ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει από την τροχιά της θεμελιώδους κατάστασης ( $E_0$ ) σε άλλη τροχιά υψηλότερης ενέργειας ( $E_1$ ) (απορρόφηση) (Εικόνα 1.1β,γ), όπου και παραμένει για μικρό χρονικό διάστημα. Η απορρόφηση συμβαίνει, μόνο αν η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο τροχιών ( $\Delta E = E_1 - E_0$ ) είναι ίση με την ενέργεια του φωτονίου.

$$E_{\varphi} = h\nu = hc/\lambda,$$

Όπου:

$E_{\varphi}$  = η ενέργεια του φωτονίου,

$N$  = η συχνότητα,

$h$ = η σταθερά του Planck,

$c$ = η ταχύτητα του φωτός και

$\lambda$ = το μήκος κύματος

Στη συνέχεια, το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει μόνο του, χωρίς την επίδραση κάποιου εξωτερικού αιτίου, στην αρχική του τροχιά εκπέμποντας ένα φωτόνιο της ίδιας ενέργειας, άρα και του ίδιου μήκους κύματος με αυτό που προκάλεσε τη διέγερση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή (Εικόνα 1.1.δ). Τα φωτόνια που παράγονται με αυτό τον τρόπο δεν έχουν καθορισμένη διεύθυνση εκπομπής ούτε βρίσκονται σε συμφωνία φάσης μεταξύ τους και έτσι, η ακτινοβολία που παράγεται είναι ασθενής. Παράδειγμα ακτινοβολίας από αυτόματη εκπομπή είναι η ακτινοβολία των λαμπτήρων Ne (λαμπτήρες φθορισμού).

Υπάρχει όμως και η δυνατότητα να προκαλέσουμε την εκπομπή του φωτονίου. Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή, η επίδραση ενός φωτονίου (του ίδιου μήκους κύματος με αυτό που προκάλεσε την διέγερση) σε ένα ήδη διεγερμένο άτομο έχει ως αποτέλεσμα τη μεταπήδηση του ηλεκτρονίου από την ασταθή ( $E_1$ ) στην θεμελιώδη κατάσταση ( $E_0$ ) με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου το οποίο έχει το ίδιο μήκος κύματος, την ίδια διεύθυνση, την ίδια πόλωση με αυτό που προκάλεσε την αποδιέγερση και βρίσκεται σε χωρική και χρονική συμφωνία με αυτό (Εικόνα 1.1.ε,στ). Η εξαναγκασμένη εκπομπή συμβαίνει προτού συμβεί η αυθόρμητη εκπομπή από το διεγερμένο άτομο. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας συσκευής laser και οι τρεις παραπάνω διαδικασίες συμβαίνουν ταυτόχρονα, όμως η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι η κρίσιμη διαδικασία για τη δημιουργία της ακτινοβολίας laser.

Η παραγωγή της ακτινοβολίας laser, που είναι μια δέσμη τέτοιων φωτονίων, προϋποθέτει δύο στοιχεία: την ύπαρξη ατόμων σε διεγερμένη κατάσταση για ικανό χρονικό διάστημα και την ύπαρξη φωτονίων συγκεκριμένου μήκους κύματος, για την εξαναγκασμένη αποδιέγερση των ατόμων (εξαναγκασμένη εκπομπή).

Σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας η αναλογία των διεγερμένων ατόμων προς τα μη διεγερμένα (άτομα σε θεμελιώδη κατάσταση) σε οποιοδήποτε μέσο είναι εξαιρετικά μικρή. Αυτό έχει ως συνέπεια η εξαναγκασμένη εκπομπή να είναι περιορισμένη ή ασήμαντη και να επικρατεί η απορρόφηση. Αν όμως επιτευχθεί

με κάποιο τρόπο αύξηση του αριθμού των διεγερμένων ατόμων σε βάρος των μη διεγερμένων (δηλαδή δημιουργηθεί η λεγόμενη αναστροφή πληθυσμών) τότε επικρατεί η εξαναγκασμένη εκπομπή και η δέσμη των φωτονίων αυξάνει σε ένταση.

Η αναστροφή των πληθυσμών και η διατήρησή της επιτυγχάνεται με τη συνεχή προσφορά ενέργειας από εξωτερική πηγή στα άτομα, ώστε να διατηρούνται για ικανό χρονικό διάστημα σε κατάσταση διέγερσης, διαδικασία γνωστή ως άντληση. Έτσι, αυξάνεται η πιθανότητα ένα φωτόνιο κατάλληλου μήκους κύματος να αλληλεπιδράσει με ένα διεγερμένο άτομο και να προκληθεί η εξαναγκασμένη εκπομπή.

Η δεύτερη προϋπόθεση, δηλαδή η συνεχής παραγωγή φωτονίων συγκεκριμένου μήκους κύματος για την εξαναγκασμένη αποδιέγερση, πραγματοποιείται αρχικά με τυχαίο τρόπο, δηλαδή φωτόνια από αυθόρμητη εκπομπή κάποιων ατόμων προκαλούν την εξαναγκασμένη αποδιέγερση άλλων ατόμων. Στη συνέχεια όμως, τα παραγόμενα από εξαναγκασμένη πλέον εκπομπή φωτόνια, όλα του ίδιου μήκους κύματος, της ίδιας διεύθυνσης και σε συμφωνία φάσης, προκαλούν την εξαναγκασμένη αποδιέγερση και άλλων ατόμων οδηγώντας στην αναπαραγωγή του φαινομένου.

Βέβαια, αυτή δεν είναι παρά μια απλοποιημένη προσέγγιση του φαινομένου. Στην πραγματικότητα τα ηλεκτρόνια μεταπίπτουν σε διαδοχικές ενεργειακές στάθμες (τουλάχιστον τρεις) και όχι μόνο μεταξύ δυο καταστάσεων (θεμελιώδης - ασταθής), ενώ η διέγερση μπορεί να αφορά εκτός από άτομα, μόρια ή ιόντα (Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004).

Μια παραστατική απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας του laser παρουσιάζεται στην εικόνα 1.2.

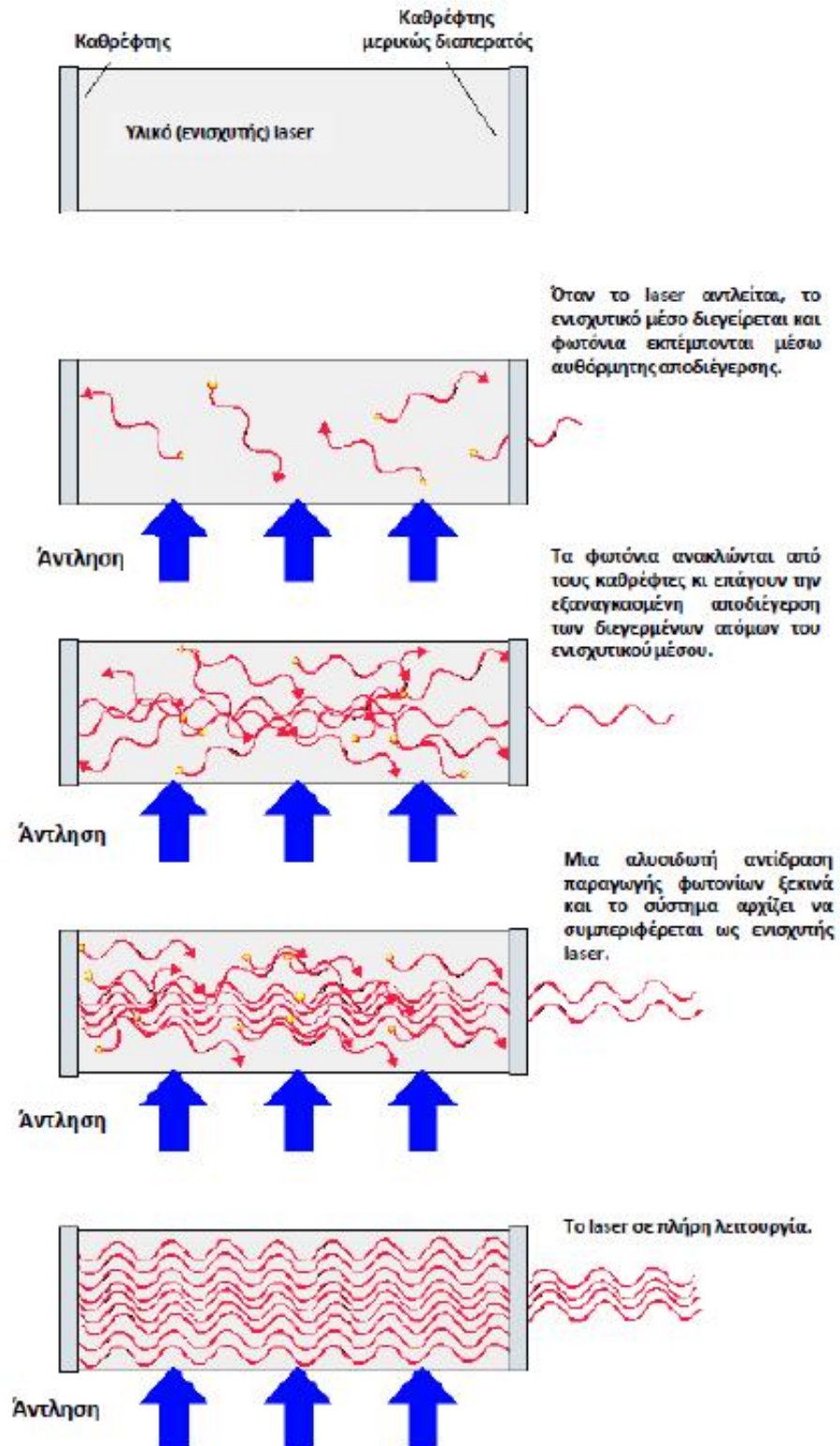
Αρχικά το laser αποτελείται από τους δυο καθρέφτες της κοιλότητας και το ενισχυτικό μέσο (άτομα, μόρια, κρύσταλλος, κτλ.) αρχίζει να αντλείται. Η άντληση έχει ως αποτέλεσμα την διέγερση των ατόμων του ενισχυτικού μέσου. Στη συνέχεια τα άτομα αποδιεγείρονται τυχαία σε χρόνους της τάξης των ns μέσω του μηχανισμού της αυθόρμητης αποδιέγερσης. Τα φωτόνια που προκύπτουν από αυτόν τον μηχανισμό εκπέμπονται προς όλες τις διευθύνσεις.

Μερικά (ή ένα) εξ αυτών που τυγχάνει να διαδίδονται στον άξονα της



κοιλότητας ανακλώνται πολλαπλώς μεταξύ των καθρεφτών της κοιλότητας επάγοντας έτσι την εξαναγκασμένη αποδιέγερση των ατόμων του ενισχυτικού μέσου. Τα προκύπτοντα φωτόνια εκπέμπονται στην ίδια διεύθυνση με τον άξονα της κοιλότητας με αποτέλεσμα το φαινόμενο να παίρνει πολύ γρήγορα διαστάσεις χιονοστιβάδας. Πολύ γρήγορα οι διάφοροι εμπλεκόμενοι μηχανισμοί (άντληση, ενίσχυση, απώλειες, κτλ.) έρχονται σε ισορροπία και το laser τίθεται στην πλήρη λειτουργία του (Μπενής, 2013).

