



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΛΕΤΗ & ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΟΤΥΠΟΥ LASER ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΑΝΤΛΟΥΜΕΝΟΥ ΑΠΟ LED ΙΣΧΥΟΣ»

*Project name : «Study and Development of a solid-state laser prototype
pumped by power- LEDs»*

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ : ΜΙΚΡΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Περίληψη - Σκοπός ανάπτυξης του θέματος | 4 |
| 2. | Εισαγωγή | 6 |
| | 2.1 Γενικά για το Laser | 6 |
| | 2.1.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ΗΜΑ)..... | 7 |
| | 2.1.2 Αυθόρμητη εκπομπή ΗΜΑ – φωτονίων..... | 8 |
| | 2.1.3 Αντιστροφή Πληθυσμού | 9 |
| | 2.1.4 Εξαναγκασμένη Εκπομπή | 10 |
| | 2.1.5 Ενίσχυση | 11 |
| | 2.2 Είδη Laser | 12 |
| | 2.3 Χαρακτηριστική ιδιότητα Laser | 13 |
| | 2.3.1 Μονοχρωματικότητα..... | 13 |
| | 2.3.2 Συμφασικότητα | 14 |
| | 2.3.3 Κατευθυντικότητα | 14 |
| | 2.3.4 Πυκνότητα Ενέργειας | 16 |
| | 2.4 Laser τεσσάρων επιπέδων | 17 |
| | 2.5 Η διάταξη του συστήματος παραγωγής | 18 |
| | 2.5.1 Το ενεργό υλικό | 19 |
| | 2.5.2 Μηχανισμός Διέγερσης | 19 |
| | 2.5.3 Μηχανισμός Ανάδρασης | 20 |
| | 2.5.4 Σύζευξη εξόδου (Ο συγχρονισμός στην έξοδο) | 21 |
| | 2.6 Οπτική κοιλότητα (οπτικό αντηχείο) και μορφή της ακτινοβολίας | 21 |
| | 2.6.1 Laser Modes | 21 |
| | 2.6.2 Μήκος Οπτικής Κοιλότητας | 24 |
| | 2.7 Κατώφλι ενίσχυσης | 25 |
| | 2.8 Φθορισμός | 26 |
| | 2.9 Ενίσχυση | 27 |
| 3. | Ενεργό υλικό Nd:Yag | 29 |
| 4. | Σύστημα Άντλησης | 32 |
| | 4.1 Δίοδος Εκπομπής Φωτός (Led) | 32 |
| | 4.1.1 Βασικές Αρχές | 32 |
| | 4.1.2 Τρόπος λειτουργίας και δομή | 33 |
| | 4.2 Βιβλιογραφικές Συγκρίσεις Led με άλλες πηγές | 35 |
| 5. | Σύστημα Ψύξης | 39 |
| 6. | Καθρέφτες - Αντηχείο | 40 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 7. | Θεωρητική μελέτη λειτουργίας του Laser στερεάς κατάστασης αντλούμενου από Led ισχύος | 42 |
| 7.1 | Μελέτη θερμού λευκού φωτός | 46 |
| 7.2 | Μελέτη φυσικού λευκού φωτός | 48 |
| 7.3 | Μελέτη ψυχρού λευκού φωτός | 49 |
| 7.4 | Κβαντική Απόδοση | 51 |
| 8. | Επιλογή Καταλληλότερου Led | 54 |
| 8.1 | Διαθέσιμα Led | 54 |
| 8.1.1 | Φασματοφωτόμετρο και Φάσμα απορρόφησης..... | 57 |
| 8.2 | Μετρήσεις - Πειράματα..... | 57 |
| 8.2.1 | Πειράματα και αποτελέσματα | 59 |
| 8.3 | Συμπεράσματα μετρήσεων Led ισχύος | 62 |
| 8.4 | Μετρήσεις - Πειράματα κοντινής απόστασης..... | 63 |
| 8.4.1 | Έλεγχος εστίασης | 64 |
| 9. | Φθορισμός και Μετρήσεις | 65 |
| 9.1 | Επιλογή Led μέσω φθορισμού..... | 66 |
| 9.2 | Συμπεράσματα για τα Led..... | 67 |
| 9.3 | Θεωρητικός Υπολογισμός Απώλειας Ενέργειας..... | 69 |
| 10. | Υλικά και κατασκευές | 70 |
| 10.1 | Επιλογή τροφοδοτικού | 73 |
| 10.2 | Διάταξη Άντλησης Laser | 75 |
| 11. | Αναφορές και συγκρίσεις με άλλες έρευνες παγκοσμίως | 76 |
| 11.1 | Σύγκριση του λείζερ αντλούμενου από LED με λείζερ από λαμπτήρες πυρακτώσεως | 76 |
| 11.2 | Λείζερ αντλούμενα από LED παγκοσμίως | 79 |
| 12. | Συμπεράσματα & Προοπτικές | 82 |
| 13. | Βιβλιογραφία - Πηγές | 85 |

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ - ΣΚΟΠΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός solid-state κρυσταλλικού laser Νεοδυμίου (Nd:YAG), με καινοτόμο πηγή οπτικής άντλησης. Συγκεκριμένα, η πηγή ενεργειακής διέγερσης του laser αποτελείται από συστοιχίες διόδων εκπομπής λευκού φωτός (LED) σε μορφή chip "βαττικής" ισχύος και υψηλής απόδοσης, όπως για παράδειγμα τα εμπορικά-διαθέσιμα LED που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις φωτισμού, όπως λαμπτήρες, φακούς, προβολείς, ταινίες. Σε σύγκριση με τις καθιερωμένες πηγές οπτικής άντλησης laser, οι πηγές φωτός LED πλεονεκτούν σε πολλά σημεία, εκτός του σημαντικά χαμηλού κόστους. Συγκεκριμένα, χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής, μεγάλη οπτική απόδοση και κατευθυντικότητα εκπομπής φωτός αλλά παράλληλα απαιτούν μόνο χαμηλές ασφαλείς τάσεις τροφοδοσίας, παραμέτρους δηλ. που τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για το σκοπούμενο σύστημα στο εργαστηριακό και εκπαιδευτικό περιβάλλον.

Για τον σκοπό της επιτυχούς σχεδίασης και ανάπτυξης του υπ' όψη συστήματος laser, προηγείται στην παρούσα εργασία μία θεωρητική μελέτη ενεργειακής μεταφοράς και μετατροπής, που λαμβάνει υπόψη την πυκνότητα πρόσμιξης Νεοδυμίου στον κρύσταλλο YAG, την μορφή και τις διαστάσεις του ενεργού υλικού, την χωρική διάταξη των πηγών άντλησης και την γωνιακή κατανομή των κώνων εκπομπής τους, την αλληλο-επικάλυψη των φασμάτων της εκπομπής των LED και της απορρόφησης του ενεργού υλικού Nd:YAG, των σχετικών ενεργειών ζωνών άντλησης και ζωνών εκπομπής, της κβαντικής απόδοσης του ιόντος Nd³⁺, καθώς και των τυπικών ενεργειακών κατωφλίων ταλάντωσης αντίστοιχων "κλασσικών" συστημάτων laser. Η μελέτη αυτή αφορά την εκτίμηση της εφικτότητας της επιτυχούς υλοποίησης και λειτουργίας του σκοπούμενου συστήματος, της προδιαγραφής των απαραίτητων οπτικών στοιχείων, καθώς και της πρόβλεψης αναγκαίων μέτρων μετέπειτα βελτίωσης του σχεδιασμού και της αποδοτικότητάς του. Ιδιαίτερως η μελέτη προσδιορίζει το καταλληλότερο είδος LED άντλησης από άποψη φασματικής εκπομπής, πυκνότητας οπτικής ισχύος, χωρικού προφίλ εκπομπής κλπ. Σχεδιάζεται επίσης η μορφή του οπτικού αντηχείου, με τις απαραίτητες μεταλλικές βάσεις και οπτο-μηχανικά στηρίγματα(κινηματικά ή σταθερά), λαμβάνοντας υπόψη και την διαθεσιμότητα οπτικών υλικών και στοιχείων, όπως για παράδειγμα καθρεπτών laser και ράβδων (κρυστάλλων) Nd:YAG στο εργαστήριο Laser του ΗΜΜΥ. Διερευνάται κατόπιν το θέμα της κατάλληλης ηλεκτρικής τροφοδοσίας των πηγών άντλησης LED, ως προς τις παραμέτρους ρεύματος, τάσης, ισχύος και χρονικής διαμόρφωσης (συνεχούς ή παλμικής). Ακολουθεί η κατασκευή των επιμερους διατάξεων και η αντίστοιχη πρακτική-πειραματική μελέτη, με μετρήσεις και λειτουργικές δοκιμές, αρχικά σε επίπεδο υπο-συστημάτων και κατόπιν σε ολοκληρωμένη οπτο-ηλεκτρονική διάταξη laser.

Συμπερασματικά, με την χρήση υλικών και τεχνολογιών που κρατούν το κόστος χαμηλό (εξαιρουμένου πιθανόν του κρυστάλλου και καθρεπτών) και με πλήρη έλεγχο και γνώση των οπτικών και οπτοηλεκτρονικών υπο-συστημάτων και μεθόδων, προχωρήσαμε στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πρωτοτύπου με μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα για εκπαιδευτική επίδειξη και εργαστηριακή έρευνα σε μεγάλη ποικιλία επιθυμητών πιλοτικών εφαρμογών.

The purpose of this work is the development of a solid-state crystal Neodymium (Nd:YAG) laser, with an innovative optical pumping source. In particular, the source of energy excitation of the laser consists of arrays of white light emitting diodes (LED) in the form of "watt" power and high efficiency chips, such as, for example, the commercially available LEDs used in lighting devices, such as lamps, flashlights, projectors, movies. Compared to conventional laser optical pumping sources, LED light sources have several advantages, apart from their significantly lower cost. In particular, they are characterized by a long lifetime, high optical performance and directivity of light emission, but at the same time they only require low safe supply voltages, i.e. parameters that make them particularly attractive for the intended system in the laboratory and educational environment.

For the purpose of the successful design and development of the laser system in question, this work is preceded by a theoretical study of energy transfer and conversion, which takes into account the density of Neodymium impurity in the YAG crystal, the form and dimensions of the active material, the spatial arrangement of the pumping sources and the angular distribution of their emission cones, the overlap of the LED emission and absorption spectra of the Nd:YAG active material, the relative energies of pumping and emission bands, the quantum efficiency of the Nd³⁺ ion, as well as the typical energy oscillation thresholds of corresponding "classical" laser systems. This study concerns the assessment of the feasibility of the successful implementation and operation of the intended system, the specification of the necessary visual elements, as well as the prediction of necessary measures to subsequently improve the design and its efficiency. In particular, the study determines the most suitable type of pumping LED in terms of spectral emission, optical power density, spatial emission profile, etc. The form of the optical resonator is also designed, with the necessary metal bases and opto-mechanical supports (kinetic or fixed) . The topic of the appropriate electrical supply of LED pumping sources is then investigated, in terms of current, voltage, power and time modulation (continuous or pulsed) parameters. This is followed by the construction of the individual devices and the corresponding practical-experimental study, with measurements and functional tests, initially at the level of sub-systems and then in a complete opto-electronic laser device.

In conclusion, with the use of materials and technologies that keep costs low (except possibly for crystal and mirrors) and with full control and knowledge of optical and optoelectronic sub-systems and methods, we proceeded to develop an integrated prototype with great flexibility and adaptability for educational demonstration and laboratory research in a wide variety of desirable pilot applications.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

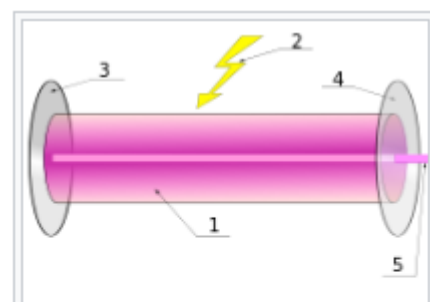
2.1 Γενικά για το Laser

Ο όρος λέιζερ προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο LASER: (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) που αποδίδεται στα ελληνικά ως *ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας* και καλύπτει τόσο τις συσκευές που την παράγουν όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία. Τα λέιζερ παράγουν συμφασικό, μονοχρωματικό φως (δηλαδή φως με συγκεκριμένο μήκος κύματος-χρώμα), το οποίο διαδίδεται σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση, σχηματίζοντας στενές δέσμες. Αντίθετα, οι συνηθισμένες πηγές φωτός, όπως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, παράγουν μη-σύμφωνο φως προς όλες τις διευθύνσεις και, επιπλέον, έχουν μεγάλο φασματικό εύρος.

Η λειτουργία των λέιζερ ερμηνεύεται από τη θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής. Πολλά υλικά με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά έχουν βρεθεί για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των λέιζερ, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών τύπων λέιζερ με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η εφεύρεση των λέιζερ στηρίχθηκε στην κατασκευή των μείζερ στη δεκαετία του 1950. Το πρώτο λέιζερ κατασκευάστηκε το 1960, από τότε όμως τα λέιζερ βρήκαν εφαρμογή στις θετικές επιστήμες, στη βιομηχανία, στην ιατρική, και στην ηλεκτρονική.

Αρχή λειτουργίας

Τα λέιζερ αποτελούνται από το ενεργό υλικό και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Συνήθως είναι υλικό με συγκεκριμένο μέγεθος, σύσταση, καθαρότητα και μορφή, που παράγει φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής. Το ενεργό υλικό αντλεί ενέργεια από μία εξωτερική πηγή, όπως η λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή λέιζερ. Η ενέργεια που απορροφάται αποτίθεται στα σωματίδια του ενεργού υλικού, έτσι ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μία διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Όταν ο αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στη διεγερμένη κατάσταση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων που βρίσκεται στη βασική κατάσταση, επιτυγχάνεται αντιστροφή πληθυσμού. Τότε μία δέσμη φωτός που περνάει μέσα από το υλικό έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσει σε



Αρχή λειτουργίας του λέιζερ:
 1. Ενεργό υλικό του λέιζερ
 2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης
 3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο
 4. Διάταξη εξόδου δέσμης
 5. Δέσμη Λέιζερ

εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από ό,τι σε εξαναγκασμένη απορρόφηση, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ενίσχυση της δέσμης.