Εικόνα 1.2: Παραστατική λειτουργία Laser



Πηγή: Μπενής, 2013

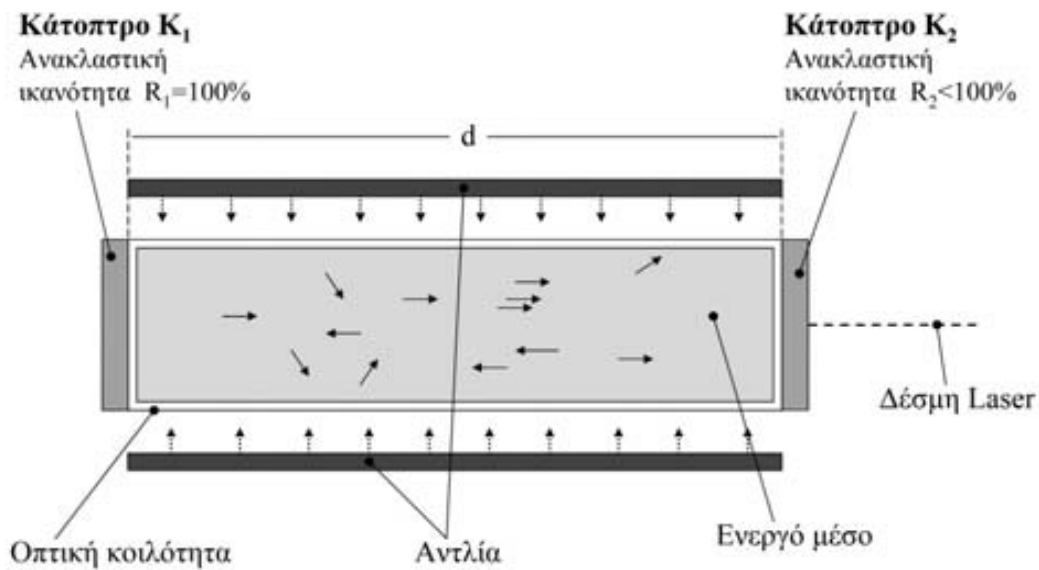
## 1.4 Περιγραφή της συσκευής ακτινοβολίας Laser

Τα βασικά μέρη μιας συσκευής laser είναι:

- **το ενεργό μέσο**, τα άτομα του οποίου υφίστανται διαδοχικές διεγέρσεις και αποδιεγέρσεις και παράγουν την ακτινοβολία.
- **η αντλία**, που είναι η εξωτερική πηγή ενέργειας η οποία συντηρεί την αναστροφή πληθυσμών.
- **η οπτική κοιλότητα**, που είναι ο χώρος μέσα στον οποίο δημιουργείται η ακτινοβολία laser. Στα άκρα της βρίσκονται οι οπτικοί ανακλαστήρες (κάτοπτρα)

Μια απλοποιημένη διάταξη laser παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.3. Ένας κυλινδρικός σωλήνας αποτελεί την οπτική κοιλότητα, μέσα στην οποία βρίσκεται το ενεργό μέσο. Στα άκρα του σωλήνα βρίσκονται τα επίπεδα κάτοπτρα  $K_1$  και  $K_2$ , απόλυτα παράλληλα μεταξύ τους (συνθήκη, εξαιρετικά, δύσκολη στην εφαρμογή της, αλλά χρήσιμη για την επεξήγηση των φαινομένων). Η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων ( $d$ ) είναι σταθερή και καθορισμένη με ακρίβεια, εξαρτάται δε από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που επιθυμούμε να παράγει η συσκευή (είναι ίση με ακέραιο αριθμό ημι-κυμάτων ( $m$ ),  $d = m\lambda/2$ ).

**Εικόνα 1.3:** Σχηματιστική απεικόνιση συσκευής ακτινοβολίας Laser



Πηγή: Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004

Η διέγερση του ενεργού μέσου γίνεται με προσφορά εξωτερικής ενέργειας από την αντλία είτε με συνεχή είτε με παλμικό τρόπο, οπότε δημιουργείται η αναστροφή πληθυσμών και παράγονται φωτόνια. Αρχικά, τα παραγόμενα φωτόνια προέρχονται από αυθόρμητη εκπομπή και έχουν τυχαίες διευθύνσεις και ενδεχομένως ποικίλα μήκη κύματος. Όσα κατευθύνονται προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου εξέρχονται από την οπτική κοιλότητα ή απορροφούνται από μη διεγερμένα άτομα του ενεργού μέσου ή ακόμη και από τα τοιχώματα. Από αυτά που κινούνται σε διεύθυνση παράλληλη με τον επιμήκη άξονα του κυλίνδρου, όσα φωτόνια δεν έχουν το συγκεκριμένο μήκος κύματος διαρρέουν έξω από την οπτική κοιλότητα εξαιτίας των διαθλαστικών ιδιοτήτων των κατόπτρων, ενώ μόνο όσα έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος (που ικανοποιεί τη συνθήκη  $d = 10l/2$ ) ανακλώνται διαδοχικά στα κάτοπτρα  $K_1$ ,  $K_2$  και εκτελούν μια παλινδρομική κίνηση (ταλάντωση) μεταξύ των κατόπτρων.

Λόγω της αναστροφής πληθυσμών, τα φωτόνια αυτά αλληλεπιδρούν με διεγερμένα άτομα προκαλώντας την εξαναγκασμένη αποδιέγερσή τους και νέα φωτόνια του ίδιου μήκους κύματος και σε χωρική και χρονική συμφωνία μεταξύ τους παράγονται συνεχώς, με αποτέλεσμα την οπτική ενίσχυση της ακτινοβολίας. Η όλη

διαδικασία συμβαίνει μέσα σε χρονικό διάστημα ορισμένων nsec, δεδομένου ότι τα φωτόνια κινούνται μεταξύ των κατόπτρων με την ταχύτητα του φωτός.

Είναι προφανές ότι μόνο φωτόνια που κινούνται παράλληλα προς τον επιμήκη άξονα του κυλίνδρου και έχουν συγκεκριμένο μήκος κύματος συντελούν στην ενίσχυση της ακτινοβολίας. Βέβαια, η παραδοχή της απόλυτης παραλληλότητας των επιπέδων κατόπτρων είναι μόνο θεωρητική και επιπλέον δίνει τη δυνατότητα παλινδρόμησης των φωτονίων σε πολλούς επιμήκεις άξονες, όλους παράλληλους μεταξύ τους. Στην πράξη, τα κάτοπτρα κατασκευάζονται κοίλα και παρέχουν την δυνατότητα συγκέντρωσης σχεδόν όλων των φωτονίων σε μία διεύθυνση (έναν άξονα), ακόμα και αν τα κάτοπτρα δεν είναι απόλυτα παράλληλα μεταξύ τους. Ακόμη, τα χρησιμοποιούμενα κάτοπτρα έχουν συγκεκριμένες διαθλαστικές ιδιότητες, ώστε τα ανακλώμενα φωτόνια να βρίσκονται σε χωρική και χρονική συμφωνία.

Αν και τα δύο κάτοπτρα ( $K_1$ ,  $K_2$ ) είχαν ανακλαστική ικανότητα  $R=100\%$ , τότε η έξοδος της δέσμης από την οπτική κοιλότητα θα ήταν αδύνατη. Γι' αυτό, το ένα από τα κάτοπτρα ( $K_2$ ) κατασκευάζεται με ανακλαστική ικανότητα  $R_2 < 100\%$ , οπότε το  $100\% - R_2$  της δέσμης φωτονίων εξέρχεται με τη μορφή της δέσμης laser. Το  $100\% - R_2$  ίσως να φαίνεται μικρό ποσοστό, όμως είναι απαραίτητο ένα ικανό μέρος της δέσμης των φωτονίων να παλινδρομεί μέσα στην οπτική κοιλότητα ώστε να συντηρείται η παραγωγή της ακτινοβολίας και να υπερκαλύπτονται οι απώλειες (απορρόφηση από μη διεγερμένα άτομα του ενεργού μέσου, απώλειες των κατόπτρων κ.α.) και το ποσοστό των φωτονίων που εξέρχονται από την οπτική κοιλότητα με τη μορφή δέσμης.

Βέβαια, η σχέση  $d = 10\lambda/2$ , για δεδομένη απόσταση μεταξύ των κατόπτρων ( $d$ ), προβλέπει άπειρο αριθμό δυνατών μηκών κύματος για διάφορες τιμές του  $m$ . Παρόλα αυτά, μόνο για ορισμένα μήκη κύματος (συνήθως 2 ή 3 μήκη κύματος) το κέρδος από την οπτική ενίσχυση είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες, οπότε ευνοείται η παλινδρόμηση των φωτονίων και η εξαναγκασμένη εκπομπή. Από αυτά τα μήκη κύματος, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει επιλογή του ενός με κατάλληλη τροποποίηση του κέρδους από την οπτική ενίσχυση, ενώ σε περιπτώσεις όπου αυτό δεν είναι δυνατό, η εφαρμογή μεθόδων με υψηλή επιλεκτικότητα (όπως mode-locking) στην παραγόμενη δέσμη οδηγεί στην παραγωγή μονοχρωματικής ακτινοβολίας του επιθυμητού μήκους κύματος (Μπουτσιούκης, Παντελίδου,

Μπουτσιούκης, 2004).

## 1.5 Αρχή λειτουργίας της ακτινοβολίας Laser

Από την ανακάλυψη του laser μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλοί διαφορετικοί τύποι Laser με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τη λειτουργία και κατασκευή. Ωστόσο κάθε τύπος laser ακολουθεί ορισμένες βασικές αρχές λειτουργίας που με τη σειρά τους απαιτούν βασικές αρχές κατασκευής. Έτσι σε κάθε διαφορετικό τύπο laser μπορούν να διακριθούν τα εξής τμήματα (Εικόνα 1.4):

Το ενεργό υλικό είναι το υλικό που βρίσκεται σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών και δρα ενισχύοντας την οπτική ακτινοβολία που διέρχεται μέσω αυτού η οποία εγκλωβίζεται στο λεγόμενο οπτικό αντηχείο, το οποίο αποτελείται από δύο κάτοπτρα.

Η κατάσταση αντιστροφής επιτυγχάνεται μέσω της επίδρασης στο ενεργό υλικό μίας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι ηλεκτρικές ή φωτεινές, όπως η λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή laser. Με τη λεγόμενη διαδικασία άντλησης μεταφέρεται ενέργεια στα σωματίδια του ενεργού υλικού, έτσι, ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μια διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Έτσι λοιπόν, μία δέσμη φωτός που περνάει μέσα από το υλικό έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσει σε εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από ότι σε εξαναγκασμένη απορρόφηση, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ενίσχυση της δέσμης.

**Εικόνα 1.4:** Αρχή λειτουργίας του Laser:

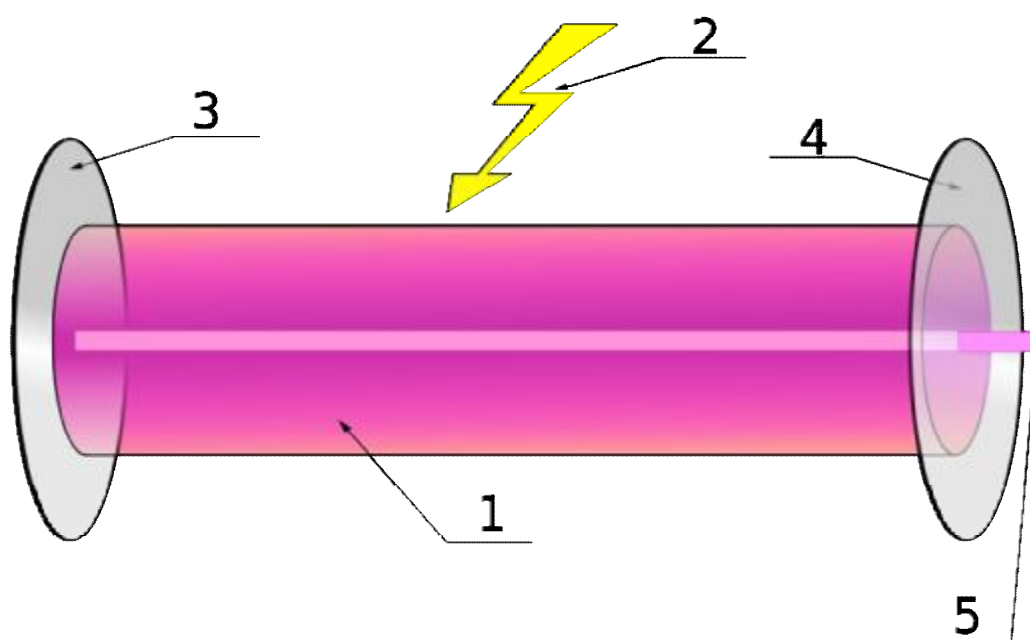
1.4.1. Ενεργό υλικό του Laser – οπτικό αντηχείο,

1.4.2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης,

1.4.3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο,

1.4.4. Χαμηλότερης ανακλαστικότητας κάτοπτρο - Διάταξη εξόδου δέσμης,

1.4.5. Δέσμη Laser



Πηγή: <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>

Στην Εικόνα 1.4 το ενεργό υλικό βρίσκεται ανάμεσα σε δύο κάτοπτρα που σχηματίζουν το οπτικό αντηχείο. Το ενεργό υλικό διοχετεύει την ενέργεια που δέχεται με τη διαδικασία άντλησης στο πεδίο της ακτινοβολίας που σχηματίζεται. Έτσι η οπτική ακτινοβολία που διαδίδεται από το πρώτο κάτοπτρο προς το δεύτερο βγαίνει κατά πολύ ενισχυμένη από το ενεργό υλικό. Το δεύτερο κάτοπτρο χαμηλότερης ανακλαστικότητας είναι κατασκευασμένο, ώστε μόνο ένα μικρό κλάσμα της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό να είναι δυνατόν να περάσει δια

μέσω αυτού. Η ακτινοβολία που καταφέρνει να περάσει αποτελεί τη χρήσιμη ακτινοβολία εξόδου του Laser. Η ακτινοβολία που παραμένει στη συσκευή ανακλάται και επιστρέφει στο οπτικό αντηχείο και ενισχύεται ξανά με το πέρασμά της διαμέσου του ενεργού υλικού. Προσπίπτοντας στο πρώτο κάτοπτρο υψηλής ανακλαστικότητας ακολουθεί την ίδια πορεία προς την έξοδο της συσκευής (Μήτσου, 2007).

Η ακτινοβολία εξόδου του Laser, όπως π.χ. αυτή ενός Laser He-Ne ισχύος 1 mW, διαφέρει ποιοτικά από την ακτινοβολία μιας λάμπας πυράκτωσης ή ενός σωλήνα φθορισμού, υπερτερώντας σε τέσσερα σημεία:

- την κατευθυντικότητα,
- την ένταση,
- την φασματική καθαρότητα και
- την συμφωνία.

Όσον αφορά την κατευθυντικότητα, η συμβατική πηγή φωτός (π.χ. λάμπα πυράκτωσης) που λειτουργεί βασισμένη στο φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής, εκπέμπει ακτινοβολία προς όλες τις διευθύνσεις με ανώμαλη κατανομή φωτοβολίας. Αντίθετα η ακτινοβολία Laser έχει αυστηρά περιορισμένη κατεύθυνση σχηματίζοντας μία λεπτή δέσμη μικρής εγκάρσιας διατομής (της τάξης του ενός mrad).

Παράλληλα με την κατευθυντικότητα, η ένταση της ακτινοβολίας (τιμή της ροής της φωτεινής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας) ή η λαμπρότητα (τιμή της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας ανά μονάδα στερεάς γωνίας) ακόμα και για ένα Laser χαμηλής ισχύος (όπως το 1mW Laser He - Ne) παίρνουν πολύ μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές φωτός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ότι ενώ η λαμπρότητα του ήλιου είναι  $1.5 \times 10^9$  Lumen/m<sup>2</sup> Sterad, η αντίστοιχη τιμή λαμπρότητας για το 1 mW Laser He - Ne είναι  $2,04 \times 10^{11}$  Lumen/m<sup>2</sup> Sterad, δηλαδή 136 φορές μεγαλύτερη.

Σχετικά με τη φασματική καθαρότητα μία συμβατική πηγή φωτός όπως μια λάμπα πυράκτωσης έχει μια διευρυμένη περιοχή φάσματος. Για παράδειγμα η λάμπα πυράκτωσης έχει συνεχές φάσμα από περίπου 300 nm μέχρι 2.000 nm. Σε αντίθεση,



το Laser είναι μια αυστηρά μονοχρωματική ακτινοβολία που ακόμη και για ένα απλό Laser He–Ne μπορεί να σταθεροποιηθεί σε μια συχνότητα σταθερή με εύρος 1 MHz.

Τέλος, η συμφωνία είναι το μέτρο της έκτασης στην οποία η φάση της ακτινοβολίας διατηρείται σταθερή σε διαφορετικά σημεία στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η ακτινοβολία. Το laser υπερτερεί στη συμφωνία (χρονική και χωρική) σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη ακτινοβολία παραγόμενη από συμβατική πηγή (Μπενής, 2013).

## Κεφάλαιο 2:

### Κατηγορίες και ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser

#### 2.1 Κατηγορίες ακτινοβολίας Laser

Πολλά υλικά έχουν βρεθεί ότι έχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των laser, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών τύπων laser με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

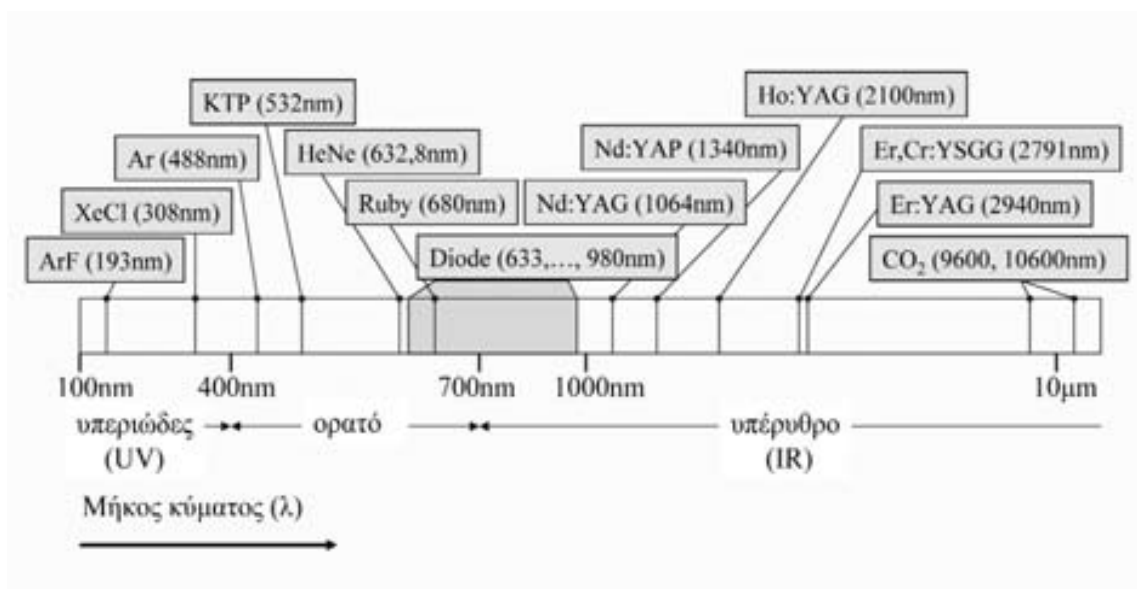
Τα Laser μπορούν να διαχωριστούν με βάση το ενεργό υλικό, την ισχύ της ακτινοβολίας και τη βιολογική τους δράση σε διάφορες κατηγορίες, οι οποίες φαίνονται παρακάτω.

Με βάση το ενεργό υλικό που χρησιμοποιείται ταξινομούνται σε:

- **στερεάς κατάστασης**, με ενεργό υλικό π.χ. το Γάλλιο, το Ρουβίδιο, το Αρσενικό, το Νεοδύμιο και το Αλουμίνιο.
- **υγρής κατάστασης**, που το ενεργό υλικό είναι διάλυμα μεγάλων οργανικών μορίων χρωστικών διαλυμένων σε υγρούς διαλύτες (μεθανόλη, αιθελυνογλυκόλη, διοξάνη, κλπ) σε συγκεντρώσεις της τάξης 1:10.000.
- **αέριας κατάστασης**, με ενεργό υλικό π.χ. το Αργό, το Νέο και το CO<sub>2</sub>.
- **ημιαγωγών**, που το ενεργό υλικό αποτελούν επεξεργασμένοι κρυσταλλοδίοδοι π.χ. GaAs (γαλλιούχο αρσενικό), GaP (γαλλιούχος φώσφορος), InSb (ινδιούχο αντιμόνιο), InAs (ινδιούχο αρσενικό), InP (ινδιούχος φώσφορος) (Κατσικαλάκη, 2013).

Ως ενεργό μέσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάθε ουσία που έχει τη δυνατότητα να υφίσταται διαδοχικές διεγέρσεις και αποδιεγέρσεις των ατόμων της χωρίς να προκαλούνται αλλαγές στη δομή της και ταυτόχρονα να διατηρεί την αναστροφή πληθυσμών [ύπαρξη ενεργειακών σταθμών υψηλότερων από τη θεμελιώδη και ενδιάμεσων (μετασταθερών) ενεργειακών σταθμών]. Κάθε συσκευή laser παράγει ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος, ανάλογα με το ενεργό μέσο που διαθέτει (Εικόνα 2.1), το οποίο συνήθως δίνει και την ονομασία στην συσκευή.

**Εικόνα 2.1:** Μήκος κύματος της ακτινοβολίας που παράγεται από διάφορες συσκευές laser, ανάλογα με το ενεργό μέσο



Πηγή: Κατσικαλάκη, 2013

Επίσης, ανάλογα με το ενεργό μέσο είναι διαφορετικός και ο μηχανισμός προσφοράς ενέργειας στο σύστημα (η αντλία μπορεί να είναι π.χ. μία ηλεκτρική πηγή που δημιουργεί ηλεκτρικές εκκενώσεις, ένας ισχυρός λαμπτήρας Xe ή ακόμα και μια άλλη συσκευή laser).

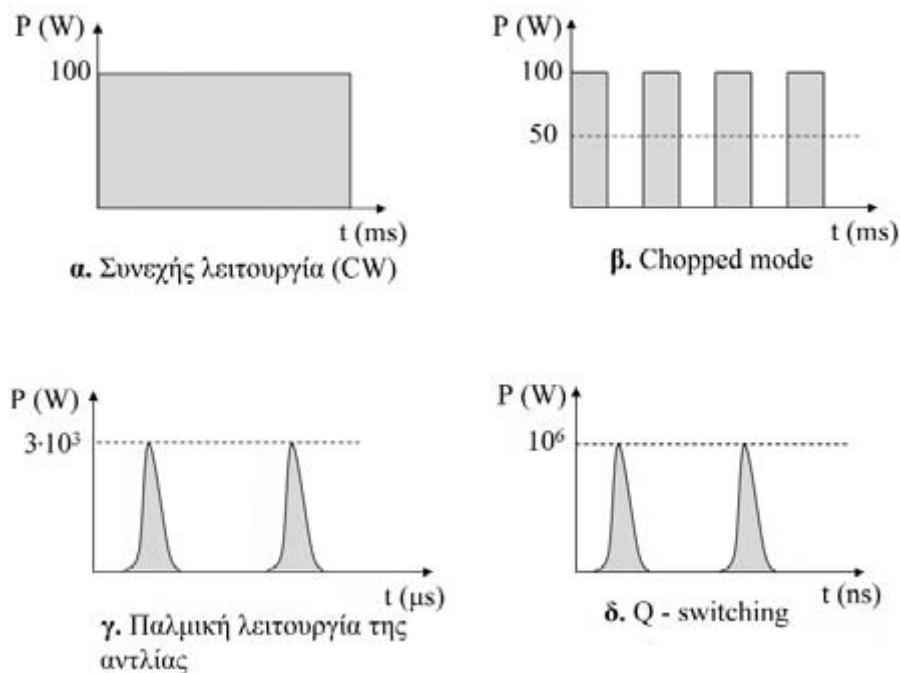
Άλλες ταξινομήσεις των συσκευών laser λαμβάνουν υπόψη την ισχύ εξόδου ή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Οι διάφορες συσκευές laser παράγουν ακτινοβολία υπό μορφή:

- **συνεχούς δέσμης** (continuous wave, cw) (Εικόνα 2.2)
- **μεμονωμένων ή επαναλαμβανόμενων παλμών βραχείας διάρκειας** (*pulsed*).

**Εικόνα 2.2:** Μορφές της παραγόμενης ακτινοβολίας laser. Η κλίμακα κάθε διαγράμματος υποδηλώνεται από τις μονάδες μέτρησης της ισχύος και του χρόνου.

Το εμβαδόν της χρωματισμένης περιοχής εκφράζει το ποσό ενέργειας που μεταφέρεται με την δέσμη σε δεδομένο χρονικό διάστημα



Πηγή: Gutknecht, 1999

Η δημιουργία παλμών είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω. Στα laser συνεχούς δέσμης (cw), παλμοί μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση ηλεκτρονικά ελεγχόμενου ηλεκτρο-οπτικού ή ηχο-οπτικού φράγματος στην έξοδο της δέσμης, του οποίου η ταχύτητα και διάρκεια λειτουργίας μπορεί θεωρητικά να είναι μικρότερη από 1 msec (chopped mode), όμως η διαδικασία αυτή δεν παράγει αληθείς παλμούς, καθ' ότι η μέγιστη ισχύς παραμένει ίδια με την ισχύ σε συνεχή λειτουργία

ενώ η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται στον ιστό-στόχο σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι μικρότερη (Εικόνα 2.2.β).

Βραχείς παλμοί διάρκειας ορισμένων μπορούν να παραχθούν με παλμική λειτουργία της αντλίας. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη ισχύς κάθε παλμού είναι πολύ υψηλή (της τάξης των KW) (Εικόνα 2.2.γ). Ακόμη, πολύ βραχείας διάρκειας παλμοί, της τάξης των nsec, παράγονται με την τεχνική «μεταγωγής του παράγοντα  $Q$  ( $Q$ -switching)», με τη βοήθεια ηλεκτρονικά ελεγχόμενων διατάξεων που παρεμβάλλονται μεταξύ του ενός κατόπτρου της συσκευής και του ενεργού μέσου. Λόγω της βραχύτατης διάρκειας των παλμών, η μέγιστη ισχύς μπορεί να είναι της τάξης των MW ή και GW (Εικόνα 2.2.δ).