2.1.1 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 ΟΧΥΖ με τρόπο ώστε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα να διαδίδεται κατά μήκος του άξονα ΟΧ, τότε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα ταλαντώνονται στα επίπεδα ΟΧΥ και ΟΧΖ 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

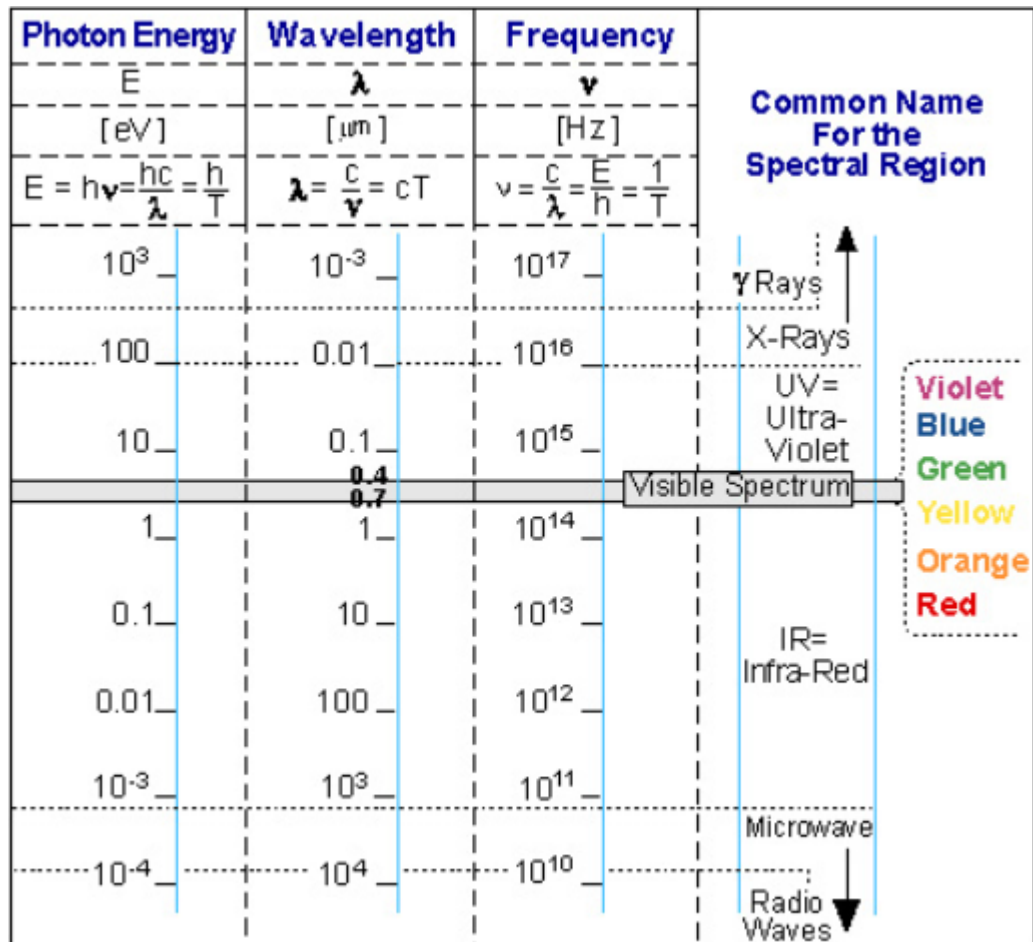
h η σταθερά του Planck

ν η συχνότητα ταλάντωσης, με $\nu = c / \lambda$

c η ταχύτητα διάδοσης

λ το μήκος κύματος

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.



Σχήμα 1 : Η αλληλοσυσχέτιση του μήκους κύματος, ενέργεια φωτονίων, συχνότητα.

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 μόνο από το μέσο διαδοσης της (κενό ή ύλη).

2.1.2 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).

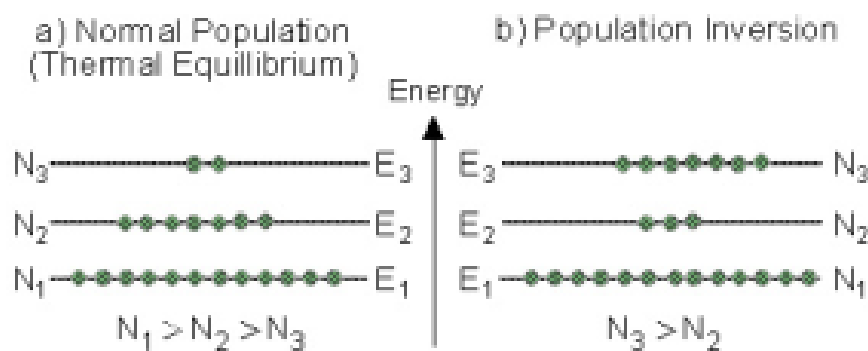
Η αυθόρμητη εκπομπή ανήκει σε μια ομάδα διεργασιών που καλούνται διεργασίες χαλάρωσης (relaxation processes), μέσω των οποίων ομάδα διεγερμένων ατόμων επιστρέφει σε ισορροπία (θεμελιώδης κατάσταση). Η κλασική θεωρία προϋποθέτει

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).

2.1.3 Αντιστροφή Πληθυσμού

Όταν ένας αρκετά μεγάλος πληθυσμός ηλεκτρονίων βρεθεί σε ψηλά ενεργειακά επίπεδα, τότε η κατάσταση αυτή ονομάζεται "αντιστροφή πληθυσμού", και θέτει τις βάσεις για την εξαναγκασμένη εκπομπή πολλαπλών φωτονίων. Αυτή είναι η προϋπόθεση για την ενίσχυση φωτός που εμφανίζεται σ' ένα λέιζερ, και δεδομένου ότι η εκπομπή φωτονίων έχει ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα και η σχέση φάσης μεταξύ τους, το φως έχει υψηλό βαθμό συνοχής.

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.

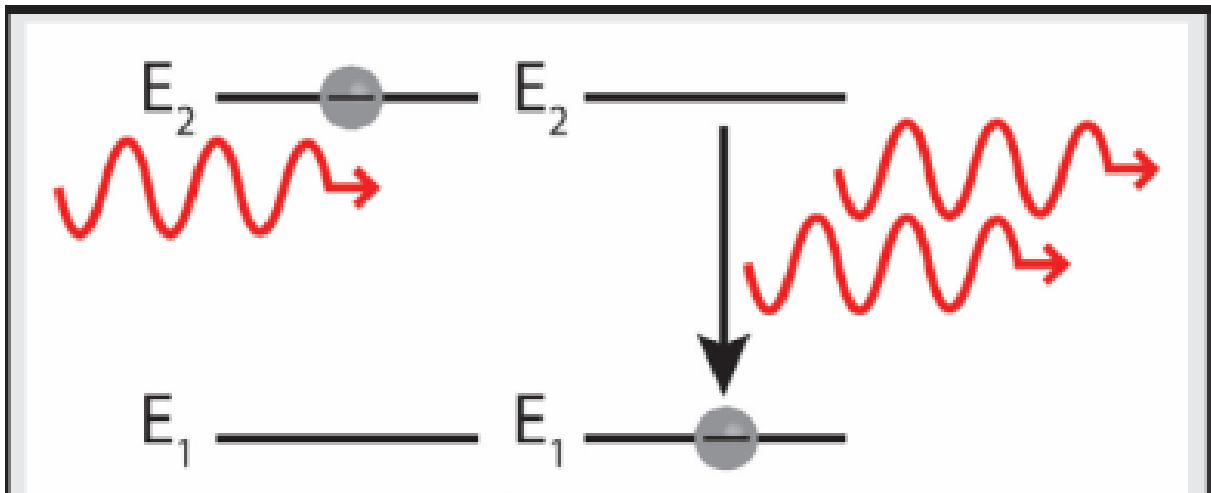


Σχήμα 2 : Αντιστροφή πληθυσμού

Η αντιστροφή πληθυσμών είναι μια από τις προ-απαιτούμενες καταστάσεις για τη δημιουργία της ΗΜΑ Laser. Η αύξηση του αριθμού των διεγερμένων ατόμων καλείται άντληση (pumping) και αν γίνει με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καλείται οπτική άντληση

2.1.4 Εξαναγκασμένη Εκπομπή

Ένα άτομο μπορεί να διεγερθεί από χαμηλότερο σε υψηλότερο επίπεδο ενέργειας απορροφώντας ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ των ενεργειών δύο επιπέδων. Τελικά, το άτομο θα επιστρέψει σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας εκπέμποντας ένα φωτόνιο σε μια γνωστή διαδικασία αυθόρμητη εκπομπή. Επιπλέον, η κατεύθυνση του εκπεμπόμενου φωτονίου είναι επίσης τυχαία. Τα άτομα μπορούν επίσης να μεταβούν σε χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή.



Σχήμα 3 : Εξαναγκασμένη εκπομπή

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 $4 \rightarrow 1$).

Σε κατάσταση αντιστροφής πληθυσμών μεταξύ δύο 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. 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. 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

2.1.5 Ενίσχυση

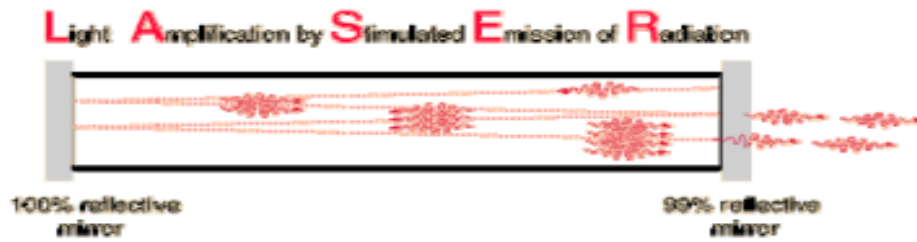
Μέχρι τώρα είδαμε δυο διαδικασίες που μειώνουν τον πληθυσμό του ανώτερου ενεργειακού επιπέδου E_2 (η αυθόρμητη και η εξαναγκασμένη εκπομπή) και μια διαδικασία που αυξάνει τον πληθυσμό του (η απορρόφηση). Υπάρχουν επίσης δύο δυνατές καταστάσεις για κάθε ομάδα ατόμων :

(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 4 : Ενίσχυση της δέσμης των φωτονίων με πολλαπλές διελεύσεις

Πιο απλά, η περιγραφή της ενίσχυσης μπορεί να γίνει και ως εξής: Σε κατάσταση ανεστραμμένων πληθυσμών, η πρώτη εξαναγκασμένη εκπομπή (με προσπίπτον φωτόνιο) θα δώσει δύο πανομοιότυπα φωτόνια, που με τη σειρά τους θα προκαλέσουν εξαναγκασμένη εκπομπή, 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 xx). Βέβαια, στο «παιχνίδι» παραμένουν μόνο τα φωτόνια που προσπίπτουν (και ανακλώνται) κάθετα στους δύο καθρέφτες. Τα υπόλοιπα απορροφώνται στην παράπλευρη επιφάνεια του χώρου.

2.2 Είδη Laser

Τα laser διαιρούνται σε ομάδες σύμφωνα με την κατάσταση του ενεργού υλικού (στερεό, υγρό, αέριο, πλάσμα)

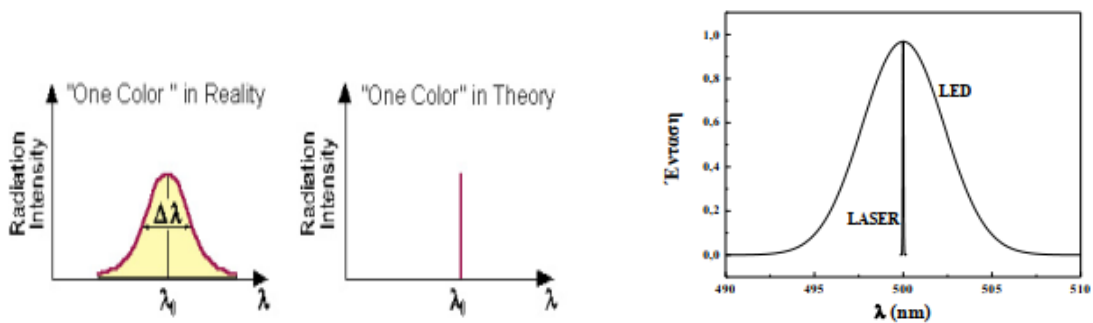
- **Στερεάς κατάστασης** , διακρίνονται σε : μονωτών (ρουβινίου, νεοδυμίου, αλεξανδρίτη) και ημιαγωγών (διοδικό)
- **Υγρών**, που είναι κυρίως χρωστικών χρωμάτων
- **Αέριων** , χωρίζονται σε τέσσερις υποομάδες:
 - ατόμων (π.χ. He-Ne και He-Cd)
 - ατμών μετάλλου (Cu, Au)
 - μορίων (CO₂ , N₂ , excimer)
 - ιοντικά (Ar⁺ , Kr⁺)

2.3 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.

2.3.1 Μονοχρωματικότητα

Δηλαδή ένα μόνο 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 5: Η πραγματική διασπορά της τιμής του λ (αριστερά) σε σχέση με τη θεωρητική (μεσαία)

2.3.2 Συμφασικότητα

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

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

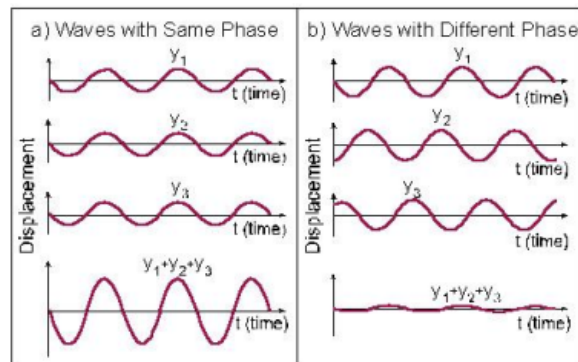
Όπου:

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

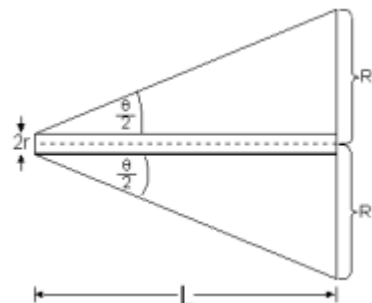


Συμφασικά λέγονται τα κύματα που διατηρούν σταθερή τη σχετική φάση τους. Η ΗΜΑ Laser συναποτελείται από κύματα ίδιου μήκους κύματος που ξεκινούν την ίδια στιγμή από την πηγή τους (ενεργό υλικό), επομένως έχουν την ίδια φάση. Το άθροισμα αυτών των κυμάτων δίνει όμοιο κύμα μεγαλύτερου πλάτους ταλάντωσης. Δηλαδή όλα παρουσιάζουν και την ίδια αρχική φάση αλλά και πολύ στενή κατανομή γωνιακών συχνοτήτων και διανυσμάτων.

2.3.3 Κατευθυντικότητα

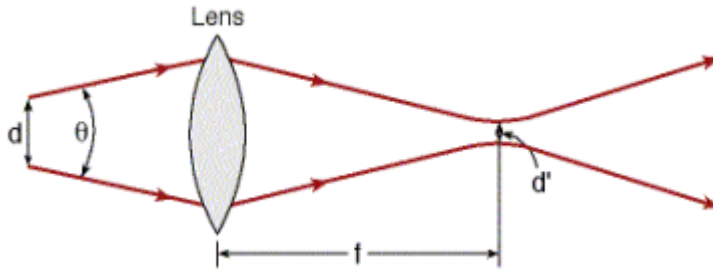
Η εξερχόμενη δέσμη ΗΜΑ από τη συσκευή Laser έχει μια πορεία συγκεκριμένης κατεύθυνσης. Διαχέεται στη συνέχεια κατά μια γωνία απόκλισης, η οποία όμως είναι πολύ μικρότερη από τις αντίστοιχες άλλων πηγών ΗΜΑ. Μπορεί να θεωρηθεί ότι οι ακτίνες της εξερχόμενης δέσμης είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και το ισχυρό σήμα τους μπορεί να διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Έστω μια κυκλική δέσμη εξερχόμενη από laser με διατομή $2r$, η οποία σε απόσταση L γίνει $2R$. Η απόκλιση της δέσμης θ σε rad ορίζεται με βάση την συνάρτηση στο πλάι, με $2R \ll L$ λόγω της μεγάλης κατευθυντικότητας.



Γενικά, η κατευθυντικότητα της δέσμης laser σχετίζεται με την ικανότητα της να μεταφέρει μεγάλη πυκνότητα ενέργειας σε μεγάλη απόσταση.

Η πυκνότητα ενέργειας μπορεί να γίνει πάρα πολύ μεγαλύτερη καθώς η δέσμη μπορεί να εστιαστεί ισχυρά. Σαν παράδειγμα, με $\theta=1$ mrad και $f=10$ cm έχουμε $d=10$ μm , άρα τεράστια πυκνότητα ενέργειας



Εικόνες 6 & 7 : Παράδειγμα εστίασης δέσμης

2.3.4 Πυκνότητα Ενέργειας

Για να ορίσουμε την ικανότητα μεταφοράς ενέργειας με την ακτινοβολία, υπάρχει η πυκνότητα ενέργειας με μονάδες J/m^2 και η ένταση ακτινοβολίας με μονάδες W/m^2 .