Μετά την παραγωγή τους, οι παλμοί μπορούν να τροποποιηθούν περαιτέρω με τη βοήθεια ειδικών τεχνικών, όπως κλείδωμα των ρυθμών (mode-locking), συγχρονισμένη άντληση (synchronous pumping) και συμπίεση παλμών (pulse compression), ώστε να βελτιωθεί η μονοχρωματικότητα της δέσμης, να αυξηθεί η μέγιστη ισχύς ή να ελαττωθεί η διάρκεια των παλμών.

Τα πιο ουσιώδη χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας laser είναι η πυκνότητα ισχύος (power density or irradiance,  $\text{Watt}/\text{cm}^2$ ) και η πυκνότητα ενέργειας (energy density or fluence,  $\text{Joule}/\text{cm}^2$ ). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά σε συνάρτηση με το χρόνο εφαρμογής της δέσμης (sec), την έκταση της ακτινοβολούμενης επιφάνειας ( $\text{mm}^2$ ), τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων παλμών αν πρόκειται για παλμικό laser [ενέργεια παλμού (mJoule), χρόνος παλμού (msec,  $\mu\text{sec}$  ή nsec), συχνότητα παλμών (Hz), μέση ισχύς (Watt)], τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δέσμης, καθώς και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (nm), περιγράφουν τη λειτουργία της συσκευής και καθορίζουν την αποτελεσματικότητά της και την καταλληλότητα για συγκεκριμένες εφαρμογές. Έτσι, από τη σκοπιά της φυσικής γίνεται φανερό ότι η ονομαστική (μέση) ισχύς μίας συσκευής (Watt), που είναι συνήθως το μόνο τεχνικό χαρακτηριστικό που αναφέρεται από τους εμπορικούς αντιπροσώπους των εταιρειών, δεν μπορεί από μόνη της να περιγράψει τα πραγματικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της συσκευής και να καθορίσει την καταλληλότητά της για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Από τη συσκευή ως το σημείο εφαρμογής, η ακτινοβολία laser μεταφέρεται:

- **Με οπτικές ίνες:** παρέχουν ευελιξία αλλά προς το παρόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ακτινοβολίες με μήκος κύματος έως 3000nm.
- **Με αρθρωτούς βραχίονες με κάτοπτρα:** έχουν πολύ μικρές απώλειες, μπορούν να μεταφέρουν ακτινοβολία οποιουδήποτε μήκους κύματος, αλλά δεν είναι ευέλικτοι και απαιτούν προσοχή στην χρήση λόγω ευαισθησίας σε μικρές παρεκκλίσεις των κατόπτρων.
- **Με κοίλους μεταλλικούς κυματοαγωγούς:** έχουν μεγάλες απώλειες ενέργειας, περιορισμένη ευελιξία, δεν επιτρέπουν την άριστη εστίαση της δέσμης και κατασκευάζονται για συγκεκριμένο μήκος κύματος.
- **Απευθείας,** όπως στα laser ημιαγωγών (Gutknecht, 1999).

Με βάση τον τρόπο λειτουργίας:

- **συνεχές** (continuous wave, cw)
- **παλμικό** (pulsed)

Με βάση την ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ταξινομούνται σε:

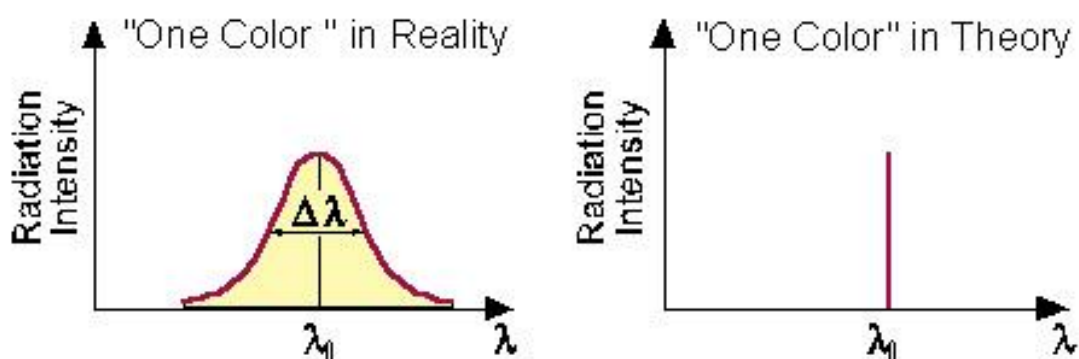
- **Τάξη I:** Ισχύς < 0,4 μW, ακίνδυνο
- **Τάξη II:** 0,4 < Ισχύς < 1 mW, CW, ορατή ακτινοβολία, ακίνδυνο για στιγμιαία άμεση έκθεση 0,25s
- **Τάξη IIIa:** 1 < Ισχύς < 5 mW, CW, ορατή ακτινοβολία, ακίνδυνο για στιγμιαία άμεση έκθεση 0,25s
- **Τάξη IIIb:** 5 < Ισχύς < 500 mW, CW, καμιά άμεση έκθεση
- **Τάξη IV:** CW με Ισχύς > 500 mW, παλμικά, ιδιαίτερα επικίνδυνα (Μπενής, 2011).

## 2.2 Βασικές ιδιότητες της ακτινοβολίας laser

- **Μονοχρωματικότητα**

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας καλύπτει μία εξαιρετικά στενή περιοχή (τυπικά  $\ll 1\text{nm}$ ) και όχι ένα ευρύ φάσμα, όπως το φως που παράγεται από έναν κοινό λαμπτήρα πυρακτώσεως. Έτσι, η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι συγκεντρωμένη σε μία πολύ μικρή περιοχή συχνοτήτων και με αυτό τον τρόπο μπορούμε να προβλέψουμε με ακρίβεια την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας laser με την ύλη.

**Εικόνα 2.3:** Η πραγματική διασπορά της τιμής του  $\lambda$  (αριστερά) σε σχέση με τη θεωρητική (δεξιά)

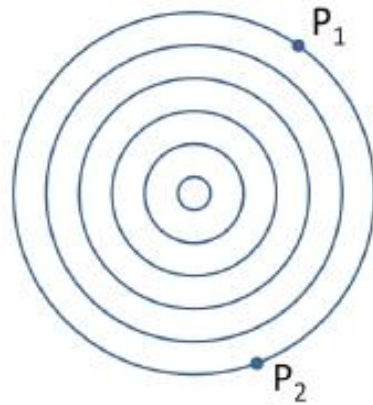


Πηγή: Μπενής, 2013

- **Συμφωνία**

Τα φωτόνια που αποτελούν την ακτινοβολία laser βρίσκονται σε χωρική και χρονική συμφωνία μεταξύ τους. Η ιδιότητα αυτή προκύπτει από την διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής και της οπτικής ενίσχυσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας είναι η εύκολη εστίαση της δέσμης με τη βοήθεια ενός φακού σε μια κουκίδα (spot) πολύ μικρού εμβαδού, που θεωρητικά μπορεί να έχει διάμετρο ίση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

**Εικόνα 2.4:** Μέτωπα σφαιρικών επίπεδων κυμάτων



Πηγή: Μπενής, 2013

**Χωρική συμφωνία:** Έστω δύο σημεία P<sub>1</sub> και P<sub>2</sub> στο χώρο που την χρονική στιγμή  $t = 0$  βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο ενός ΗΜ κύματος, κι έστω  $E_1(t)$  και  $E_2(t)$  τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία (εικόνα 2.4). Εξ' ορισμού η διαφορά φάσης των δύο σημείων είναι μηδέν.

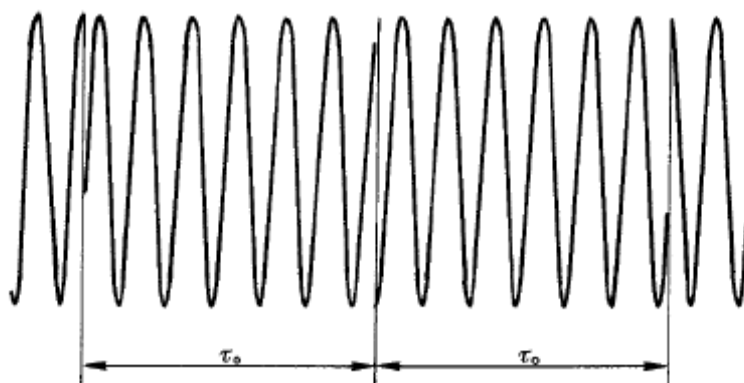
1. Εάν η διαφορά φάσης των δύο σημείων παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή  $t > 0$  τότε λέμε πως υπάρχει *τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων*.
2. Εάν η διαφορά φάσης δύο οποιονδήποτε σημείων του μετώπου κύματος παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή  $t > 0$  τότε λέμε πως υπάρχει *τέλεια χωρική συμφωνία* (perfect spatial coherence).
3. Στην πράξη για να συμβαίνει το b τα σημεία P<sub>1</sub> και P<sub>2</sub> πρέπει να βρίσκονται «σχετικά κοντά» και τότε μιλάμε για *μερική χωρική συμφωνία* (partial spatial coherence). Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να ορίσουμε την επιφάνεια συμφωνίας και το χαρακτηριστικό μήκος συμφωνίας που αντιστοιχεί στην επιφάνεια αυτή.



**Χρονική συμφωνία:** Έστω ηλεκτρικό πεδίο ΗΜ κύματος  $E(t)$  σε σταθερό σημείο στο χώρο.

1. Εάν για δεδομένη χρονική καθυστέρηση  $\tau_0$  η διαφορά φάσης μεταξύ  $E(t)$  και  $E(t + \tau_0)$  παραμένει σταθερή για κάθε  $t$ , τότε λέμε πως έχουμε χρονική συμφωνία για το διάστημα  $\tau_0$  (*μερική χρονική συμφωνία* – partial temporal coherence). Ο χρόνος  $\tau_0$  λέγεται χρόνος συμφωνίας. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στην εικόνα 2.5.
2. Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε  $\tau_0$  τότε λέμε πως έχουν *τέλεια χρονική συμφωνία* (perfect temporal coherence).

**Εικόνα 2.5:** Παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας με χρόνο συμφωνίας  $\tau_0$



Πηγή: Μπενής, 2013

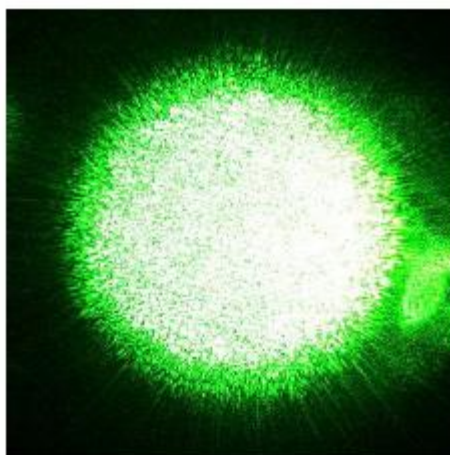
Από την εικόνα 2.5 φαίνεται πως η χρονική συμφωνία και η μονοχρωματικότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Μάλιστα θα δείξουμε ότι για στάσιμα ΗΜ κύματα με χρόνο συμφωνίας  $\tau_0$  το εύρος συχνοτήτων  $\Delta\nu$  δίνεται από τη σχέση  $\Delta\nu = 1/\tau_0$ .

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως η χρονική και χωρική συμφωνία είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Το ηλεκτρικό πεδίο της εικόνας 8, θα μπορούσε να περιγράψει το πεδίο σε δυο σημεία του μετώπου του κύματος τα οποία να έχουν

τέλεια χωρική συμφωνία ενώ για το κάθε σημείο υπάρχει μόνο μερική χρονική συμφωνία.

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφέρουμε μια πολύ γνωστή ιδιότητα των δεσμών laser που είναι αποτέλεσμα της χωροχρονικής συμφωνίας. Πρόκειται για την λεγόμενη κοκκίωση (speckle) η οποία παρατηρείται όταν ανακλάται μια δέσμη laser από μια μη λεία επιφάνεια. Η ανάκλασή της (παρατηρούμενη βέβαια σε γωνία διαφορετική αυτής της γωνίας πρόσπτωσης) παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6.

**Εικόνα 2.6:** Κοκκίωση δέσμης laser



Πηγή: Μπενής, 2013

Η κοκκίωση είναι αποτέλεσμα της συμβολής πολλών κυμάτων ίδιας συχνότητας διαφορετικών όμως πλατών και φάσεων. Έτσι όταν μια μη λεία επιφάνεια φωτίζεται από μια δέσμη laser κάθε σημείο της γίνεται δευτερεύουσα πηγή κυμάτων και η συμβολή τους σε μακρινή απόσταση θα αποτελείται από τα κύματα όλων των σημείων. Επομένως όταν η επιφάνεια δεν είναι λεία τα επί μέρους κύματα θα διαφέρουν τόσο σε φάση όσο και σε πλάτος με αποτέλεσμα η ένταση της συμβολής να παρουσιάζει μια τυχαία τοπική αυξομείωση που είναι ακριβώς το φαινόμενο της κοκκίωσης (Μπενής, 2013).

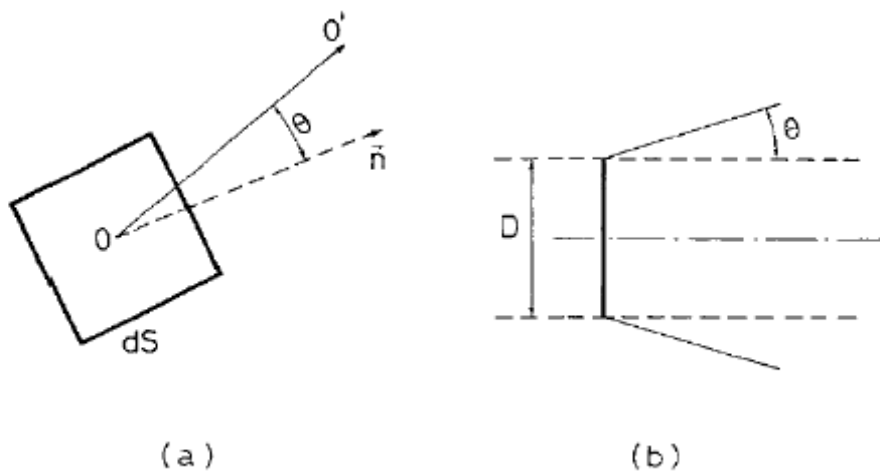
- **Μεγάλη λαμπρότητα**

Το laser είναι μια πολύ ισχυρή πηγή φωτός και εκπέμπει πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας (ενεργειακή πυκνότητα,  $\text{Joule}/\text{cm}^2$ ). Αναφέρεται ότι ένα laser He-Ne ισχύος  $1\text{mW}$  εμφανίζει λαμπρότητα περίπου 10-50 φορές μεγαλύτερη από τον Ήλιο. Η ιδιότητα αυτή προκύπτει από την συμφωνία της δέσμης.

**Εικόνα 2.7:** Λαμπρότητα

2.7.α. Λαμπρότητα πηγής ΗΜ κυμάτων στο σημείο  $O$ .

2.7.β. Λαμπρότητα δέσμης laser διαμέτρου  $D$  και γωνιακής απόκλισης  $\theta$ .



Πηγή: Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004

- **Κατευθυντικότητα**

Η δέσμη στην πορεία της αποκλίνει πολύ λίγο από την παραλληλότητα. Τυπικά, για να ανοίξει η διάμετρος της δέσμης κατά  $1\text{m}$  πρέπει η δέσμη να διανύσει  $1\text{km}$ . Έτσι, η δέσμη διατηρεί την λαμπρότητά της, ακόμα και σε μεγάλη απόσταση από την πηγή. Και η ιδιότητα αυτή προκύπτει από τη συμφωνία της δέσμης (Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004).

## Κεφάλαιο 3:

### Επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς

Η δράση των laser είναι αποτέλεσμα της μετατροπής της παρεχόμενης φωτεινής ενέργειας, μετά την απορρόφησή της από τους ιστούς, σε θερμική, μηχανική ή χημική ενέργεια. Πρόκειται για σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται:

- από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας και των χρησιμοποιούμενων συσκευών: μήκος κύματος, ισχύς εξόδου, διάρκεια παλμού, μέγεθος δέσμης και
- από τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες του ιστού.

Η φωτεινή ενέργεια μετριέται σε Joules (J) και είναι ανάλογη της ποσότητας φωτονίων που περιέχονται στη δέσμη. Το μήκος κύματος της ακτίνας laser εξαρτάται από το ενεργό υλικό που διεγείρεται και επηρεάζει τον βαθμό απορρόφησης και σκέδασης εντός των ιστών. Στο ορατό τμήμα του H/M φάσματος το βάθος διείσδυσης στο δέρμα αυξάνει παράλληλα με την αύξηση του μήκους κύματος, ενώ ελαττώνεται στο υπέρυθρο τμήμα. Κάθε συσκευή laser χαρακτηρίζεται από την ισχύ εξόδου, δηλαδή από το ποσό ενέργειας το οποίο απελευθερώνεται στη μονάδα του χρόνου. Εκφράζεται σε Watts (W), όπου: 1 Watt = 1 Joule/sec.

Για την κατανόηση και εκτίμηση του βαθμού των βιολογικών μεταβολών στο δέρμα από την παρεχόμενη ποσότητα φωτός χρησιμοποιούνται οι όροι πυκνότητα ισχύος και πυκνότητα ενέργειας. Η πυκνότητα ισχύος περιγράφει την ένταση της δέσμης ανά μονάδα επιφανείας και προσδιορίζει το ρυθμό της ιστικής καταστροφής. Εκφράζεται σε W/cm<sup>2</sup> και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Πυκνότητα ισχύος } \left(\frac{W}{\text{cm}^2}\right) = \frac{\text{ισχύς εξόδου (W)} * 100 \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{cm}^2}\right)}{\pi * r^2(\text{mm}^2)}$$

Όσο αυξάνεται η ισχύς εξόδου του laser (με σταθερή την ακτινοβολούμενη επιφάνεια), τόσο αυξάνεται και η καταστροφή των ιστών. Η πυκνότητα ενέργειας εκφράζει τη συνολική ποσότητα ενέργειας, η οποία παρέχεται από τη φωτεινή δέσμη ανά μονάδα επιφανείας της ενεργού διατομής. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{πυκνότητα ενέργειας (j/cm}^2\text{)} =$$
$$\text{πυκνότητα ισχύος (J/cm}^2\text{/sec)} \times \text{χρόνο έκθεσης (sec)}$$

Είναι προφανές ότι η ακτινοβόληση μιας περιοχής προκαλεί διαφορετικά αποτελέσματα, μεταβαλλόμενου του χρόνου ακτινοβόλησης.

Η ισχύς της δέσμης laser δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια του στόχου. Με τον όρο εγκάρσια ηλεκτρομαγνητική διαμόρφωση (transverse electromagnetic mode-TEM) περιγράφεται η κατανομή της ισχύος της δέσμης στην περιοχή της εστίας. Η TEM00 αντιστοιχεί σε μια κυκλική εγκάρσια διατομή της δέσμης, όπου το 86% της ισχύος ευρίσκεται στο κέντρο της με προοδευτική εξασθένηση προς την περιφέρεια (κωδωνοειδής κατανομή).

Οι συσκευές laser εκπέμπουν την δέσμη φωτός συνεχώς ή σε ανεξάρτητους παλμούς μικρής διάρκειας, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται περίοδος ηρεμίας. Τα laser συνεχούς ροής χαρακτηρίζονται από χαμηλή ισχύ και αυξημένο κίνδυνο ανεξέλεγκτης καταστροφής των ιστών. Στα παλμικά laser παρέχονται υψηλά ποσά ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο καλείται εύρος παλμού, παρέχεται δε η δυνατότητα μεταβολής του, ανάλογα με το μέγεθός του θεραπευομένου στόχου. Ο όρος Q-switching αναφέρεται σε έναν ηλεκτρο-οπτικό διακόπτη εντός της οπτικής κοιλότητας ο οποίος επιτρέπει την απελευθέρωση όλης της ενέργειας που συσσωρεύεται σε αυτή, σε ένα σύντομο, υψηλής έντασης παλμό.

### 3.1 Ιδιότητες του δέρματος

Όταν το φως προσπέσει στην επιφάνεια του δέρματος, ακολουθεί συνδυασμός των φαινομένων της ανάκλασης, απορρόφησης, σκέδασης (διάχυσης) και μετάδοσης αυτού. Σύμφωνα με το νόμο Grothus-Draper, το φως δρα στους ιστούς μόνον όταν απορροφηθεί. Το δέρμα δεν αποτελεί ομοιογενές υλικό. Για πρακτικούς λόγους, θεωρούμε ότι συνίσταται:

- από την κεράτινη στιβάδα με την υπόλοιπη επιδερμίδα και
- από το χόριο, με διαφορετικές οπτικές ιδιότητες μεταξύ τους (ανακλαστικότητα και συντελεστές σκέδασης ή απορρόφησης του φωτός).

Όταν μια δέσμη ακτινοβολίας laser προσπέσει σε έναν ιστό λαμβάνουν χώρα τέσσερις διαφορετικές διαδικασίες:

- **Ανάκλαση**

Το φως μπορεί να ανακλαστεί από διάφορα στοιχεία του δέρματος χωρίς καμία κλινική επίδραση. Η επιδερμίδα είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό ανάκλασης από το δέρμα. Υπολογίζεται ότι ανακλάται το 5-10% του προσπίπτοντος φωτός.

- **Απορρόφηση από μόρια του ιστού**

Απορρόφηση καλείται η διαδικασία πρόσληψης της φωτεινής ενέργειας και η μετατροπή της σε άλλη μορφή ενέργειας εντός των ιστών, ώστε να επέλθουν βιολογικές μεταβολές. Επιτελείται από ορισμένες ενδογενείς ή εξωγενείς ουσίες του δέρματος που καλούνται χρωμοφόρα. Διακρίνονται σε ενδογενή: αιμοσφαιρίνη, μελανίνη και νερό ενδοκυττάριο ή εξω-κυττάριο και εξωγενή: χρωστικές των tattoo.

Ο συντελεστής απορρόφησης ( $\text{cm}^{-1}$ ) διαφέρει μεταξύ των χρωμοφόρων για τις επί μέρους ακτινοβολίες του Η/Μ φάσματος. Η μελανίνη εμφανίζει ευρύ φάσμα απορρόφησης (400 ως 750 nm), που ελαττώνεται όσο αυξάνει το μήκος κύματος της

ακτινοβολίας. Η οξυαιμοσφαιρίνη απορροφά, έντονα, ακτινοβολία μήκους κύματος 418 nm και ασθενέστερα ακτινοβολία με μήκη κύματος 548 nm και 577 nm. Το νερό απορροφά φωτεινή ενέργεια που περιέχεται στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Το βάθος διείσδυσης των ακτινών laser εξαρτάται από τον βαθμό απορρόφησης και σκέδασης τους. Η δράση στους ιστούς είναι αποτέλεσμα της μετατροπής της απορροφηθείσας φωτεινής ενέργειας σε θερμική, μηχανική ή χημική ενέργεια.

- **Διάχυση ή σκέδαση, δηλαδή μεταβολή της κατεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς τυχαίες διευθύνσεις λόγω πρόσκρουσης σε μόρια του ιστού**

Το φως διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις, μακριά από τον αρχικό του στόχο. Οι ίνες του κολλαγόνου είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο ποσοστό διάχυσης. Η διάχυση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Η διάχυση, όμως, προς τα πίσω μπορεί ουσιαστικά να αυξήσει την ένταση της δέσμης μέσα στους ιστούς. Η σκέδαση μειώνεται όσο αυξάνει το μήκος κύματος.