Μία δέσμη laser παρουσιάζει ισχυρή κατευθυντικότητα και επομένως, η πυκνότητα ενέργειας που μεταφέρεται όχι μόνο είναι ιδιαίτερα μεγάλη αλλά και σε μία πρώτη προσέγγιση παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την απόσταση. Επομένως η πυκνότητα laser είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με μία απλή πηγή φωτός.

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι πρέπει σε κάθε περίπτωση να αποφεύγεται η απευθείας παρατήρηση ενός laser με το μάτι. Μάλιστα τονίζεται ότι η πυκνότητα ενέργειας από το απλούστερο laser είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου.

Για να γίνει αυτό περισσότερο κατανοητό, ας συγκρίνουμε ένα απλό laser ευθυγραμμίσσεων He-Ne ισχύος 5 mW με τον ήλιο, ο οποίος ακτινοβολεί συνολικά $3.8 \cdot 10^{26} W$ με πυκνότητα ισχύος στη γη $1350 W/m^2$. Η διατομή του laser είναι περίπου 2 mm (ακόμα και σε απόσταση 1 m), επομένως η πυκνότητα ισχύος που μεταφέρει η δέσμη του είναι $1600 W/m^2$. Δηλαδή, η πυκνότητα ενέργειας από αυτό το απλό laser είναι μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου.

Αντίστοιχα, ας συγκρίνουμε το ίδιο laser με λάμπα πυρακτώσεως 100W (οπτική ισχύ) σε απόσταση 1 m. Λόγω της εκπομπής από την λάμπα προς όλες τις κατευθύνσεις, η ακτινοβολία σε απόσταση r έχει κατανεμηθεί σε σφαίρα επιφάνειας $4 \cdot \pi \cdot r^2$. Άρα, η λάμπα των 100 W σε απόσταση 1 m προσφέρει πυκνότητα ισχύος $8 W/m^2$, 200 φορές μικρότερη από αυτή του laser.

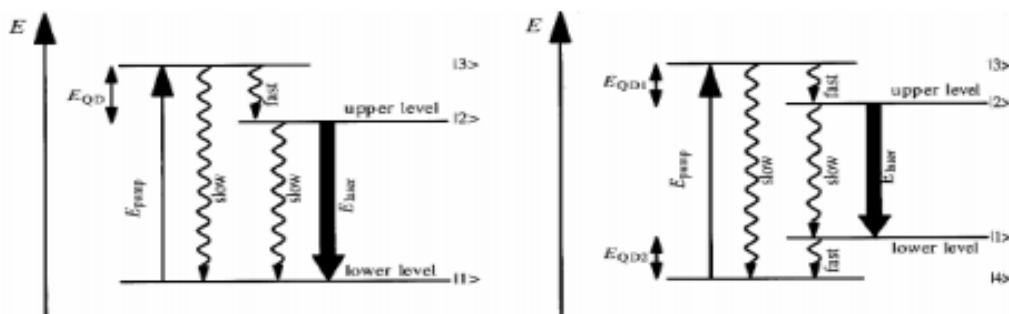
Είναι φανερό επομένως ότι μία δέσμη laser μεταφέρει τεράστια πυκνότητα ενέργειας ή ισχύος αντίστοιχα.

2.4 Laser τεσσάρων επιπέδων

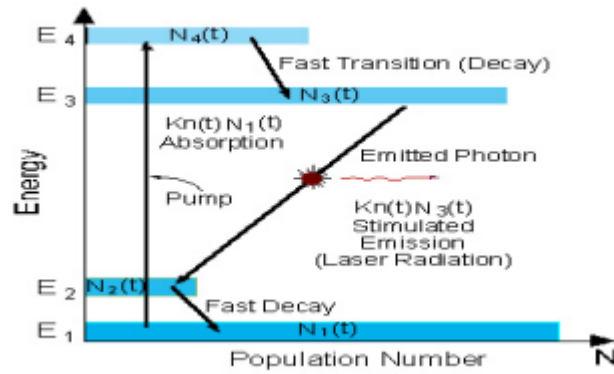
Το λέιζερ Nd:YAG είναι τεσσάρων επιπέδων πάμε να δούμε πως λειτουργεί αυτή η ενεργειακή μετάβαση.

Ας καταλάβουμε αρχικά των 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 τόσο 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.

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 ΗΜΑ Laser. Το Laser τεσσάρων επιπέδων μπορεί να παρέχει συνεχή εκπομπή, ενώ το Laser τριών επιπέδων εκπομπή κατά παλμούς (σχήμα 8 & 9). Ακόμη το Laser τεσσάρων επιπέδων έχει χαμηλό κατώφλι (απαιτείται μικρό ποσό αρχικής ενέργειας) και καλύτερη απόδοση.



Σχήμα 8 : Laser τριών και τεσσάρων επιπέδων αντίστοιχα.

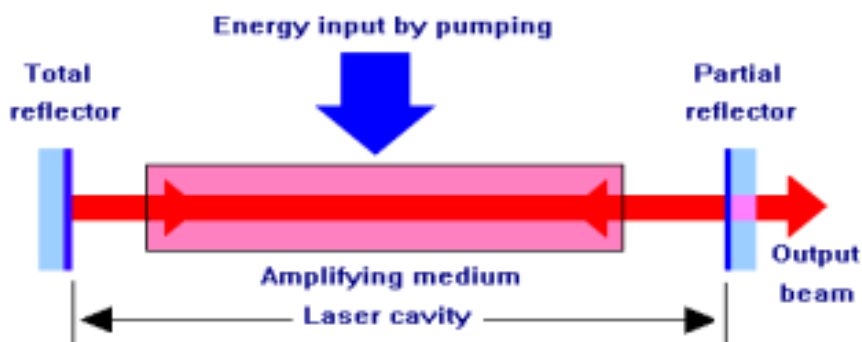


Σχήμα 9 : Laser τεσσάρων επιπέδων.

2.5 Η διάταξη του συστήματος παραγωγής

Η διάταξη του συστήματος παραγωγής στη συσκευή Laser αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

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



Εικόνα 10 : Διάταξη του συστήματος Laser

2.5.1 Το ενεργό υλικό

Είναι μία ή δύο 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.

Στην δική μας περίπτωση ενεργό υλικό θα είναι μία στερεά ράβδος Nd:YAG 10 εκατοστών με διάμετρο 5 χιλιοστά. Θα εξηγήσω παρακάτω τους λόγους επιλογής αυτής ράβδου τα πλεονεκτήματα καθώς και τα οφέλη.

2.5.2 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)
- (β) ηλεκτρική διέγερση (αέριου ενεργού υλικού)
- (γ) συγκρούσεις με άτομα
- (δ) χημική διέγερση
- (ε) ηλεκτρικό ρεύμα σε διόδους

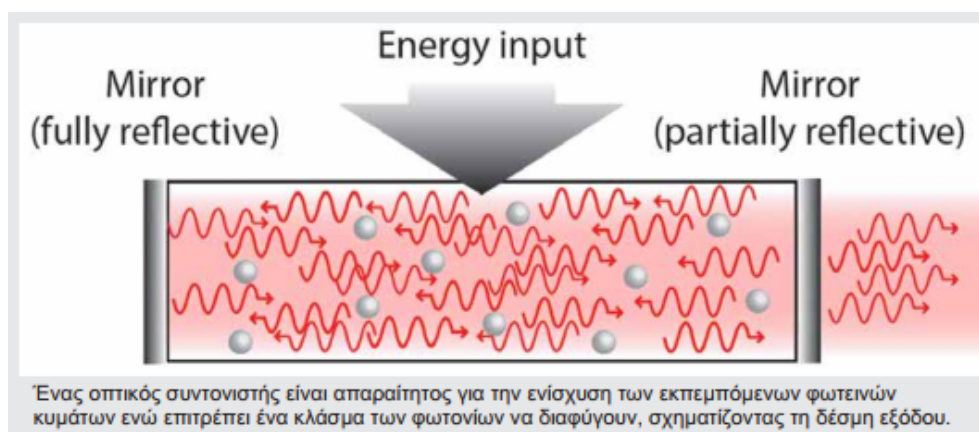
Η δική μας περίπτωση ανήκει στην (α) κατηγορία αυτο που μπορούμε να πούμε επί της διέγερσης με φωτόνια είναι ότι είναι ο συνηθέστερος μηχανισμός διέγερσης όταν το ενεργό υλικό είναι στερεής ή υγρής μορφής και πρόκειται για ΗΜΑ-φωτόνια που απορροφάται από το ενεργό υλικό. Η ΗΜΑ «τροφοδοσίας» προέρχεται συνήθως από

λυχνίες αερίου (π.χ. ξένον, κρυπτόν ή ήλιον) χαμηλής πίεσης από χαλαζία ή από άλλα Laser ή από πηγές κοινού φωτός.

2.5.3 Μηχανισμός Ανάδρασης

Ο μηχανισμός ανάδρασης επιστρέφει πίσω, στο εσωτερικό του ενεργού υλικού, μέρος της HMA Laser που έχει δημιουργηθεί. Συνήθως επιτυγχάνεται με τη βοήθεια καθρεφτών, στα δύο άκρα του ενεργού υλικού, τοποθετημένων με τρόπο που να εξαναγκάζει την HMA να διασχίζει επανειλημμένα το υλικό μπρος-πίσω, ανακλώμενη στις δυο παράλληλες και αντιμέτωπες επιφάνειές τους. Όλο αυτό το σύστημα (σχημαροζ παραπάνω) 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 HMA Laser κατά το υπόλοιπο (μέχρι το 100) ποσοστό.

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 HMA καθώς στην δέσμη παραμένουν μόνο τα φωτόνια που διατηρούν πορεία με διεύθυνση κάθετη στις επιφάνειες των καθρεφτών.



Σχήμα 11 : Οπτικός συντονιστής για την ενίσχυση του σήματος.

2.5.4 Σύζευξη εξόδου (Ο συγχρονισμός στην έξοδο)

Ουσιαστικά αναφερόμαστε στον μηχανισμό που επιτρέπει την έξοδο της HMA Laser

από το ενεργό υλικό, μέσω του ημιδιαπερατού καθρέπτη. Στα «συνεχή» Laser εξέρχεται μικρό ποσοστό της ακτινοβολίας. Στα Laser κατά παλμούς εξέρχεται μεγάλο ποσοστό αλλά μόνον σε επιτρεπόμενες χρονικές στιγμές.

2.6 Οπτική κοιλότητα (οπτικό αντηχείο) και μορφή της ακτινοβολίας

2.6.1 Laser Modes

Υπάρχουν δύο τρόποι ταλάντωσης του Laser διακρίνονται σε εγκάρσιοι και διαμήκεις.

Διαμήκεις ρυθμοί Laser

Στο λέιζερ μέσα δημιουργείται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο έχει το σχήμα μιας χορδής που ταλαντώνεται πρέπει στις άκρες να είναι μηδέν εφόσον είναι οι καθρέφτες εκεί, δηλαδή στο σημείο ανάκλασης δεν μπορεί να έχει άλλη τιμή και πρέπει να χωράνε μέσα στο αντηχείο ακέραιος αριθμός από $\lambda/2$. Γενικά ισχύει ότι $N * (\lambda / 2)$. Μπορεί δηλαδή να υποστηρίξει ρυθμούς πολλαπλάσιους του μισού μήκους κύματος. Όμως εμείς στο πείραμα μας δεν έχουμε όλες τις γενικότητες καθώς έχουμε μονοχρωματικό λέιζερ. Υπάρχει λοιπόν μια “καμπάνα” όπου αναφέρει ότι το λέιζερ εκπέμπει σε μία περιοχή κοντά στο μήκος κύματος του υλικού. Στην δική μας περίπτωση είναι συγκεντρωμένη στο 1.064 μm αυτό δείχνει βέβαια ότι δεν είναι μονοχρωματικό το λέιζερ και ότι έχει ένα μικρό εύρος ζώνης όπου μπορεί να υποστηρίξει το υλικό μας. Τελικά από τους διαμήκεις ρυθμούς επιζούν μόνο όσοι είναι στο εύρος εκπομπής του υλικού.

Εγκάρσιοι ρυθμοί Laser $[TEM_{nm}]$

Μια τελευταία αλλά ζωτικής σημασίας για εφαρμογές, επίδειξη αποτελεί η ρύθμιση των εγκάρσιων ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών ταλάντωσης είναι ουσιαστικά τα μοτίβα της έντασης που εμφανίζονται στο προφίλ της δέσμης. Στην κοιλότητα ενός laser, η αποδιέγερση του ενεργού υλικού, συνοδεύεται από εκπομπή φωτονίων. Το φωτόνιο,

όπως είναι γνωστό, είναι φορέας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση της κοιλότητας ενός laser το ηλεκτρομαγνητικό αυτό πεδίο είναι εγκάρσιο όπως προκύπτει από τις λύσεις των εξισώσεων Maxwell. Αυτές έχουν την μορφή στάσιμων κυμάτων δηλαδή :

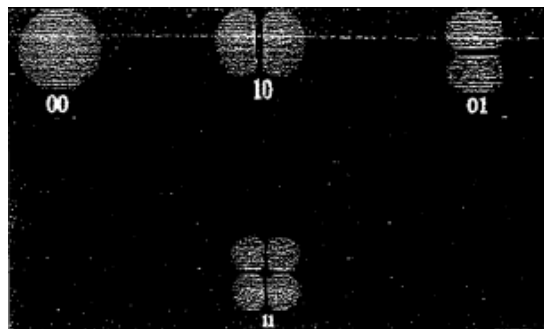
$$E(x, y, z) = E_0 \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L}\right) e^{\mp\gamma_{nm}z}$$

$$H(x, y, z) = \pm \frac{E_0}{z_0} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L}\right) e^{\mp\gamma_{nm}z}$$

για το δεξιά και αριστερά οδεύον κύμα, αντίστοιχα, όπου
 E_0 το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου
 n, m η «τάξη» του ρυθμού
 L το μήκος του οπτικού αντηχείου
 g ο συντελεστής διάδοσης ¹² και
 z_0 η κυματική αντίσταση του κενού ¹³

$$\begin{aligned} \gamma_{nm} &= \sqrt{\epsilon\mu(\omega_{nm}^2 - \omega^2)}, \text{ όπου } \omega_{nm} \text{ η συχνότητα αποκοπής του εκάστοτε ρυθμού,} \\ \omega_{nm}^2 &= \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \\ z_0 &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \end{aligned}$$

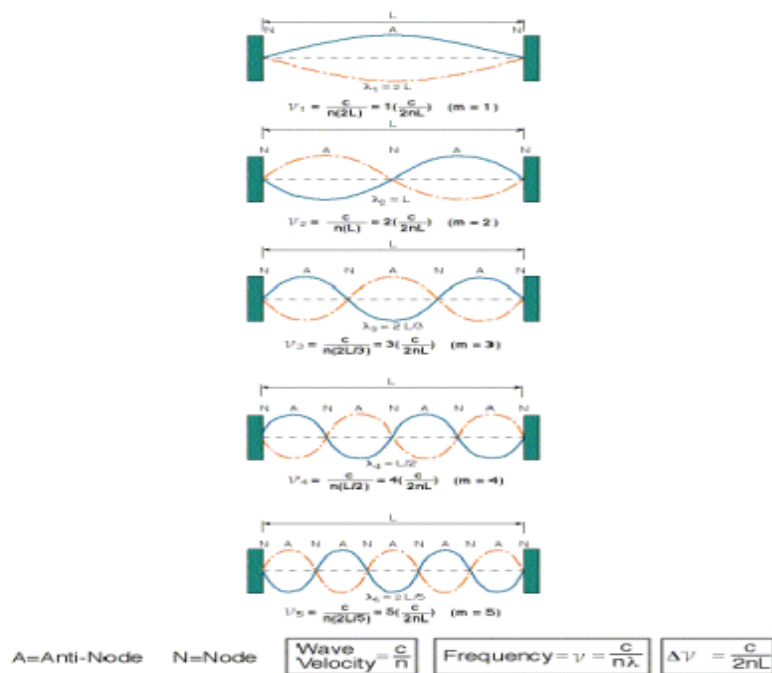
Οι δείκτες n, m δείχνουν το πλήθος των μηδενισμών του εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον x και y άξονα αντίστοιχα. Μπορείτε εύκολα να αναγνωρίσετε έναν ρυθμό, παρατηρώντας απλώς την κηλίδα της ακτινοβολίας, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα. Οι αριθμοί στους δείκτες μπαίνουν ανάλογα που υπάρχουν δεσμοί στους άξονες, .