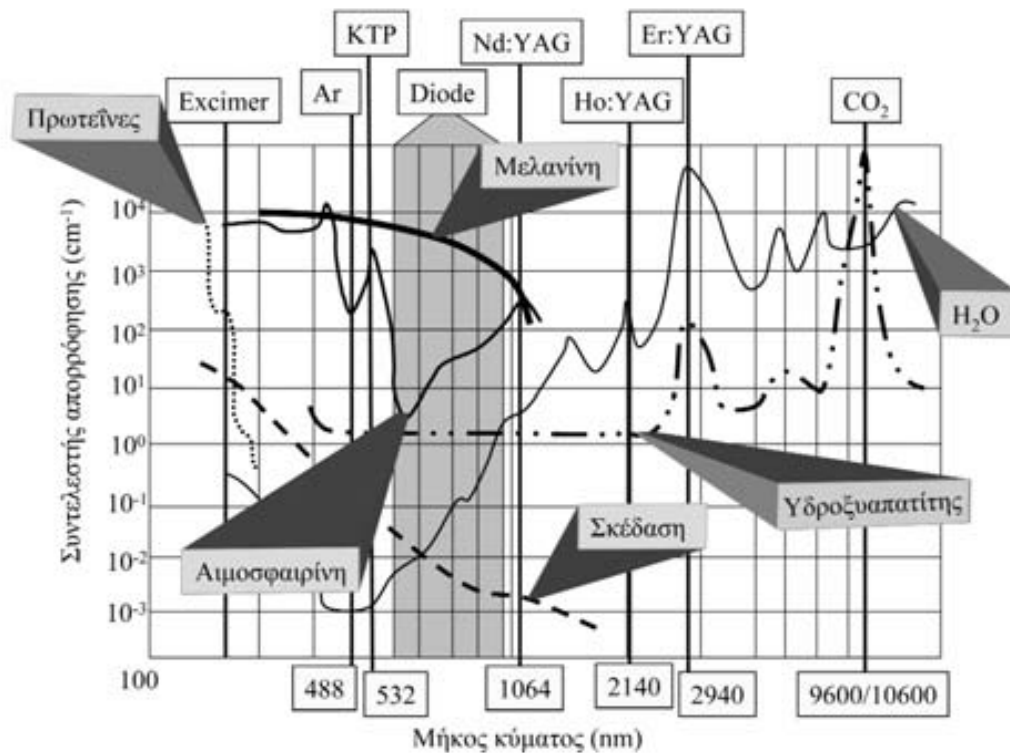
- **Διάδοση δια μέσω του ιστού, που αφορά το ποσό της ακτινοβολίας που δεν υπόκειται στις παραπάνω διαδικασίες**

Το φως διέρχεται μέσα από τον ιστό-στόχο, π.χ. το χόριο, χωρίς κλινικό αποτέλεσμα.

Οι βιολογικές επιδράσεις της ακτινοβολίας laser προέρχονται σχεδόν αποκλειστικά από το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από τον ιστό και μεταβάλλει την ενεργειακή του κατάσταση. Το ποσό αυτό εξαρτάται κυρίως από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και την σύσταση του ιστού. Διαφορετικά μόρια και ιστικές δομές απορροφούν ακτινοβολία διαφορετικού μήκους κύματος.

Έτσι, παρατηρείται η επιλεκτική απορρόφηση μιας δέσμης με δεδομένο μήκος κύματος από ορισμένα μόρια. Σε παρατεταμένη επίδραση της ακτινοβολίας προκαλείται αλλαγή των χαρακτηριστικών του ιστού, οπότε η απορρόφηση καθίσταται μη προβλέψιμη. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας laser ανάλογα με το μήκος κύματος και για διάφορες βιολογικές ουσίες παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1.

**Εικόνα 3.1:** Η απορρόφηση της ακτινοβολίας Laser σε σχέση με το μήκος κύματος, για διάφορες βιολογικές ουσίες (Gutknecht,1999)



Πηγή: Gutknecht,1999

Υψηλή απορρόφηση από έναν ιστό σημαίνει συγκέντρωση της ενέργειας στα επιφανειακά στρώματα του ιστού (μικρή διεισδυτικότητα), άρα και μεγάλη άνοδο της θερμοκρασίας σε αυτά τα στρώματα. Σε μικρότερο βαθμό προκαλούνται επιδράσεις και από το ποσό της ακτινοβολίας που υφίσταται σκέδαση.



### 3.2 Φαινόμενα που προκαλεί η ακτινοβολία laser στους ιστούς

Η ακτινοβολία laser προκαλεί διάφορα φαινόμενα όταν απορροφάται από κάποιο ιστό. Στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ομοφωνία ως προς την ονοματολογία, την κατάταξη και τις ακριβείς φυσικές και βιολογικές διαδικασίες που εμπλέκονται στην γένεση αυτών των φαινομένων. Τα αποτελέσματα της επίδρασης ακτινοβολίας laser σε έναν ιστό εξαρτώνται γενικά από τα χαρακτηριστικά της δέσμης (μήκος κύματος, πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, συνεχής ή παλμική λειτουργία, συχνότητα και εύρος παλμών, γεωμετρικά χαρακτηριστικά) και από την σύσταση του ιστού (Πίνακας 3.1).

**Πίνακας 3.1:** Φαινόμενα κατά την επίδραση της ακτινοβολίας laser στους ιστούς

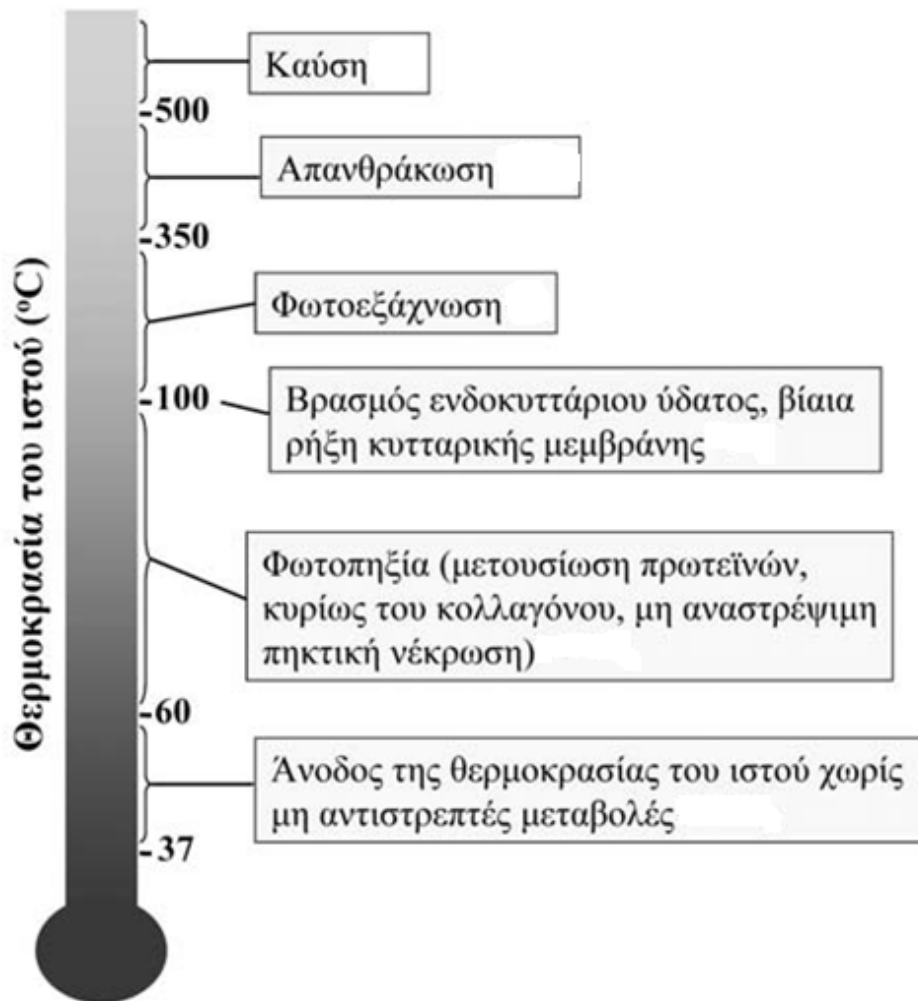
Θερμικά φαινόμενα	Μη θερμικά φαινόμενα
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Φωτοπηξία (photocoagulation) - μετουσίωση πρωτεϊνών</li> <li>· Φωτοεξάτμιση (photovaporization) - τοπική εξάχνωση του ιστού</li> </ul>	<p><u>Φωτοχημικά φαινόμενα</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Πρόκληση ή κατάλυση χημικών αντιδράσεων</li> <li>· Δημιουργία ιόντων</li> <li>· Δημιουργία ελευθέρων ριζών - πιθανή κυτταροτοξική δράση .</li> </ul>
	<p><u>Φωτομηχανικά φαινόμενα</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Δημιουργία θερμοκρουστικού ή φωτο-ακουστικού κύματος λόγω:</li> <li>· δημιουργίας πλάσματος στον ιστό και κατάρρευσης του</li> <li>· θερμικής διαστολής ενός τμήματος του ιστού και βίαιης αύξησης του όγκου του</li> </ul>

Πηγή: Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004

Από το κυανό άκρο του ορατού προς μικρότερα μήκη κύματος, τα αποτελέσματα στους ιστούς είναι κυρίως, φωτοχημικά. Η ενέργεια των φωτονίων επαρκεί για να προκαλέσει χημικές μεταβολές άμεσα. Έτσι, απορροφάται από τα μόρια και προκαλεί την διέγερση των μοριακών και ατομικών δεσμών ή σε πολλές περιπτώσεις, την διάσπασή τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται και ιονισμός ατόμων η μορίων, ενώ φωτοχημικά είναι και τα αποτελέσματα της φωτοδυναμικής θεραπείας (Photo-Dynamic Therapy, PDT), όπου χρησιμοποιούνται laser χαμηλής ενέργειας για τη διέγερση της ιστικής επούλωσης και την ενεργοποίηση του ανοσοποιητικού συστήματος, αν και δε υπάρχει ομοφωνία ως προς την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Κατά την πρόκληση φωτοχημικών φαινομένων είναι πιθανή και η δημιουργία ελευθέρων ριζών.

Από το ερυθρό άκρο του ορατού προς μεγαλύτερα μήκη κύματος η ενέργεια των φωτονίων δεν επαρκεί για την άμεση πρόκληση χημικών μεταβολών και έτσι, τα αποτελέσματα είναι κυρίως θερμικά, εξαρτώμενα σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των φωτονίων που πλήττουν τον ιστό-στόχο. Τα θερμικά φαινόμενα οφείλονται στη μετατροπή μεγάλου μέρους της φωτεινής ενέργειας σε θερμότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του ιστού και την επακόλουθη εμφάνιση μεταβολών (Εικόνα 3.2).

Εικόνα 3.2: Μεταβολές των ιστών από την επίδραση της θερμότητας



Πηγή: Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004

Παράλληλα, συμβαίνει και αγωγή της θερμότητας προς τους παρακείμενους ιστούς.

Όταν το ποσό της ενέργειας που μεταβιβάζεται στον ιστό είναι σχετικά μικρό, ο ιστός υφίσταται κυρίως φωτοπηξία, δηλαδή μετουσίωση των πρωτεϊνών (κολλαγόνο, ένζυμα κ.α.). Η κατάσταση αυτή διαφέρει σαφώς από το έγκαυμα. Με την επίδραση μεγαλύτερου ποσού ενέργειας, το ενδοκυττάριο και εξωκυττάριο υγρό εξατμίζεται ταχύτατα και ο ιστός υφίσταται φωτοεξάχνωση (photovaporization).

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι αν χρησιμοποιηθεί ακτινοβολία με τη μορφή παλμών βραχείας διάρκειας και υψηλής ισχύος, το αποτέλεσμα είναι φωτοεξάχνωση του ιστού στο σημείο πρόπτωσης της ακτινοβολίας χωρίς να παρατηρούνται σημαντικές θερμικές επιδράσεις στους παρακείμενους ιστούς. Η εντοπισμένη αυτή επίδραση εξαρτάται από την ικανότητα ψύξης των ιστών αυτών αλλά και την ύπαρξη ικανού χρονικού διαστήματος ηρεμίας μεταξύ των παλμών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε τομή των ιστών.

Κατά την επίδραση δέσμης laser υψηλής ενέργειας κατά εξαιρετικά βραχείς παλμούς σε έναν ιστό, είναι δυνατό να προκληθούν και φωτομηχανικά φαινόμενα. Η συγκέντρωση υψηλής ενέργειας σε μικρό όγκο ιστού έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας παροδικής κατάστασης πλάσματος (οπτικό πλάσμα, optical plasma) στο μικρό αυτό τμήμα του ιστού. Κατά την κατάρρευση του πλάσματος παράγεται θερμοκρουστικό κύμα που μπορεί να καταστρέψει μηχανικά τους εγγύς ιστούς (photodisruption). Ακόμη, εξαιτίας της θερμικής διαστολής ενός τμήματος του ιστού και της ταχείας αύξησης του όγκου του, μπορεί να παραχθεί φωτο-ακουστικό κύμα με παρόμοια αποτελέσματα.

Τα παραπάνω φαινόμενα δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Κατά την επίδραση της ακτινοβολίας laser σε έναν ιστό, φωτοθερμικά, φωτοχημικά και φωτομηχανικά φαινόμενα συμβαίνουν συγχρόνως και συχνά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Με την μεσολάβηση φωτοθερμικών, φωτομηχανικών ή και φωτοχημικών φαινομένων είναι δυνατόν να επιτευχθεί διαστρωματική αφαίρεση (ablation) ενός ιστού. Κατά τη διαδικασία αυτή, έντονη απορρόφηση της ακτινοβολίας laser από έναν ιστό έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση της ενέργειας στην επιφανειακή, κάθε φορά, στοιβάδα αυτού και την απόσπασή της. Έτσι, επιτυγχάνεται σταδιακή αφαίρεση τμημάτων του ιστού (Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004).