Εικόνα 12 : Μερικοί Βασικοί Ρυθμοί TEM_{nm}

Τι εννοούμε στάσιμα κύματα :

Είναι γνωστό από τη θεωρία των κυμάτων ότι όταν δύο 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.



Εικόνα 12 : Ρυθμοί ταλάντωσης κυμάτων

Στους εγκάρσιους ρυθμούς ευνοείται ο TEM₀₀ με επίπεδους καθρέφτες. Επίπεδους καθρέφτες θα έχουμε εμείς στην αρχική λειτουργία του λέιζερ άρα θα περιμένουμε η μορφή της δέσμης να έχει την μορφή TEM₀₀

Από την άλλη αν βάλω κοίλους καθρέφτες σταθεροποιείται περισσότερο το σύστημα καθώς περιορίζονται περισσότερα τα φωτόνια

2.6.2 Μήκος 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).

Δηλαδή $\lambda_m = 2L / m$ (1) όπου m ο αριθμός των μισών μηκών κύματος και λ_m το μήκος κύματος στη συγκεκριμένη λειτουργία

$$\text{Επίσης ισχύει ότι } c = \lambda_0 * \nu = n * \lambda_m * \nu_m \quad (2)$$

όπου c η ταχύτητα της ΗΜΑ στο κενό

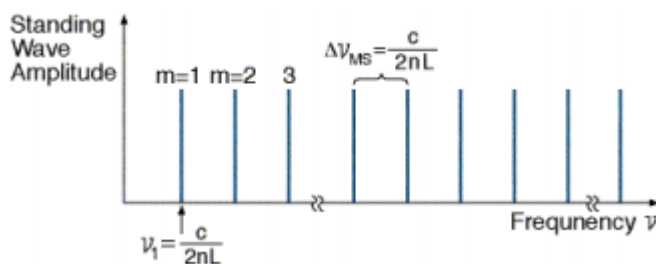
λ_0 το μήκος κύματος της ΗΜΑ στο κενό

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 ότι $\nu = c / 2 * n * L$ (4)

$$\text{και στις υπόλοιπες } \nu = m * (c / 2 * n * L) \quad (5)$$



Εικόνα 12 : Οι επιτρεπόμενες συχνότητες των κυμάτων.

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 $m = 10^6$ ($L = 30 \text{ cm}$).

2.7 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.

(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.

Η ισχύς του Laser Nd:Yag είναι σχεδόν μηδενική για μεγάλο χρονικό διάστημα ώσπου κάποια στιγμή ξεπερνά το ενεργειακό κατώφλι και ύστερα αυξάνεται γραμμικά. Όσο περισσότερο το ξεπερνά τόσο η αυθόρμητη εκπομπή σιγά σιγά εξαφανίζεται δηλαδή δεν προλαβαίνει να εκδηλωθεί. Πριν να εκδηλωθεί είναι μόνο αυθόρμητη και ακριβώς στο όριο του κατωφλίου είναι ένα προς ένα τα ηλεκτρόνια. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι το κατώφλι μειώνεται όσο καλύτερο είναι το σύστημα, καλή ποιότητα κρυστάλλου, ευθυγραμμισμένοι καθρέφτες κι άλλοι παράμετροι όλα

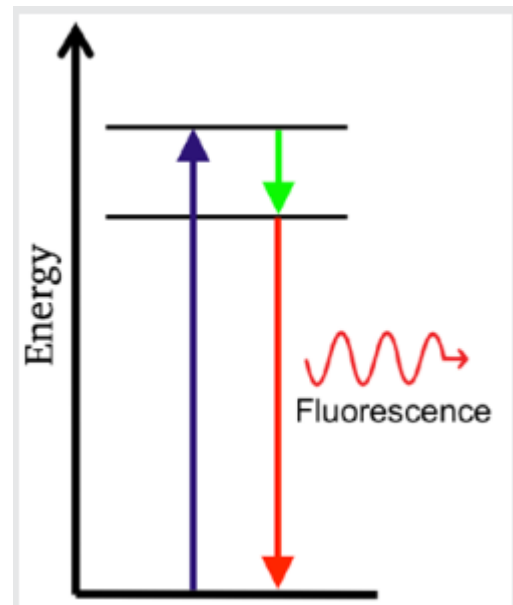
αυτά βέβαια ως ένα. Θεωρητικά στον κρύσταλλο Nd:Yag είναι πολύ κοντά στο μηδέν αλλά στην πράξη είναι υψηλότερα.

2.8 ΦΘΟΡΙΣΜΟΣ

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 δύο καθορισμένων και «ευκρινών» ενεργειακών επιπέδων, η γραφική παράσταση της ΗΜ ισχύος σε συνάρτηση με την συχνότητα είναι μια πολύ στενή «καμπάνα». 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).

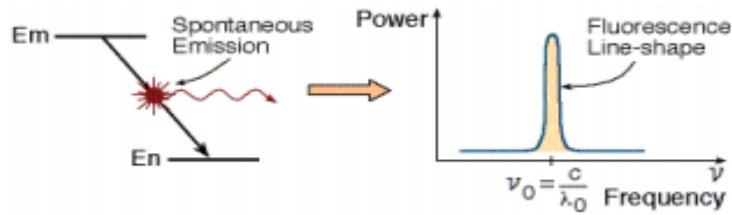
Το εύρος του φάσματος (φθορισμού) υπακούει και στην αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg:



Εικόνας 13 : Ενεργειακή κατάσταση φθορισμού

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

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



Σχήμα 14 : Δημιουργία και φάσμα της ΗΜ εκπομπής

2.9 Ενίσχυση

Κάθε φορά που η ΗΜΑ Laser διασχίζει το ενεργό υλικό, ενισχύεται.

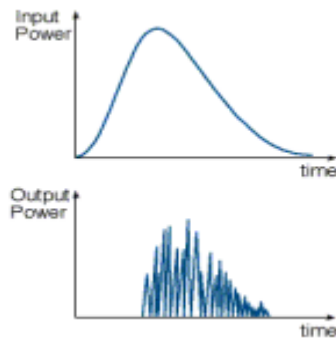
Όμως υπάρχουν απώλειες από:

- (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 ΗΜΑ Laser στην έξοδο θα πρέπει η ενίσχυση να είναι τουλάχιστον λίγο μεγαλύτερη από τις απώλειες. Τυπική τιμή αυτο πολλαπλασιασμού στο Laser He-Ne για ένα «πέρασμα» είναι 5%, ενώ 200 «περάσματα» πολλαπλασιάζουν 17000 φορές.

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 ΗΜΑ 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.

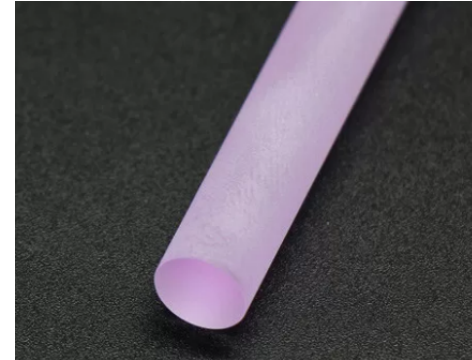


Σχήμα 15 : Κάθε παλμός στην έξοδο αποτελείται από εκατοντάδες μικρότερους παλμούς

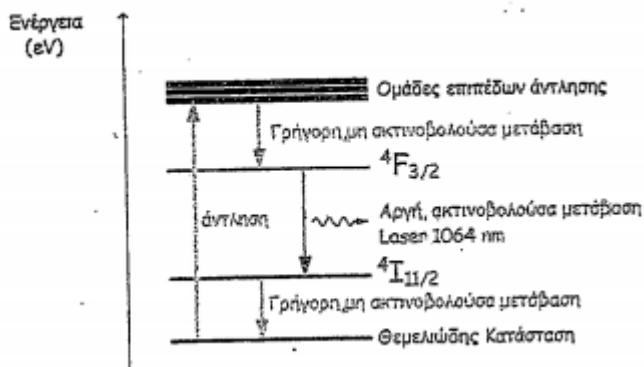
Σε μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παλμικών λέιζερ, που ονομάζεται **Q-switching**, ένας ηλεκτρομαγνητικός διακόπτης εισάγεται στο υλικό του λέιζερ και εμποδίζει την εκπομπή λέιζερ μπλοκάροντας την έξοδο του φωτός όταν η πληθυσμιακή αναστροφή φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα. 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. Το Q-switching χρησιμοποιείται πολύ στα λέιζερ Nd: YAG για την αύξηση της ενέργειας του παλμού.

3. Nd: YAG ως το ενεργό μέσο σε λέιζερ στερεάς κατάστασης

Το λέιζερ Nd:YAG (αγγλικό ακρωνύμιο του *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*, που σημαίνει **γρανάτης αργιλίου-υτρίου με προσμίξεις νεοδυμίου**) αποτελεί κρύσταλλο ο οποίος χρησιμοποιείται ως ενεργό μέσο λέιζερ για λέιζερ στερεάς κατάστασης. Η πρόσμιξη εμποτισμού, το τριπλά ιονισμένο νεοδύμιο, Nd(III), τυπικά αντικαθιστά ένα μικρό κλάσμα (το 1%) των ιόντων υτρίου στην κρυσταλλική δομή του ξενιστή του γρανάτη αργιλίου-υτρίου (YAG), καθώς τα δύο ιόντα έχουν παρόμοιο μέγεθος. Έχει τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης λέιζερ, του υψηλού ορίου βλάβης, της καλής θερμικής αγωγιμότητας, είναι πιο αξιόπιστο και μπορεί να πραγματοποιήσει πολλαπλούς τρόπους εργασίας (συνεχής, παλμικός, Q-switching, κλειδωμά λειτουργίας, πολλαπλασιασμός συχνότητας κ.λπ.). Μεταξύ αυτών, η συνεχής λειτουργία είναι μια πολύ καλή μέθοδος εργασίας για τα λέιζερ Nd:YAG και η συνεχής απόδοση λέιζερ έχει φτάσει στο επίπεδο των κιλοβάτ. Στην λειτουργία Q-switching, έχουν επιτευχθεί ισχύς εξόδου 250 μεγαβάτ και διάρκειες παλμών από 10 έως 25 νανοδευτερόλεπτα. Οι παλμοί υψηλής έντασης μπορούν να διπλασιαστούν αποτελεσματικά για να δημιουργήσουν φως λέιζερ στα 532 nm ή υψηλότερες αρμονικές στα 355, 266 και 213 nm. Τα λέιζερ Nd:YAG εκπέμπουν συνήθως φως με μήκος κύματος **1064 nm**, στο υπέρυθρο. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης μεταβάσεις κοντά στα 946, 1120, 1320 και 1440 nm. Τα λέιζερ Nd:YAG λειτουργούν τόσο σε παλμική όσο και σε συνεχή λειτουργία. Ως ένα από τα στερεά κρυσταλλικά υλικά λέιζερ με καλή συνολική απόδοση, χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία συγκόλλησης, την επιστημονική έρευνα και άλλους τομείς. Τέλος ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι ότι δεν είναι εύθραυστο σε σχέση με άλλες ράβδους όπως για παράδειγμα αυτές από γυαλί.



Γενικά στοιχεία : Το laser νεοδυμίου κατασκευάστηκε το 1964 από μια ομάδα των εργαστηρίων Bell, με επικεφαλής τους Joseph E. Geusic και Richard G. Smith. Όπως είναι γνωστό, για να παρατηρηθεί ακτινοβολία laser πρέπει να έχει επιτευχθεί αναστροφή πληθυσμών. Στην περίπτωση του Nd:YAG, αυτό γίνεται μέσω οπτικής άντλησης. Αυτή η ακτινοβολία έχει μήκος κύματος 1064nm.

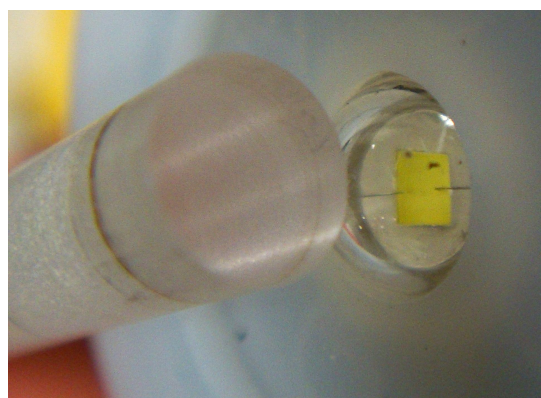


Σχήμα 16 : Ποιοτικό Ενεργειακό διάγραμμα (τεσσάρων επιπέδων) των αποδιεγέρσεων του Nd:Yag.

Τα λέιζερ Nd:YAG αντλούνται οπτικά χρησιμοποιώντας flash tube ή διόδους λέιζερ και ο κρύσταλλος λέιζερ Nd:YAG απορροφά κυρίως στις ζώνες μεταξύ 730-760 nm και 790-820 nm. Σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος, οι λαμπτήρες κρυπτον έχουν υψηλότερη απόδοση σε αυτές τις ζώνες από ό,τι οι πιο συνηθισμένοι λαμπτήρες xenon, οι οποίοι παράγουν περισσότερο φως στα 900 nm περίπου. Ο κρύσταλλος Nd:YAG χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικούς, ιατρικούς, στρατιωτικούς και επιστημονικούς τομείς

Χαρακτηριστικά κρυστάλλου Nd:YAG:

- Υψηλός συντελεστής κέρδους
- Χαμηλό κατώφλι λέιζερ
- Εξαιρετικές οπτικές, μηχανικές και φυσικές ιδιότητες
- High slope efficiency
- Εύρος ζώνης απορρόφησης



Βιομηχανοποίηση

Τα λέιζερ Nd:YAG χρησιμοποιούνται για χάραξη ή σήμανση ποικιλίας μετάλλων και πλαστικών, ή για διαδικασίες βελτίωσης μεταλλικών επιφανειών. Χρησιμοποιούνται ευρέως για κοπή και συγκόλληση χάλυβα, ημιαγωγών και διαφόρων κραματων.

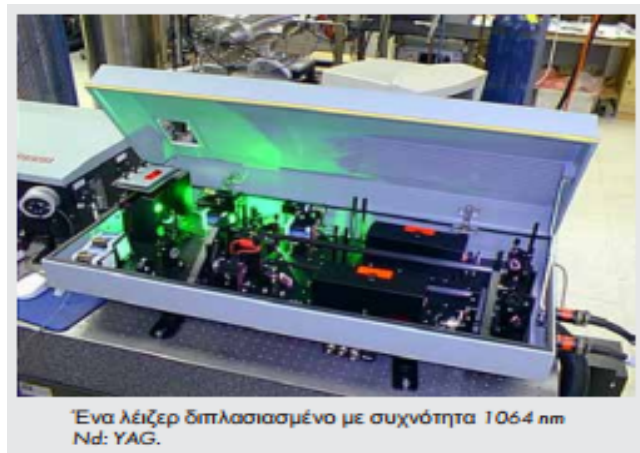
Για παράδειγμα, λέιζερ 266 nm, λέιζερ 355 nm, λέιζερ 532 nm, λέιζερ 1064 nm.

Εφαρμογές Ιατρικής

Τα λέιζερ Nd:YAG στα 1064 nm είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο λέιζερ για θερμοθεραπεία που προκαλείται από λέιζερ, στην οποία οι καλοήθεις ή κακοήθεις βλάβες σε διάφορα όργανα αφαιρούνται από τη δέσμη. Στην ογκολογία, τα λέιζερ Nd:YAG μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αφαίρεση καρκίνων του δέρματος. Αυτά τα λέιζερ χρησιμοποιούνται επίσης εκτενώς στον τομέα της κοσμητικής ιατρικής για την αποτρίχωση με λέιζερ και τη θεραπεία μικρών αγγειακών ελαττωμάτων όπως οι φλέβες αράχνης στο πρόσωπο και τα πόδια. Στην ποδολογία, το λέιζερ Nd:YAG χρησιμοποιείται για τη θεραπεία της ονυχομυκητίασης, η οποία είναι μυκητιασική μόλυνση του νυχιού.

Οδοντιατρική

Τα οδοντικά λέιζερ Nd:YAG έχουν χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση της τερηδόνας ως εναλλακτική λύση στη θεραπεία με τρυπάνι, αν και τα στοιχεία που υποστηρίζουν τη χρήση τους είναι χαμηλής ποιότητας. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για χειρουργικές επεμβάσεις μαλακών ιστών στη στοματική κοιλότητα, όπως ουλοπλεκτομή, περιοδοντική μυϊκή απομάκρυνση. Τα οδοντικά λέιζερ Nd:YAG έχουν επίσης αποδειχθεί αποτελεσματικά στη θεραπεία και την πρόληψη της οδοντικής υπερευαισθησίας.



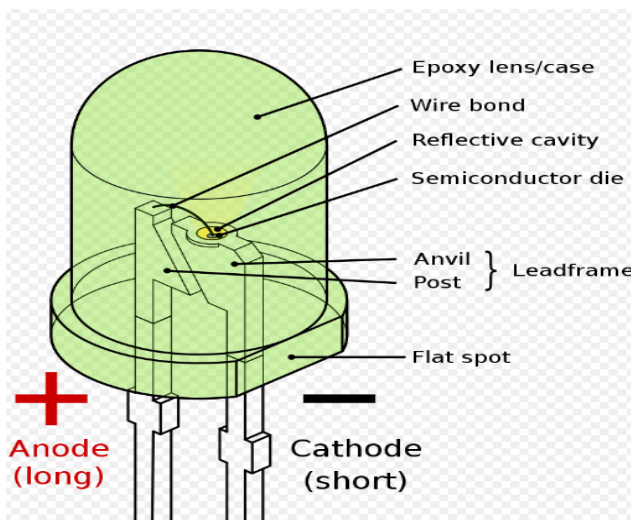
Εικόνα 17: Σύστημα λέιζερ Nd:YAG

4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

4.1 Δίοδος Εκπομπής φωτός (Led)

Δίοδος Εκπομπής Φωτός, (*LED, light-emitting diode*), αποκαλείται ένας ημιαγωγός ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος όταν του παρέχεται μία ηλεκτρική τάση κατά τη φορά ορθής πόλωσης (forward-biased).

Η δίοδος είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που επιτρέπει στο ηλεκτρικό φορτίο να το διαπερνά σε μία μόνο κατεύθυνση. Οι δίοδοι εξυπηρετούν πολλές διαφορετικές λειτουργίες σε μια ποικιλία ηλεκτρονικών συσκευών στις οποίες χρησιμοποιούμε καθημερινά. Για παράδειγμα, οι δίοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε τροφοδοτικά για να μετατρέψουν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα (DC). Η φωτοδίοδος είναι ένας άλλος τύπος δίοδου που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα όταν προσπίπτει φως πάνω της, δηλαδή απαραίτητη για τη λειτουργία των ηλιακών συλλεκτών. Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) λειτουργούν σαν φωτοδίοδοι αλλά αντίστροφα. Εκπέμπουν δηλαδή φως όταν περνάει ένα ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα ένδειξης συνδέσεων και στοιχείων που απαρτίζουν ένα LED. Πηγή wikipedia :

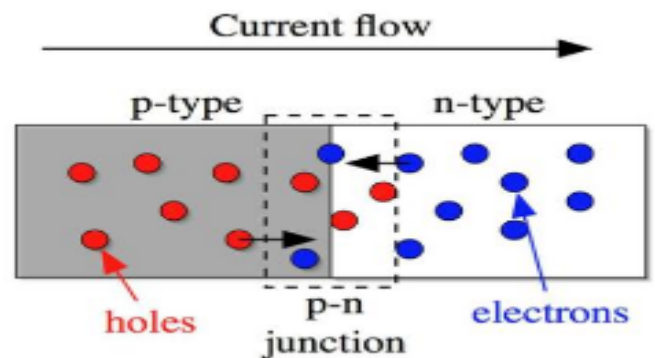
Epoxy lens = φακός Reflective cavity = Ανακλαστική κοιλότητα Semiconductor die = Μήτρα ημιαγωγών
Leadframe = Στηρίγματα για την προστασία του άνω μέρους παραγωγής φωτονίων από δονήσεις.

4.1.1 Βασικές αρχές

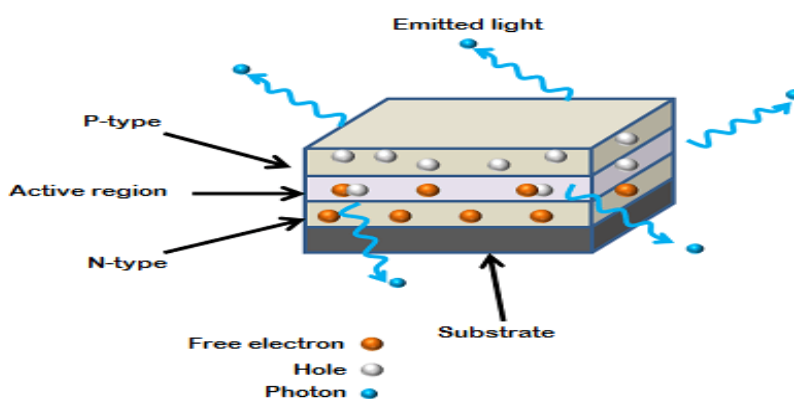
Το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από την χημική σύσταση του ημιαγωγικού υλικού που χρησιμοποιείται, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται, και, κατά συνέπεια, το χρώμα του, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία του περάσματος p-n, όπου:

- p = Υλικό νοθευμένο με αποδέκτες.
- n = Υλικό νοθευμένο με δότες.

Η βασική αρχή των LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχέει ηλεκτρόνια και σπές μέσα στις p- και n- πλευρές αντίστοιχα.



Στην περιοχή όπου γίνεται η ένωση εκεί ουσιαστικά δημιουργούνται η φωτόνια και αμέσως μετά εκπέμπονται από την δίοδο όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω σαν εκπεμπόμενο φως.



Εδώ φαίνονται και τα επίπεδα και την δομή που έχει το LED εσωτερικά.

4.1.2 Τρόπος λειτουργίας και δομή

Μια δίοδος εκπομπής φωτός (light emitting diode, LED) είναι στην ουσία μια ένωση που έχει κατασκευαστεί από ένα ημιαγωγό άμεσου ενεργειακού χάσματος, όπως για παράδειγμα το GaAs, και στην οποία η επανασύνδεση των ζευγών ηλεκτρονίων – οπών (ΖΗΟ) έχει αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων. Η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων, $h\nu$, ισούται κατά προσέγγιση με το ενεργειακό χάσμα E_g

$$E_g = E_{\text{φωτονίου}} = h \cdot \nu$$

Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από την διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγωγικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η p-περιοχή πρέπει να είναι επαρκώς ρηχή, ή διαφορετικά πρέπει να χρησιμοποιήσουμε διατάξεις ετεροδομών. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά ημιαγωγικά άμεσου ενεργειακού διακένου, τα οποία μπορούν εύκολα να νοθευτούν και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εμπορικών LED που εκπέμπουν ακτινοβολία στην ερυθρή και την υπέρυθη περιοχή μηκών κύματος του φάσματος.

Η εξωτερική απόδοση $\eta_{\text{εξ}}$ ενός LED είναι ένα μέτρο της απόδοσης της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε εκπεμπόμενη εξωτερικά φωτεινή ενέργεια. Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζεται η εσωτερική απόδοση της ακτινοβολούσας διαδικασίας επανασύνδεσης και η επακόλουθη απόδοση της εξόδου των φωτονίων από την διάταξη. Η ηλεκτρική ενέργεια στην είσοδο ενός LED ισούται απλά με το γινόμενο του ρεύματος επί την ηλεκτρική τάση της δίοδου ($I \times V$). Αν η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από την διάταξη είναι P_{out} , τότε

$$\eta_{\text{εξ}} = P_{\text{εξ}}(\text{οπτική}) \times 100\% / I \cdot V$$

Τα τελευταία χρόνια, οι λαμπτήρες LED έχουν αντικαταστήσει τα CFL ως τη καλύτερη λύση για ενεργειακά αποδοτικό φωτισμό στις περισσότερες εφαρμογές. Οι λαμπτήρες LED έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής - περίπου πέντε φορές σε σχέση με ενός λαμπτήρα CFL και σαράντα φορές περισσότεροι από έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως. Επιπλέον, τα LED καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από άλλα σχέδια λαμπτήρων και δεν χρειάζονται ειδική μεταχείριση κατά την απόρριψη. Οι λυχνίες LED δεν "καίγονται" όπως συμβαίνει με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Αντίθετα, μειώνεται σταδιακά η φωτεινότητα τους μετά από πολλές ώρες χρήσης.

Αναλυτικότερα :

Πλεονεκτήματα των LEDs

- **Απόδοση:** Τα LED παράγουν περισσότερο φως ανά watt συγκριτικά με άλλες πηγές φωτισμού
- **Χρώμα:** Τα LED εκπέμπουν φως συγκεκριμένου χρώματος χωρίς την χρήση φίλτρων που απαιτούν οι παραδοσιακές μέθοδοι φωτισμού. Είναι πιο αποδοτικά και χαμηλώνουν το αρχικό κόστος.
- **Μέγεθος:** Τα LED είναι πολύ μικρά (μικρότερα από 2mm) και μπορούν να τοποθετηθούν σε πίνακες αποτύπωσης.
- **Χρόνος ON/OFF:** Τα LED έχουν γρήγορη απόκριση. Μια τυπική κόκκινη LED μπορεί να έρθει σε κατάσταση πλήρους φωτεινότητας σε χρόνο μικρο δευτερολέπτων. Τα LED που χρησιμοποιούνται ως συσκευές επικοινωνίας έχουν ακόμα μικρότερους χρόνους απόκρισης.
- **Ψυχρό φως:** Σε αντίθεση με τις κοινές πηγές φωτός, τα LED εκπέμπουν πολύ λίγη θερμότητα σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας που μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε ευαίσθητα αντικείμενα ή κατασκευές. Η ενέργεια που χάνεται διαχέεται ως θερμότητα μέσω της βάσης του LED.
- **Χρόνος ζωής:** Τα LED έχουν μεγάλους χρόνους ζωής. Οι ώρες λειτουργίας τους κυμαίνονται από 35.000 έως 50.000 ώρες, αριθμός τεράστιος συγκριτικά με αυτόν των λαμπτήρων πυράκτωσης που κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000 ώρες και των λαμπτήρων φθορισμού που κυμαίνεται από 10.000 έως 15.000 ώρες.
- **Αντίσταση σε κραδασμούς:** Τα LED, όντας στοιχεία στερεάς κατάστασης, είναι δύσκολο να υποστούν ζημιά από κραδασμούς όπως συμβαίνει με τις λάμπες πυρακτώσεως και φθορισμού.
- **Εστίαση:** Τα LED μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να εστιάζουν το φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή περιοχή. Οι λάμπες πυρακτώσεως και φθορισμού απαιτούν ένα εξωτερικό ανακλαστήρα για να συλλέγει το φως και να το κατευθύνει με ένα χρήσιμο τρόπο.

Μειονεκτήματα των LEDs

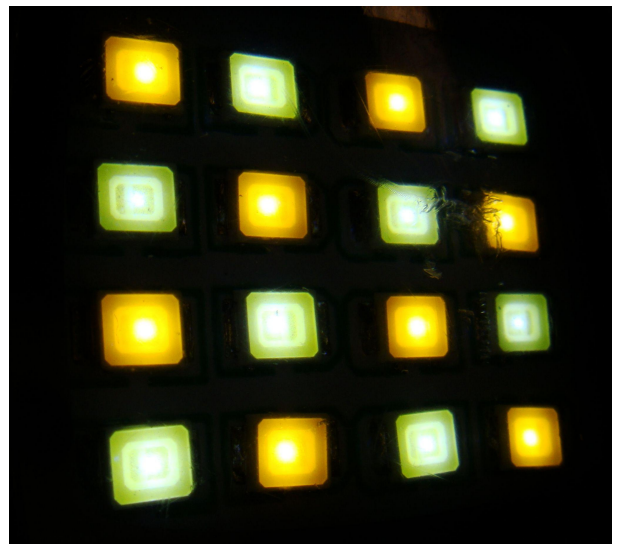
- **Υψηλό αρχικό κόστος:** Τα LED σήμερα είναι ακριβότερα στην αγορά τους απ' ότι οι κοινές τεχνολογίες φωτισμού. Όμως αυτό το κόστος αντισταθμίζεται με την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που έχουν.
- **Εξάρτηση από τη θερμοκρασία:** Η λειτουργία των LED έχει ισχυρή εξάρτηση από τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στον χώρο που τα περιβάλλει. Σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, τα LED μπορούν να υπερθερμανθούν και να υποστούν ζημιά. Αυτός ο παράγοντας είναι πολύ σημαντικός αν σκεφτούμε ότι αυτοκινητιστικές, στρατιωτικές και ιατρικές εφαρμογές απαιτούν η συσκευή να λειτουργεί σε ένα επαρκώς μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και να είναι ανθεκτική στις βλάβες.
- **Ευαισθησία στην Τάση:** Τα LED είναι αρκετά ευαίσθητα στη τάση και κατ' επέκταση στο ρεύμα που τα τροφοδοτεί. Έτσι πολλές φορές χρησιμοποιούνται σειρές αντιστάσεων ή πηγές ελέγχου του ρεύματος.

- **Μόλυνση από το μπλε:** Επειδή τα μπλε LED και αυτά του ψυχρού λευκού είναι πλέον ικανά να εκπέμπουν περισσότερο μπλε φως απ' ότι οι κοινές πηγές φωτός όπως οι λάμπες νατρίου υψηλής πίεσης, η ισχυρή εξάρτηση από το μήκος κύματος της σκέδασης Rayleigh σημαίνει ότι τα LED μπορούν να προκαλέσουν περισσότερη φωτορύπανση απ' ότι οι άλλες πηγές φωτός.

Η δημιουργία του λευκού φωτός λαμβάνεται με τη χρήση **πολλαπλών ημιαγωγών RGB** ή ενός **στρώματος κίτρινου φωσφόρου πάνω σε μπλε LED** που εκπέμπει **λευκό φως**. Ο δεύτερος τρόπος είναι ο πιο συχνός καθώς τα πλεονεκτήματα είναι πάρα πολλά όπως έχουν **απώλειες απόδοσης λόγω απώλειας θερμότητας**. Λόγω της απλότητας της κατασκευής, **η μέθοδος φωσφόρου εξακολουθεί να είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος για την κατασκευή λευκών LED υψηλής έντασης**. Ο σχεδιασμός και η παραγωγή μιας φωτεινής πηγής είναι απλούστερη και φθηνότερη από ένα σύνθετο σύστημα RGB.

Γιατί LED ;

- Χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής
- Μεγάλη οπτική απόδοση
- Κατευθυντικότητα εκπομπής φωτός
- Χαμηλό κόστος αγοράς
- Μεγάλη ποικιλία και ευκολία εύρεσης
- Χρειάζονται χαμηλές ασφαλείς τάσεις τροφοδοσίας,



παραμέτρους δηλαδή που τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για το σκοπούμενο σύστημα στο εργαστηριακό και εκπαιδευτικό περιβάλλον.