### 3.3 Θερμική επίδραση

Το βιολογικό αποτέλεσμα της θερμικής ενέργειας στους ιστούς καθορίζεται από το ύψος της θερμοκρασίας που θα επιτευχθεί και τη διάρκεια της ακτινοβολήσης. Αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5-10°C (υψηλότερα από τη θερμοκρασία των 37°C του σώματος) προκαλεί βλάβες στα κύτταρα, κατ' αρχάς αντιστρεπτές. Στη θερμοκρασία των 60°C μετουσιώνονται οι πρωτεΐνες και στους 70°C το DNA (διαδικασία της πήξης). Στους 100°C το ενδοκυττάριο νερό φθάνει στο σημείο βρασμού και μετατρέπεται σε ατμό. Η ατμοποίηση αυξάνει υπερβολικά τον όγκο του κυττάρου και αναπτύσσει τρομερές δυνάμεις στο κυτταρικό τοίχωμα, με συνέπεια την καταστροφή του με τη μορφή έκρηξης. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αποξήρανση και απανθράκωση.

#### 3.3.1 Εκλεκτική φωτο-θερμόλυση

Οι Anderson και Parrish προσέδωσαν σημαντική ώθηση στην θεραπευτική δράση των Laser με την διατύπωση της θεωρίας της εκλεκτικής φωτοθερμόλυσης, στην οποία περιγράφουν την ελεγχόμενη καταστροφή (destruction) της ανεπιθύμητης βλάβης, όταν αυτή ταυτίζεται με το χρωμοφόρο, χωρίς σημαντικές επιπτώσεις (damage) στους περιβάλλοντες ιστούς, όταν:

- επιλέγεται μήκος κύματος που απορροφάται προνομιακά από το χρωμοφόρο σε σύγκριση με τους περιβάλλοντες ιστούς,
- παρέχεται ικανή ποσότητα ενέργειας, ώστε να μεταβληθεί η θερμική κατάσταση του στόχου, και
- η διάρκεια της παροχής ενέργειας (ακτινοβολήσης) είναι μικρότερη του χρόνου θερμικής χαλάρωσης (TRT) του χρωμοφόρου (Buratto, Ferrari, Rama, 1992).

Χρόνος θερμικής χαλάρωσης (TRT) καλείται το απαιτούμενο χρονικό

διάστημα για τον υποδιπλασιασμό της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στον στόχο μετά την πρόσληψη της φωτεινής ενέργειας.

Εξαρτάται από το μέγεθος του στόχου (πίνακας 3.2). Αν ο χρόνος ακτινοβολήσης είναι  $\leq$  του TRT, τότε η παραγόμενη θερμική ενέργεια παραμένει εντός του στόχου και δεν διαχέεται στο περιβάλλον του.

**Πίνακας 3.2:** Χρόνος θερμικής χαλάρωσης (TRT) των κυριότερων στόχων

Στόχος	Μέγεθος ( $\mu\text{m}$ )	TRT
Σωματίδια χρωστικής	0,5 - 4	10 ns
Μελανοσωμάτιο	0,5 - 1	1 $\mu\text{s}$
Ερυθροκύτταρο	7	2 $\mu\text{s}$
Αγγείο	50	1 ms
Αγγείο	100	5 ms
Τριχικός θύλακος	200	10-100 ms

Πηγή: Μπούσαλης, 2013

### 3.3.2 Επέκταση της εκλεκτικής φωτο-θερμόλυσης

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρωμοφόρο και στόχος δεν ταυτίζονται, όπως στην φωτο-αποτρίχωση, όπου η καταστροφή της μελανίνης (χρωμοφόρο) δεν αρκεί για την ημι-μόνιμη απομάκρυνση της τρίχας (στόχος). Για να επιτευχθεί το επιθυμητό κλινικό αποτέλεσμα, το εύρος παλμού του κατάλληλου laser πρέπει να είναι αφ' ενός μεγαλύτερο του TRT της μελανίνης, ώστε εκτός της άμεσης θερμικής καταστροφής του χρωμοφόρου να επέλθει καταστροφή και των υπολοίπων τμημάτων της τρίχας, μέσω της θερμικής διάχυσης, αφ' ετέρου μικρότερο κάποιας κριτικής τιμής ώστε να

μην επηρεαστούν οι περιβάλλοντες ιστοί. Ο αναγκαίος χρόνος καλείται χρόνος θερμικής καταστροφής (επέκταση της θεωρίας της εκλεκτικής φωτο-θερμόλυσης) (Μπούσαλης, 2013).

### **3.3.3 Κλασματική φωτο-θερμόλυση**

Η θεωρία της κλασματικής φωτο-θερμόλυσης (ΚΦ) (Fractional photothermolysis), διατυπώθηκε από τους Manstein και συν. το 2004. Στην προτεινόμενη τεχνική η φωτεινή ακτίνα διαχωρίζεται σε μικρότερες μεταβαλλόμενες δέσμες που προκαλούν θερμική βλάβη με την δημιουργία τρισδιάστατων ζωνών (microscopic treatment zones MTZ), χωρίς την πρόκληση φλεγμονής ή νέκρωσης, ενώ το περιβάλλον παραμένει ανέπαφο. Τα άθικτα κύτταρα γύρω από τους προσβεβλημένους ιστούς αποτελούν την δεξαμενή για την ταχεία αποκατάσταση του κατεστραμμένου δέρματος.

Το νερό αποτελεί το χρωμοφόρο στόχο, στην διαδικασία της ΚΦ. Ανάλογα με τον συντελεστή απορρόφησης της παραγόμενης ακτινοβολίας από το νερό, η κλασματική φωτο-θερμόλυση διακρίνεται σε: αφαιρετική (ablative): laser μήκους κύματος με ισχυρή απορρόφηση από το νερό (2.790 nm YSGG, 2.940 nm Er: YAG & 10.600 nm CO<sub>2</sub>) προκαλούν εξάχνωση και άμεση απομάκρυνση του ιστού και μη αφαιρετική (non ablative): laser με μήκος κύματος μικρότερης απορροφητικότητας από το νερό (1.410 nm, 1.440 nm, 1.540 nm, 1.550 nm και 1.927 nm) θερμαίνουν και προκαλούν πήξη του ιστού, ενώ η επιφάνεια του δέρματος παραμένει άθικτη (Krueger, Potvin, 2012).

### **3.4 Φωτομηχανική δράση**

Η ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί στην δημιουργία ακουστικών κυμάτων που προκαλούν τον σχηματισμό κενотоπίων εντός του κυττάρου και την καταστροφή του. Η περιγραφείσα διαδικασία επιτυγχάνεται με τη συγκέντρωση όλης της ενέργειας σε ένα ισχυρό παλμό, διάρκειας της τάξεως των nanoseconds (Q-switched laser) και επιτελείται με μηχανικό τρόπο.

### **3.5 Φωτοχημική δράση**

Ο συνδυασμός της τοπικής εφαρμογής φωτο-ευαισθητοποιών ουσιών (5-aminolevulinic acid: ALA ή ο εστέρας methyl 5-aminolevulinate: MAL) και φωτός από διάφορες πηγές (μπλε και κόκκινο διοδικό φως, παλμικό laser χρωστικής ή έντονο παλμικό φως) καλείται φωτο-δυναμική θεραπεία που παράγει διεγερμένο μονήρες οξυγόνο και προκαλεί καταστροφή των κυτταρικών μεμβρανών (Κωστάκης, Δρεκόλια, Παναγιώτη, Λάριος, 2013).



## Κεφάλαιο 4:

### Κίνδυνοι και προστασία από την ακτινοβολία laser

Οι ιδιότητες που καθιστούν την ακτινοβολία laser τόσο χρήσιμη είναι και εκείνες που επιφέρουν τα επιβλαβή αποτελέσματά της. Οι παράγοντες που συντελούν στην πρόκληση αυτών των βλαβών είναι κυρίως:

- Ελαττωματικές συσκευές laser.
- Έλλειψη προστατευτικών μέτρων.
- Λάθη κατά την χρήση των συσκευών.

Η έκταση της θερμικής βλάβης σε έναν ιστό εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της δέσμης, όσο και από τα χαρακτηριστικά του ιστού (οπτικές ιδιότητες του ιστού, δυνατότητα απαγωγής θερμότητας, π.χ. μέσω των αγγείων). Τα πιο ευάλωτα όργανα στην ακτινοβολία laser είναι οι οφθαλμοί και, δευτερευόντως, το δέρμα.

Βλάβη στο κεντρικό βοθρίο της ωχρής κηλίδας του αμφιβληστροειδή, που είναι υπεύθυνο για την κεντρική όραση, μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια αυτής. Βλάβη στο περιφερικό τμήμα του αμφιβληστροειδή είναι συνήθως, κλινικά, μη σημαντική.

Η εξασθένηση και η μετάδοση της ακτινοβολίας laser μέσω του οφθαλμού όπως και το τμήμα του οφθαλμού που κινδυνεύει από υπερ-έκθεση εξαρτώνται από το μήκος κύματος.

Ακτινοβολίες της περιοχής του μέσου (IRB) και άπω (IRC) υπερύθρου (1400nm - 1nm) και του μέσου υπεριώδους (UVB, 180nm - 315nm) επηρεάζουν τον κερατοειδή χιτώνα.

Ακτινοβολίες του εγγύς υπεριώδους (UVA, 315nm - 400nm) απορροφώνται και επιδρούν κυρίως στον φακό του οφθαλμού, ενώ η περιοχή του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου (IRA) (400nm - 1400nm) είναι ιδιαίτερος επικίνδυνη, γιατί η ακτινοβολία διαπερνά τον κερατοειδή και τον φακό και εστιάζεται στον αμφι-

βληστροειδή.

Είναι χαρακτηριστικό το ότι τα βλέφαρα δεν παρέχουν προστασία στους οφθαλμούς. Ιδιαίτερα επικίνδυνες είναι οι συσκευές που εκπέμπουν αόρατη δέσμη. Επίδραση ακτινοβολίας laser σε ακάλυπτο δέρμα μπορεί να έχει, επίσης, σοβαρές συνέπειες, όπως επώδυνα εγκαύματα. Παρόλα αυτά, απαιτούνται γενικά υψηλότερα επίπεδα ενέργειας και τα αποτελέσματα είναι πιο ήπια.

Η μέγιστη επιτρεπτή έκθεση (Maximum Permissible Exposure, MPE) καθορίζεται ως το όριο της ακτινοβολίας laser στο οποίο μπορεί να εκτεθεί κάποιο άτομο υπό φυσιολογικές συνθήκες, χωρίς να υποστεί βλαπτικό αποτέλεσμα. Τα επίπεδα MPE ορίζονται ξεχωριστά για τους οφθαλμούς και το δέρμα (πίνακας 4.1). Εξαρτώνται από το μήκος κύματος, τη διάρκεια εκπομπής και, για μήκος κύματος 400-1400nm, από το εμβαδόν της ακτινοβολούμενης επιφάνειας στον αμφιβληστροειδή. Για την καλύτερη οργάνωση των μέτρων ασφαλείας οι συσκευές laser χωρίζονται σε τάξεις, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους (πίνακας 4.2) (Μπουτσιούκης, Παντελίδου, Μπουτσιούκης, 2004).

Αναφορικά με τις πιθανές βλαπτικές επιδράσεις της ακτινοβολίας laser, υποστηρίζεται ακόμη ότι οι σχηματιζόμενες ελεύθερες ρίζες μπορούν να έχουν καρκινογόνο δράση, χωρίς όμως να υπάρχουν σαφείς ενδείξεις για καρκινογόνο δράση στους ιστούς με τα σημερινά πειραματικά δεδομένα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στον τρόπο χρήσης των συσκευών laser στην ιατρική (Μπενής, 2011).