4.2 Βιβλιογραφικές Συγκρίσεις - Εκτιμήσεις των LED με άλλες πηγές

Λαμπτήρες πυρακτώσεως

Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως, αποτελείται από μια γυάλινη σφαίρα που περικλείει ένα λεπτό φωτιστικό βολφραμίου. Ένα ηλεκτρικό ρεύμα θερμαίνει το νήμα σε θερμοκρασία μεταξύ 2000 K and 3300 K, εκεί εκπέμπει ένα συνεχές φάσμα φωτός με μέγιστη ένταση στο υπέρυθρο. Το αέριο αργού χρησιμοποιείται συνήθως για την πλήρωση λαμπτήρων πυρακτώσεως. Εάν το οξυγόνο έρθει σε επαφή με το νήμα, θα υποστεί ταχεία οξείδωση και θα καταστραφεί. Με την πάροδο του χρόνου, το νήμα φθείρεται σταδιακά έως ότου σπάσει και δεν είναι αγωγίμο πλέον - σε αυτό το σημείο, ο λαμπτήρας έχει «καεί». Ένας λαμπτήρας αλογόνου είναι ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως που περιλαμβάνει μια μικρή ποσότητα αερίου αλογόνου, όπως το ιώδιο, που επιβραδύνει το ρυθμό φθοράς του νήματος και παρατείνει τη διάρκεια ζωής του λαμπτήρα. Ένας τυπικός λαμπτήρας πυρακτώσεως μετατρέπει λιγότερο από το 5% της ενέργειας που καταναλώνει σε ορατό φως - το υπόλοιπο εκπέμπεται ως αόρατη συχνότητα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, την οποία μπορούμε να αντιληφθούμε ως θερμότητα. Άρα η απόδοση του είναι πολύ χαμηλή ώστε να συγκριθεί με οποιοδήποτε είδος λαμπτήρα ειδικά με το LED.

LED vs Λαμπτήρες Πυρακτώσεως

Οι λυχνίες LED καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, επειδή το φως της διόδου είναι πολύ πιο αποδοτικό, από άποψη ισχύος, από το φως νήματος των λαμπών πυρακτώσεως. Οι λαμπτήρες LED καταναλώνουν 75% λιγότερη ενέργεια από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, η διαφορά είναι ακόμη μεγαλύτερη.



Εικόνα 18 : Αποδόσεις λαμπτήρων πυρακτώσεως , φθορισμού και LED αντίστοιχα

LED vs semiconductor laser

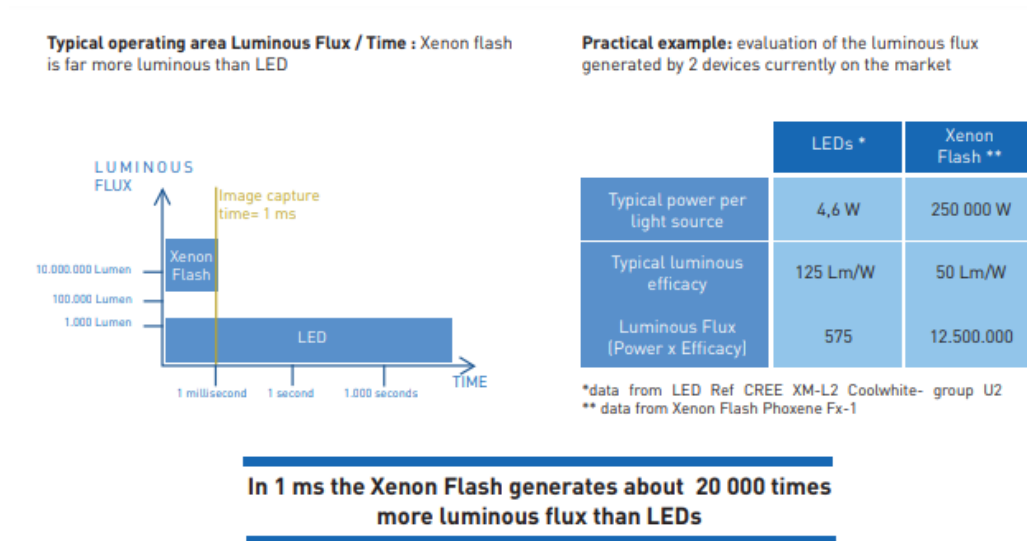
Το φως LED προέρχεται από αυθόρμητη εκπομπή, ενώ το φως διόδου του λέιζερ προκύπτει από διεγερμένη εκπομπή. Έτσι, τα LED γενικά έχουν χαμηλότερη ισχύ εξόδου και πανκατευθυντική εκπομπή. Τα LED είναι αποδοτικά και μικρά σε σύγκριση με τα αντίστοιχα λέιζερ, αλλά συνήθως λειτουργούν σε χαμηλότερα ρεύματα κίνησης και είναι λιγότερο ακριβά.

| PARAMETERS | LED | LASER |
|---|---|---|
| Working Principle | Electro-luminance | Stimulated Emission |
| Full Form | Light Emitting Diode | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| Response | Slow Response | Fast response in comparison to LED |
| Driving Current | It ranges from 50 to 100 mA. | It ranges from 5 to 40 mA. |
| Nature of Emitted Light | Incoherent and consists of various colours. | Coherent and Monochromatic. |
| Junction Area during Manufacturing | Wide Junction Area | Narrow and small Junction |
| Bandwidth Range | It lies in the range of 10 to 50 THz. | It lies in the narrow range i.e. from 1 MHz to 2 MHz. |
| Power to light Conversion Efficiency | Approx 20 % | Approx 70 % |
| Numerical Aperture of the obtained Light Beam | Higher in LEDs | Extremely low as compared to LEDs. |
| Cost | Low cost and thus economical. | High cost and thus used in the specific application. |

Εικόνα 19 : Πίνακας απόδοσης LED & LASER

LED vs Λυχνίες flash lamp Xenon

Οι λυχνίες εκπέμπουν πολύ περισσότερη ένταση φωτός αλλά για συντομότερο χρονικό διάστημα απ' ό τι τα LED. Σε 1ms, για παρόμοια μεγέθη δέσμης και εντάσεις, ένα LED θα ήταν 320 φορές μεγαλύτερο σε διάρκεια από ένα Xenon Flash από την άλλη ένα Xenon θα παρήγαγε 300 φορές περισσότερο φως . Παρακάτω βλέπουμε αντίστοιχα σχεδιαγράμματα και πίνακες με στατιστικά δεδομένα σύγκρισης.



Εικόνα 20 : Συγκριτική απεικόνιση των Led και της φλασολαμπας Xenon

LED vs Λαμπτήρες αλογόνου

Οι λαμπτήρες LED μπορούν να χρησιμοποιούν έως και 80% τοις εκατό λιγότερη ενέργεια από τους λαμπτήρες αλογόνου. Οι λαμπτήρες LED είναι πιο ακριβοί, αλλά αναπληρώνουν το κόστος τους με την πάροδο του χρόνου εξοικονομώντας ενέργεια και αποτρέποντας τις συχνές αντικαταστάσεις των λαμπτήρων. Οι λαμπτήρες LED είναι γενικά αδιάσπαστοι. Οι λαμπτήρες LED είναι πιο δροσεροί στην αφή μετά τη χρήση

| LED | Halogen Bulbs |
|--|--|
| Τα LED είναι ημιαγωγίμες συσκευές που εκπέμπουν φως επιτρέποντας τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτά. | Τα αλογόνα είναι ένα είδος λαμπτήρα πυρακτώσεως που περιβάλλεται από αέριο αλογόνου με νήματα βολφραμίου σε συμπαγή περίβλημα χαλαζία. |
| Τα LED έχουν αναμενόμενη διάρκεια ζωής 50.000 ώρες που ισούται με 13,5 χρόνια. | Έχουν χαμηλή αναμενόμενη διάρκεια ζωής περίπου 3.000 έως 3.500 ώρες που είναι περίπου 1 έτος. |
| Υψηλότερο κόστος από τους λαμπτήρες αλογόνου | Το αρχικό κόστος είναι χαμηλότερο από τα LED. |
| Συνήθως έχουν ένδειξη CRI 80, αλλά τα προηγμένα μοντέλα φτάνουν έως και 98. | Αυτοί οι λαμπτήρες έχουν ένδειξη CRI 100, η οποία είναι ίδια με το τυπικό φως της ημέρας. |

1. Βασικά στοιχεία LED και αλογόνου

Τα LED είναι ημιαγωγοί που επιτρέπουν σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει μέσα από αυτά και να παράγει φως στη διαδικασία. Διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα. Άρα, τεχνικά μιλώντας, είναι δίοδοι που εκπέμπουν φως επιτρέποντας στο ρεύμα να τις διέρχεται προς μία μόνο κατεύθυνση. Με βάση το ημιαγωγίμο υλικό, το φως μπορεί να ποικίλει από υπέρυθρο σε οποιοδήποτε χρώμα από το φάσμα.

Από την άλλη πλευρά, τα φώτα αλογόνου είναι μια διαφορετική άποψη για τους λαμπτήρες πυρακτώσεως που χρησιμοποιούν το νήμα που περιβάλλεται από αέριο σε ένα μικρό συμπαγές γυάλινο φάκελο. Χρησιμοποιούν ένα νήμα βολφραμίου όπως ο λαμπτήρας πυρακτώσεως, αλλά είναι πολύ πιο συμπαγείς.

2. Αποτελεσματικότητα LED και αλογόνου

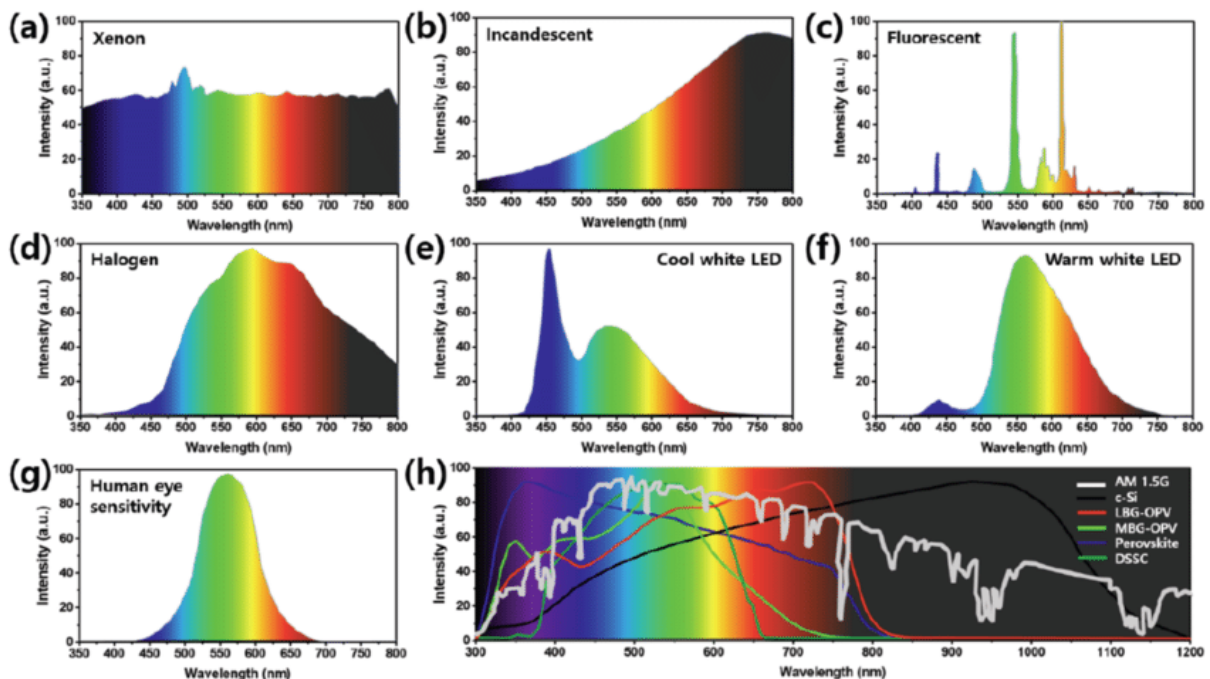
Αυτό το χαρακτηριστικό εκφράζεται σε μοναδιαία lumens ανά watt. Είναι η αναλογία μεταξύ του παραγόμενου φωτός προς την κατανάλωση ενέργειας. Με απλούς όρους,

είναι η ποσότητα του ορατού φωτός που παράγεται από την πηγή φωτός ή τους λαμπτήρες.

Έτσι, συνήθως ένας λαμπτήρας αλογόνου 100 watt θα παράγει 1.750 lumens ορατού φωτός, επομένως δίνει απόδοση 17,5, ενώ κάθε κοινός λαμπτήρας LED 15 watt θα παράγει 1400 lumens ορατού φωτός που καθιστούν την αποτελεσματικότητά του άφογη 93% . Η υψηλότερη αποτελεσματικότητα δείχνει ότι περισσότερο φως παράγεται με την ίδια ποσότητα ενέργειας.

Συμπερασματικά τα LED και οι λαμπτήρες αλογόνου είναι οι δύο πιο συνηθισμένοι τύποι λαμπτήρων. Η ανθεκτικότητα σε συνδυασμό με την υψηλότερη αποτελεσματικότητα κάνει τους λαμπτήρες LED καλύτερους από τους λαμπτήρες αλογόνου με περισσότερους από έναν τρόπους.

Έτσι, τα LED είναι ικανοί να παράγουν φωτεινότερα λευκά φώτα σε σύγκριση με τα κίτρινα φώτα των αλογόνων. Επιπλέον, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, απαιτούν λιγότερη ενέργεια και εκπέμπουν λιγότερη θερμότητα από τα φώτα αλογόνου. Έτσι, τα LED είναι συνήθως μπροστά σε όλες σχεδόν τις πτυχές.



Σχήμα απεικόνισης διάφορων φασμάτων λυχνιών - λαμπτήρων ως προς το μήκος κύματος.

5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΨΥΞΗΣ

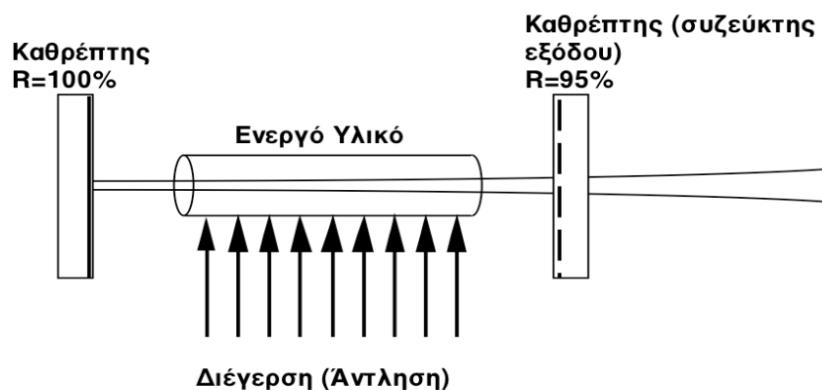
Για λόγους απλότητας επιλέχθηκε αερόψυκτο σύστημα με την προοπτική ότι αρχικά το σύστημα δεν θα “φορτωθεί” με μεγάλες ισχύς. Επίσης το λέιζερ είναι σε πειραματικά στάδια και έτσι θα είναι ευκολότερο στις αρχικές μετατροπές που θα γίνονται μέχρι να ανάψει. Σαφώς σε δεύτερο χρόνο υπάρχει δυνατότητα για σύστημα ψύξης.

6. ΚΑΘΡΕΦΤΕΣ - ΑΝΤΗΧΕΪΟ

Όπως υπάρχει ο *μηχανισμός διέγερσης* δηλαδή στην συγκεκριμένη περίπτωση τα Led τα οποία φωτοβολούν εντός της ράβδου Nd : Yag και δημιουργούν την οπτική άντληση (διέγερση με φωτόνια), έτσι υπάρχει και ο *μηχανισμός ανάδρασης*. Ο μηχανισμός ανάδρασης επιστρέφει πίσω, στο εσωτερικό του ενεργού υλικού, μέρος της HMA Laser που έχει δημιουργηθεί. Συνήθως επιτυγχάνεται με τη βοήθεια καθρεφτών, στα δύο άκρα του ενεργού υλικού, τοποθετημένων με τρόπο που να εξαναγκάζει την HMA 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 HMA Laser.