**Πίνακας 4.1:** Μεγίστη επιτρεπτή έκθεση (Maximum Permissible Exposure, MPE) για Nd:YAG Laser

Χρόνος (sec)	Έκθεση οφθαλμών MPE (Watt/m <sup>2</sup> )	Έκθεση μη προστατευόμενου δέρματος MPE (Wat/m <sup>2</sup> )
0,25	127	31000
1	90	11000
5	60	3200
10	50	2000

Πηγή: Μπενής, 2011

**Πίνακας 4.2:** Βασικές αρχές της Διεθνούς Ταξινόμησης (ANSI) των συσκευών laser, ανάλογα με τον κίνδυνο για πρόκληση βλαβών στους οφθαλμούς και το δέρμα

Τάξη	Χαρακτηριστικά	Κίνδυνοι
1	συσκευές πολύ χαμηλής ισχύος (<0,4 mW), συνεχούς εκπομπής στο ορατό φάσμα (400-700 nm)	· τελείως ακίνδυνη, θεωρητικά
2	συσκευές ορατής δέσμης με μέγιστη ισχύ 1 mW	· επικίνδυνη για τους οφθαλμούς σε παρατεταμένη έκθεση · να αποφεύγεται έκθεση ακόμα και σε ανακλώμενη δέσμη

3A	συσκευές ορατής δέσμης με ισχύ 1-5 mW	<ul style="list-style-type: none"> <li>• επικίνδυνη για τους οφθαλμούς, ακόμη και σε στιγμιαία έκθεση</li> </ul>
3B	συσκευές ορατής ή αόρατης δέσμης, με μέγιστη ισχύ της τάξης των 0,5 W	<ul style="list-style-type: none"> <li>• πιο επικίνδυνα από τα laser τάξης 3<sup>A</sup></li> <li>• κίνδυνος για βλάβες των οφθαλμών από ανακλάσεις και για καταστροφή του δέρματος</li> <li>• απαιτείται ειδική διαρρύθμιση του χώρου</li> </ul>
4	συσκευές υψηλής ισχύος (>0,5 W σε συνεχή λειτουργία)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ακόμα και διάχυτες ανακλάσεις προκαλούν βλάβες</li> </ul>

Πηγή: Μπενής, 2011

Ακτινοβολίες laser στην περιοχή του υπεριώδους (π.χ. excimer) και των ακτινών X θεωρούνται γενικά επικίνδυνες και στις βιολογικές τους επιδράσεις περιλαμβάνεται πιθανώς και η καρκινογένεση. Παρόλα αυτά, laser διηγευμένων διμερών (excimer) χαμηλής συχνότητας, σχετικά ακίνδυνα, χρησιμοποιούνται στην ιατρική σε απόλυτα εξειδικευμένες εφαρμογές λόγω ορισμένων μοναδικών ιδιοτήτων τους. Ακτινοβολία στην περιοχή του ορατού και του υπέρυθρου δεν είναι ιοντίζουσα και δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής ενδείξεις ότι αποτελεί κίνδυνο για το έμβρυο (Ψαρράκος, 1997).

Επίσης, οι ατμοί που παράγονται κατά την εξάχνωση των ιστών είναι πιθανό να περιέχουν ενώσεις ερεθιστικές για το αναπνευστικό σύστημα, ακόμα και καρκινογόνες ουσίες καθώς και σωματίδια μικροοργανισμών και υπολείμματα ιστών. Έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία η απομόνωση ακέραιων ιών του ανθρώπινου θηλώματος (HPV), καθώς και ιών HIV.

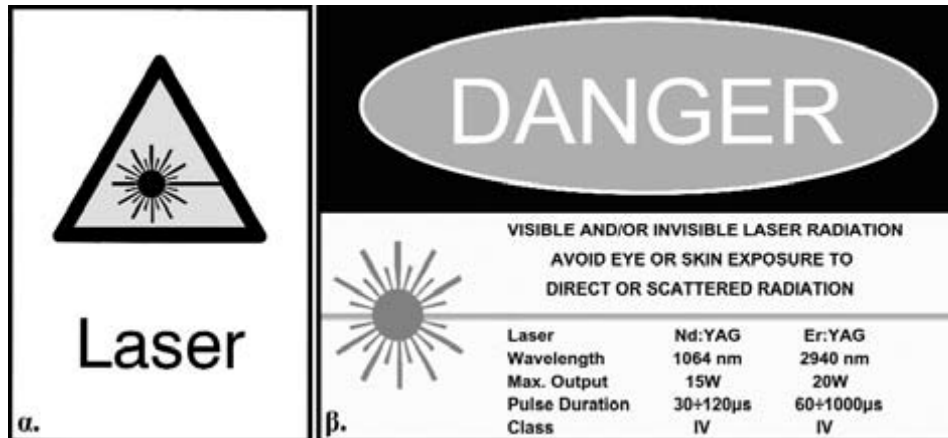
Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η συσκευή laser λειτουργεί με ηλεκτρική ενέργεια υψηλής τάσης. Έτσι, ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας σε περίπτωση λανθασμένης χρήσης ή απόπειρας επισκευής από μη εξειδικευμένο προσωπικό είναι υπαρκτός.

Βασικό μέτρο ασφαλείας για την προστασία των οφθαλμών από τυχαία επαφή με την δέσμη είναι η υποχρεωτική χρήση ειδικών απορροφητικών γυαλιών (κατάλληλων για το μήκος κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας laser) από όσα άτομα βρίσκονται στο χώρο όπου λειτουργεί η συσκευή laser, δεδομένου ότι τυχαία επαφή με τη δέσμη μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες ακόμη και σε μεγάλη απόσταση από την συσκευή. Ακόμη όμως και με τη χρήση των παραπάνω γυαλιών, πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά η εσκεμμένη έκθεση των οφθαλμών στην δέσμη της ακτινοβολίας, έστω και από συσκευή τάξης.

Επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας (υποχρεωτικά για συσκευές τάξης 3B και άνω) περιλαμβάνουν ειδική σήμανση του χώρου όπου λειτουργεί η συσκευή (Εικόνα 4.1.α) αλλά και της συσκευής (Εικόνα 4.1.β), περιορισμό της πρόσβασης άλλων ατόμων πέραν του ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού στο χώρο, αναρρόφηση του παραγόμενου καπνού, χρήση ειδικών χειρουργικών масκών με δυνατότητα φιλτραρίσματος ανώτερη από αυτή των κοινών, απομάκρυνση των εύφλεκτων υλικών και ειδική διαρρύθμιση του χώρου, ώστε να αποκλείεται η έξοδος της δέσμης από κάποιο παράθυρο ή η ανάκλαση σε κάποια στιλπνή επιφάνεια (Μπουτσιούκης Παντελίδου Μπουτσιούκης. 2004).

**Εικόνα 4.1.α.:** Ειδικά σήμα που τοποθετείται στην είσοδο χώρων όπου λειτουργούν συσκευές laser.

4.1.β. Ειδικό σήμα που τοποθετείται στο περίβλημα συσκευών laser.



Πηγή: Μπενής, 2011

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο όρος laser αποτελεί ακρωνύμιο των αγγλικών λέξεων Light Amplification through the Stimulated Emission of Radiation και περιγράφει την φυσική διαδικασία της ενίσχυσης του φωτός και στηρίζεται στο έργο του Einstein: "The Quantum Theory of Radiation" που εισήγαγε την έννοια της εξαναγκασμένης εκπομπής της ακτινοβολίας. Στην ελληνική γλώσσα αποδίδεται ως: «*Ενίσχυση του φωτός από εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας*».

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελεί ενιαίο και συνεχές φάσμα που εκτείνεται από τις μικρού μήκους κύματος κοσμικές ακτίνες, gamma και X- ακτίνες, το υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο φως, τα μικροκύματα ως τα μεγάλου μήκους ραδιοκύματα στο άλλο άκρο. Το φως εμφανίζει διττή φύση. Αφ' ενός θεωρείται κύμα (κυματική θεωρία) που χαρακτηρίζεται από το μήκος κύματος και τη συχνότητα του, αφ' ετέρου αποτελείται από δέσμη φωτονίων, σωματιδίων με ασήμαντη μάζα, που μεταφέρουν την ενέργεια (σωματιδιακή θεωρία).

Μήκος κύματος καλείται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλάδων. Μετριέται σε υποδιαιρέσεις του μέτρου. Στο ορατό φως (400-700 nm) το μήκος κύματος προσδιορίζει το χρώμα της ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, δηλαδή του αριθμού των κυμάτων που διέρχονται από ένα δεδομένο σημείο ανά δευτερόλεπτο. Ακτινοβολίες με μικρό μήκος κύματος έχουν μεγάλη συχνότητα, με αποτέλεσμα την παροχή μεγάλης ποσότητας ενέργειας.

Η ενέργεια που μεταφέρεται με το Laser απορροφάται από το όργανο-στόχο και μετατρέπεται σε θερμότητα. Η σημαντική αυτή ιδιότητα των Laser έχει χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανία, στις μεταφορές, στην πολεμική βιομηχανία και στην Ιατρική.

Η βασική επίδραση της ακτινοβολίας Laser στον ανθρώπινο ιστό και ο βαθμός απορρόφησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των κυριοτέρων είναι:

- το είδος του ιστού και η περιεκτικότητά του σε νερό, αίμα, χρωστική κ.λπ.
- ο χρόνος έκθεσης στο Laser
- το μήκος κύματος της δέσμης Laser (σε nm)
- η ισχύς της δέσμης Laser (σε Watt).



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βικιπαίδεια, <http://en.wikipedia.org/wiki/Laser>

Buratto, L. Ferrari, M. Rama, P. (1992) Excimer laser intrastromal keratomileusis. *Am J Ophthalmol*, **113**, 291 - 295.

Einstein, A. (1917) Zur quanten theorie der stralung. *Phys Zeit*, **18**, 121.

Gordon, JP. Zeigler, HJ. Townes, CH. (1955) The maser – new type of amplifier, frequency standard and spectrometer. *Physiol Rev*, **99**, 1264.

Gutknecht, N. (1999) Lasertherapie in der zahnarztlichen praxis. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, 11-60.

Κατσικαλάκη, Αικ. (2013) *Βιβλιογραφική Ανασκόπηση: femtosecond laser εφαρμογές στη διαθλαστική χειρουργική*. Μεταπτυχιακή Εργασία. Πανεπιστήμιο Κρήτης Οπτικής και Όρασης

Κωστάκης, Π. Δρεκόλια, Ε. Παναγιώτη, Δ. Λάριος, Γ. (2013) Laser εφαρμογές στη δερματολογία. Ανασκόπηση. *Ελληνική Επιθεώρηση Δερμ. Αφρ.*, **24**(3), 153-162.

Krueger, RR. Potvin, R. (2012) Flap Technology Review – The Case for Femtosecond Laser Flaps in Laser In Situ Keratomileusis. *US Ophthalmic Review*, **5**(1), 18 - 21.

Μπενής, Μ. (2013) Εισαγωγικές Έννοιες. Σημειώσεις μαθήματος Φυσική των Laser, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής, Κεφάλαιο 1, σελ 06 - 21. Διαθέσιμο μέσω διαδικτύου: [http://www.physics.uoi.gr/atomol/index\\_files/LASER-ALL.pdf](http://www.physics.uoi.gr/atomol/index_files/LASER-ALL.pdf)

Μπενής, Μ. (2011) Κατηγορίες Laser – κίνδυνοι και προστασία. Σημειώσεις μαθήματος Φυσική των Laser, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Φυσικής, Κεφάλαιο 2, σελ 19 - 27. Διαθέσιμο μέσω διαδικτύου: [http://www.physics.uoi.gr/atomol/index\\_files/LASER-ALL.pdf](http://www.physics.uoi.gr/atomol/index_files/LASER-ALL.pdf)

Μήτσου, Γ. (2007) Γενικές ιδιότητες των Laser - Σύγκριση με συμβατικές πηγές φωτός. Σημειώσεις εργαστηρίου Γεωμετρικής Οπτικής, ΤΕΙ Αθήνας, Τμήμα Οπτικής και Οπτομετρίας. Διαθέσιμο μέσω διαδικτύου: [http://physics.teiath.gr/physics/opto\\_lab/pdf%20files/LASER%201.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/opto_lab/pdf%20files/LASER%201.pdf)

Μπούσαλης, Π. (2013) Femtosecond Laser. Διαθέσιμο μέσω διαδικτύου:  
<http://www.bousalis.gr/femtosecond-laser.html>

Μπουτσιούκης, Χ. Παντελίδου, Ο. Μπουτσιούκης, Α. (2004) Laser: Αρχές λειτουργίας, αλληλεπίδραση με τους ιστούς, κίνδυνοι και ασφάλεια κατά τη χρήση τους. *Στόμα*, **32**, 99 - 109.

Maiman, TH. (1960) Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, **187**, 493-4.

Rullière, C. (2004) *Femtosecond Laser Pulses: Principles and Experiments*, Springer.

Schawlow, AL. Townes, CH. (1958) Infrared and optical red maser. *Physiol Rev*, **112**, 1940.

Ψαρράκος, Κ. (1997) Ιατρική Φυσική. Τόμος Α. 3<sup>η</sup> έκδοση. Θεσσαλονίκη: University studio press, 17-28