Βασική Διάταξη Laser



Εικόνα 21 : Διάταξη συστήματος λέιζερ

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 ακτίνας καθόσον στη δέσμη παραμένουν μόνο τα φωτόνια που διατηρούν πορεία με διεύθυνση κάθετη στις επιφάνειες των καθρεφτών. Γενικά όσο μεγαλύτερη ανακλαστικότητα υπάρχει στους καθρέφτες τόσο ευκολότερα ξεκινάει το λέιζερ καθώς περιορίζεται το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας στο εσωτερικό αλλά το αρνητικό εδώ είναι ότι υπάρχει μικρή διαρροή στο εξωτερικό άρα λιγότερο ισχυρό λέιζερ. Όσο θα πέφτει η ανακλαστικότητα στον καθρέφτη εξόδου θα αυξάνεται η έξοδος αλλά θα πέφτει η ένταση στο εσωτερικό.

Γενικά το αντηχείο χαρακτηρίζεται για :

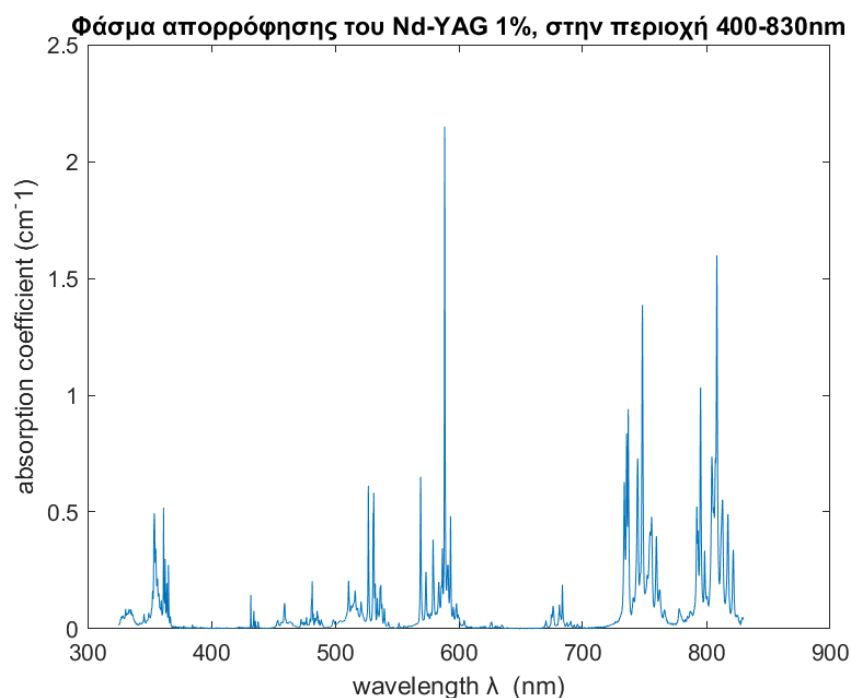
- Καμπυλότητα των καθρεφτών
- Ανακλαστικότητα των καθρεφτών

Στο σύστημα που δημιουργήθηκε θα ξεκινήσει η λειτουργία του με σύστημα παράλληλων επιπέδων καθρεπτών όπου θα δώσει το πλεονέκτημα εκμετάλλευσης όλου του όγκου του κρυστάλλου. Έχοντας βέβαια παράλληλους και επίπεδους καθρέφτες θα ευνοηθούν οι εγκάρσιοι ρυθμοί κύματος όπου όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.6.1 επηρεάζονται ιδιαίτερος από την καμπυλότητα και την ασυμμετρία άντλησης, που τελικά επηρεάζει την μορφή της δέσμης, το spot της δέσμης, που είναι σημαντικό για τις κατεργασίες και για την τελική μορφή που θα έχει η δέσμη του λέιζερ μας. Τους διαμήκης του επηρεάζει το εύρος του ενεργού υλικού και η απόσταση των καθρεφτών ώστε να χωράνε όσο το δυνατό περισσότερα $\lambda/2$.

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

7. Θεωρητική μελέτη λειτουργίας του Laser στερεάς κατάστασης αντλούμενου από Led ισχύος

Ας προσεγγίσουμε θεωρητικά την ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από τον κρύσταλλο όταν εκπέμπουμε σε αυτόν κάποια watt ενός led. Αρχικά έχουμε το φάσμα απορρόφησης του λέιζερ στερεάς κατάστασης από γρανίτη αλουμινίου υτρίου με πρόσμιξη νεοδυμίου $Nd:Y_3Al_5O_{12}$ ή αλλιώς Nd:YAG. Η απορρόφηση $A(\lambda)$ είναι ανάλογη του πάχους του δείγματος του υλικού d , επομένως διαιρώ με αυτό το πάχος $a = \frac{A}{d}$, ώστε να λάβουμε ένα φάσμα- διάγραμμα a -absorption(λ) ανεξάρτητο του πάχους της ράβδου. Στην δική μας περίπτωση είναι 5 χιλιοστά κι επειδή είναι κύλινδρος θα πάρω ότι $d = \frac{2}{3}$ επί της διαμέτρου του κυλινδρου. Έτσι παίρνω λοιπόν το φάσμα του συντελεστή οπτικής απορρόφησης της δικής μου ράβδου που δίνει ποιοτικές αλλά και ποσοτικές πληροφορίες για την σύσταση του υλικού.

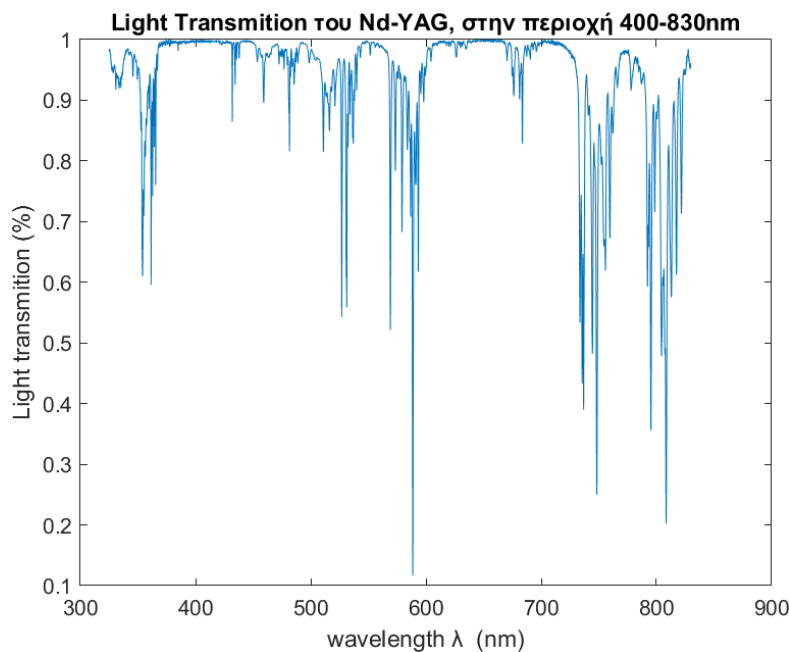


Εικόνα 22 : Τα στοιχεία του διαγράμματος απορρόφησης είναι από την μέτρηση φάσματος Nd:YAG της βάσης δεδομένων της NASA οι τιμές είναι από το 350 έως το 830 δηλαδή 480 τιμές οι οποίες μέσω του προγράμματος MATLAB εντάχθηκαν σε ένα διάγραμμα μέσω κώδικα στο πρόγραμμα που στον έναν άξονα έχει την απορρόφηση και στον άλλον το μήκος κύματος, ώστε να μας δείχνει την απορρόφηση ανα εκατοστό ως προς το μήκος κύματος. Η απεικόνιση έγινε επίσης μέσω κώδικα στο MATLAB.

Χρησιμοποιώντας το μήκος κύματος υπολογίζεται η διαπερατότητα $T(\lambda)$ του υλικού. Αυτή εκφράζεται σαν καθαρός αριθμός από 0-100%, ίσος με το πηλίκο της έντασης φωτός που διέρχεται από το μείγμα προς την ένταση που καταγράφεται χωρίς το μείγμα, σε κάθε μήκος κύματος χωριστά. Αυτός ισούται με

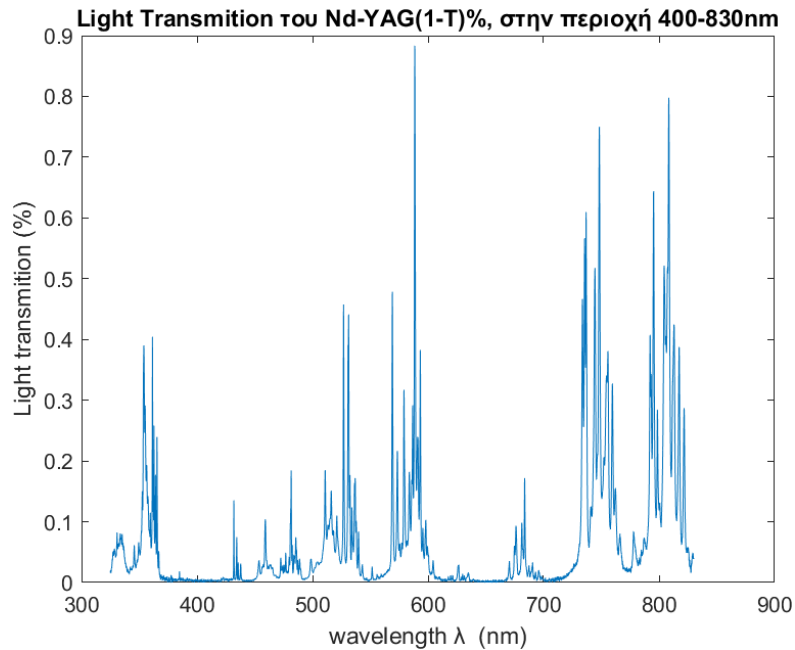
$$A = \ln \frac{1}{T} = -\ln T \Rightarrow T = e^{-A} = e^{-a*d}, \text{ ο λόγος που υπολογίζουμε την}$$

απορρόφηση λογαριθμικά είναι γιατί το αποτέλεσμα είναι ανάλογο της περιεκτικότητας του υλικού σε άτομα/μόρια/ιόντα που απορροφούν. Αλλά και ο Νόμος του Beer μας υποδεικνύει την λογαρίθμηση για να μετατραπεί η εκθετική συνάρτηση σε γραμμική. Καταλήγοντας λοιπόν στο παρακάτω διάγραμμα διαπερατότητας $T(\lambda)$ του υλικού μας :



Εικόνα 23 : Διαπερατότητα του φωτός στον κρύσταλλο Nd: YAG

Γενικά ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη η απορρόφηση τόσο χαμηλότερη η διαπερατότητα. Τα Led που θα χρησιμοποιήσουμε εμείς και το μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει βρίσκεται στα 400nm -700nm (ορατό). Εφόσον έχουμε την διαπερατότητα από το προηγούμενο γράφημα μπορώ τώρα να αφαιρέσω από το 100% για κάθε μήκος κύματος, έτσι κάνω $(1-T)\%$:



Εικόνα 24: Αντιστροφή της προηγούμενης μορφής για μία πιο βολική απεικόνιση.

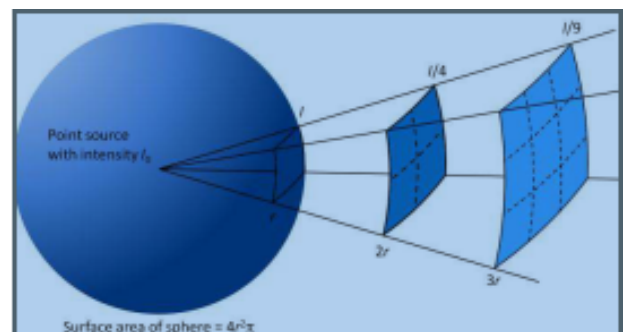
Έχουμε πλέον φέρει το διάγραμμα μας σε μία πιο βολική μορφή και είναι ξεκάθαρη η διαπερατότητα του Nd:YAG ως προς το μήκος κύματος λ (nm).

Είναι σημαντικό για την μελέτη μας να δούμε την οπτική ισχύς που θα παραχθεί από την ένταση των LED και θα απορροφηθεί εντός της ράβδου.

Οπτική ισχύς

Η ένταση μιας πηγής φωτός εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση.

Φανταστείτε μια λάμπα φωτός που εκπέμπει φως εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις όπως στην παρακάτω εικόνα. Η ένταση είναι μεγαλύτερη στο κέντρο και μειώνεται με την αύξηση της απόστασης r



Η μείωση της έντασης ακολουθεί τον αντίστροφο τετραγωνικό νόμο του φωτός. Αυτό σημαίνει ότι σε απόσταση διπλάσια από την πηγή φωτός, το φως απλώνεται σε μια περιοχή που είναι τέσσερις φορές

μεγαλύτερη. Ως εκ τούτου, η ένταση είναι μόνο ένα - τέσσερα εάν η αρχική ένταση l_0

$$l = \frac{l_0}{4 * r^2 * \pi}$$

Η ένταση του προσπίπτοντος φωτός στο εξής αναφέρεται ως P_{in} οπτικής ισχύος και χρειάζεται για να υπολογιστεί η αποδοτική η

$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} * 100\%$, το ποσοστό της απόδοσης της οπτικής ισχύος για κάθε λαμπτήρα LED. Το P_{max} είναι η μέγιστη ισχύς σε σταθερή ένταση φωτός.

Η ποσότητα του ρεύματος εξαρτάται από την ισχύ του φωτός καθώς και από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός. Η σχέση αυτή ονομάζεται ανταπόκριση του LED (Responsivity - R_{pd}). Μετρείται σε συνθήκες βραχυκυκλώματος (0 V) και συνήθως υποδεικνύεται στο φύλλο δεδομένων μιας φωτοδιόδου

Η ανταπόκριση R_{pd} μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η οπτική ισχύς του φωτός που φωτοβολεί σε μία επιφάνεια από την φωτοδίοδο.

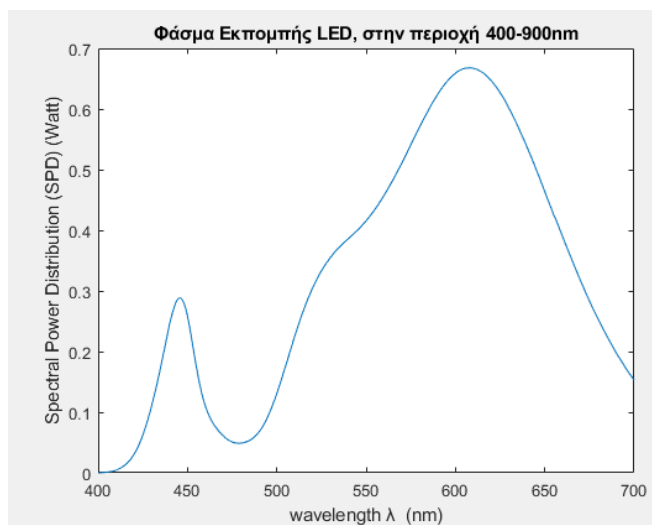
$R_{pd} = \frac{i_{pd}}{R_{pd}}$, i_{pd} είναι η πυκνότητα ρεύματος που δημιουργείται από τη φωτοδίοδο υπό συνεχή φωτισμό.

Παρακάτω μέσω της διαδικασίας πειραμάτων θα βρεθούν τα P_{max} και P_{in} που θα έχουμε από τα Led που θα χρησιμοποιηθούν επομένως θα μπορούμε να υπολογίσουμε την οπτική ισχύς θεωρητικά ακόμα και πειραματικά για κάθε Led ή ακόμα και για το τελικό Led που θα επιλεγεί για την διάταξη του Λείζερ.

7.1 Μελέτη θερμού λευκού φωτός

Για να εξάγω το συμπέρασμα της διαπερατότητας πρέπει να έχουμε και σαν δεδομένο τι εισάγουμε ή τι θέλουμε να εισάγουμε εντός της ράβδου . Παίρνω λοιπόν το φάσμα εκπομπής ενός LED ισχύος θερμού λευκού και πιο συγκεκριμένα του Philips MASTER LEDspot MV Dimmable: LED - 2700K (warm white). Περισσότερα χαρακτηριστικά του Led είναι :

- 12 watt ηλεκτρική ισχύς
- 500 Lumens σύμφωνα με τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής

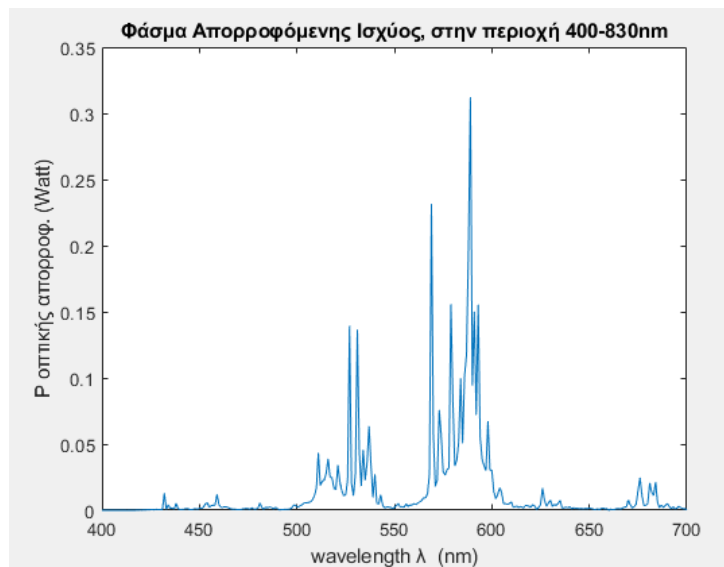


Εικόνα 25 : Για το φάσμα εκπομπής LED βρέθηκαν οι τιμές του φάσματος εκπομπής του Philips MASTER LEDspot MV Dimmable: LED - 2700K από ιστοσελίδα με όνομα "National Gallery " όπου παρέχει τα φάσματα εκπομπής πολλών LED σε ψηφιακή μορφή.

Στη ραδιομετρία, τη φωτομετρία και την επιστήμη των χρωμάτων, μια μέτρηση φασματικής κατανομής ισχύος (SPD) περιγράφει την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα μήκους κύματος ενός φωτισμού (ακτινοβολία εξόδου). Γενικότερα, ο όρος φασματική κατανομή ισχύος μπορεί να αναφέρεται στη συγκέντρωση, ως συνάρτηση του μήκους κύματος, οποιουδήποτε ραδιομετρικού ή φωτομετρικού μεγέθους (π.χ. ενέργεια ακτινοβολίας, ροή ακτινοβολίας, ένταση ακτινοβολίας, ακτινοβολία, ακτινοβολία, έξοδος ακτινοβολίας, ραδιοσυχνότητα, φωτεινότητα, φωτεινή ροή , φωτεινή ένταση, φωτεινότητα, φωτεινή εκπομπή).

Η γνώση του SPD είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές συστημάτων οπτικών αισθητήρων. Οι οπτικές ιδιότητες όπως η διαπερατότητα, η ανακλαστικότητα και η απορρόφηση καθώς και η απόκριση του αισθητήρα συνήθως εξαρτώνται από το προσπίπτον μήκος κύματος

Αντιστοιχίζω και συνυπολογίζοντας τα δύο φάσματα παίρνω την ισχύ που περιμένω να περάσει από το LED ισχύος στον κρύσταλλο Nd:YAG. Ο υπολογισμός έγινε μέσω του Matlab παίρνοντας το ολοκλήρωμα κάθε σημείου του μήκος κύματος για να υπολογιστεί το εμβαδόν που δημιουργείται από το φάσμα της διαπερατότητας και της εκπομπής του LED δημιουργώντας το φάσμα απορροφούμενης ισχύς εντός του κρυστάλλου.



Εικόνα 26 : Αποτέλεσμα για το λευκό θερμό Led. Το μήκος κύματος περιορίστηκε όπως φαίνεται στο ορατό φάσμα.

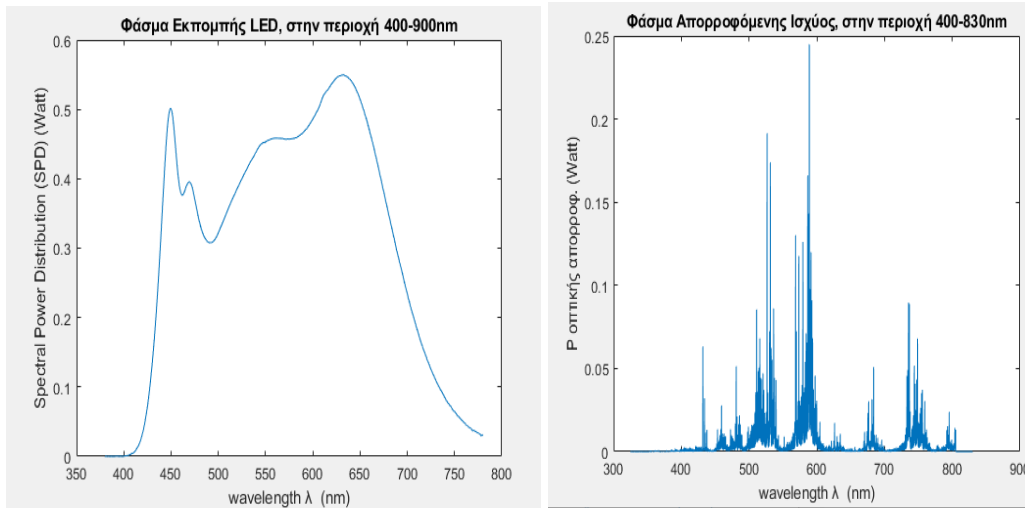
Η ισχύς που θα περάσει σε κάθε μήκος κύματος. Έχοντας πλέον το παραπάνω διάγραμμα, μπορώ να εξάγω την τελική απορροφούμενη ισχύς σαν αριθμό από :

$$watt = \int_{330}^{700} \Sigma P_{\lambda} = \int_{330}^{700} \Sigma P_{ολ(opt) αντλησης} (watt) = 0.612 watt$$

Καταλήγοντας επομένως στο συμπέρασμα ότι αν εκπέμψω 12 ηλεκτρικά watt από ένα LED ισχύος θα περάσουν μόλις τα 0.612 ηλεκτρικά watt εντός της ράβδου. Πηγαίνοντας πιο προσεγγιστικά στο διάστημα 400-700 nm το οποίο είναι και το διάστημα που θα προσεγγίσουμε στο πείραμα μας το αποτέλεσμα απορροφούμενης οπτικής ισχύς είναι **5.1%**. Θα πρέπει να γίνει έρευνα και για τα άλλα λευκά led όπως λευκό φυσικό και λευκό ψυχρό και αν είναι δυνατόν και άλλα χρώματα όπως κίτρινο που φέρνει προς το θερμό ή amber led (χρώμα).

7.2 Μελέτη φυσικού λευκού φωτός

Αν ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία για ένα λευκό LED φωτισμού στα 4000K , 12 (watt) όπου εκεί βρίσκεται το λευκό (470 lumens) σύμφωνα με τον κατασκευαστή, τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής θα είναι **4.51%** λίγο χαμηλότερα από το θερμό λευκό.

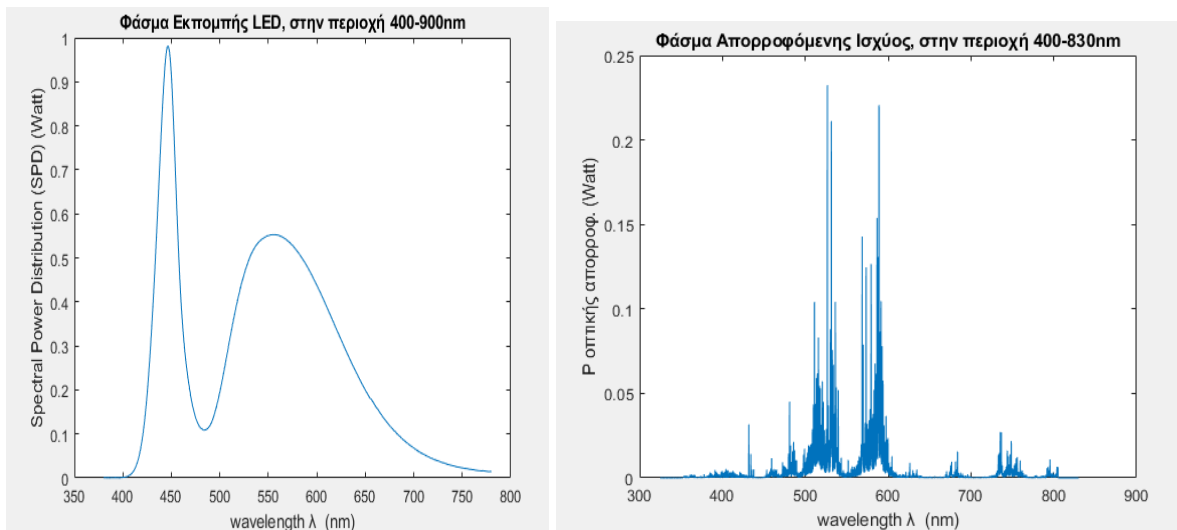


Εικόνα 27 & 28 : Φάσμα εκπομπής του LED & αποτέλεσμα ως προς το μήκος κύματος

Τα αποτελέσματα πάλι δόθηκαν μέσω του προγράμματος MATLAB ύστερα από εκτέλεση κώδικα (προσωπικά γραμμένο) που υπολογίζει το σύνολο της οπτικής απορρόφησης με λευκό led στον κρύσταλλο Nd:YAG

7.3 Μελέτη ψυχρού λευκού φωτός

Η τρίτη επιλογή θα ήταν ένα cool white led TOSHIBA LED *E-CORE PAR30 14W* σύμφωνα με τον κατασκευαστή εκπέμπει 780 lumen, θεωρήθηκε αρκετά κοντά στα υπόλοιπα ώστε να υπάρχει μια ισότητα των led όσον αφορά τις προδιαγραφές. Κάνοντας πάλι λοιπόν την διαδικασία τα αποτελέσματα είναι της τάξης του **4.6%** οπτικής απορρόφησης. Παρατηρούμε εδώ ότι ενώ ανέβηκαν τα watt της λυχνίας κατά **2 watt** και τα lumen σύμφωνα με τις προδιαγραφές περίπου κατά 300 η τιμή της οπτικής απορρόφησης θα λέγαμε ότι δεν ξέφυγε παρόλο τις λίγο υψηλότερες προδιαγραφές. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το ψυχρό φως δεν απορροφάται τόσο καλά όσο το θερμό αλλά η περισσότερη ισχύ που του δώσαμε ισορρόπησε την απώλεια και για αυτό οι τιμές δείχνουν τόσο κοντά.



Εικόνα 29 & 30 : : Φάσμα εκπομπής του LED & αποτέλεσμα ως προς το μήκος κύματος.

Συγκεντρωτικά έχουμε τον παρακάτω πίνακα με τις τιμές των αποτελεσμάτων της οπτικής απορρόφησης ισχύος για κάθε κατηγορία Led που βρέθηκε σαν φάσμα απορρόφησης ώστε να χρησιμοποιηθεί στην έρευνα. Να τονιστεί εδώ ότι τα Led της έρευνας ήταν τυχαία επιλεγμένα στο χρώμα που ήθελα ώστε να πάρουμε όσο το δυνατόν καλύτερο ποσοστό για να συγκρίνουμε αποτελέσματα θεωρητικά. Παρακάτω που θα πραγματοποιηθούν οι πειραματικές μελέτες, αυτές θα γίνουν με led ίδιων προδιαγραφών ως προς την βαττική ισχύ.

| | Θερμό λευκό 12W 500 Lumen | Φυσικό λευκό 12 Watt 470 Lumen | Ψυχρό λευκό 14 Watt 580 Lumen |
|---|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Αποτελέσματα Απορρόφησης Οπτικής Ισχύος (%) | 5.1 | 4.51 | 4.6 |

Συμπέρασμα της θεωρητικής μελέτης είναι :

- Το θερμό λευκό led παρόλο των λιγότερων watt είναι πιο απορροφητικό από το ψυχρό. Αυτό εξηγείται καθώς το θερμό χρώμα είναι πιο κοντά στο κίτρινο και πιο κοντά στο μήκος κύματος που εκπέμπει η ράβδους Nd :
- Πιθανότατα ένα Led με την απόχρωση κίτρινου ή amber Led θα είναι ακόμα πιο διαπερατό ως προς την ράβδο. Δυστυχώς δεν βρέθηκε σε ψηφιακή μορφή κάποιο δείγμα για να γίνει περαιτέρω μελέτη επί τούτου.
- Προς το παρόν είναι άγνωστο αν τα παραπάνω watt είναι σημαντικά για την τελική επιλογή αποχρωσις του led, μένει να αποδειχθεί στην πράξη.

7.4 Quantum defect

Ας ξεκινήσουμε αρχικά από το τι σημαίνει **ΚΒΑΝΤΙΣΜΟΣ**. Τα λέιζερ είναι ουσιαστικά κβαντομηχανικές συσκευές. Δηλαδή, η λειτουργία ενός λέιζερ εξαρτάται πλήρως από την κβαντική φύση του φωτός και της ύλης. Ας εξηγήσουμε τι σημαίνει αυτό. Πριν από το 1900, οι επιστήμονες πιστεύουν ότι η ενέργεια θα μπορούσε να ποικίλλει συνεχώς και να διαιρείται ατελείωτα. Κανένα πείραμα δεν παρείχε στοιχεία που να αντικρούουν αυτήν την άποψη. Το 1900, ένας Γερμανός φυσικός, ο Max Planck πρότεινε ότι η ενέργεια θα μπορούσε να εκπέμπεται ή να απορροφάται μόνο σε διακριτές δέσμες που είναι πολλαπλάσια μιας θεμελιώδους μονάδας, ή κβαντική, της ενέργειας. Αυτή η σχέση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E = n \cdot h \cdot f ,$$

όπου $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ονομάζεται σταθερά του Planck. Το f είναι η συχνότητα ταλάντωσης; και n είναι ένας θετικός ακέραιος. Δηλαδή, η ενέργεια θα μπορούσε να αναπαρασταθεί σε ακέραιες ποσότητες: hf , $2hf$, $3hf$, κλπ. Επειδή η ενέργεια μπορεί να πάρει μόνο συγκεκριμένες τιμές, λέμε ότι είναι «κβαντισμένη». Φανταστείτε αμμόλοφους άμμου που φαίνονται ομαλοί από απόσταση, αλλά στην πραγματικότητα είναι χόνδροι και κοκκώδεις όταν παρατηρούνται από κοντά. Η σταθερά του Planck είναι αρκετά μικρή ώστε να μην παρατηρούμε την κβαντοποίηση της ενέργειας στην καθημερινότητά μας - τα κβαντικά πακέτα ενέργειας είναι πολύ μικρά για να γίνουν αντιληπτά από τις αισθήσεις μας.

Περνώντας τώρα στην **κβαντική απόδοση (Φ)** είναι μια διαδικασία που προκαλείται από *ακτινοβολία είναι ο αριθμός των φορών που συμβαίνει ένα συγκεκριμένο γεγονός ανά φωτόνιο* που απορροφάται από το σύστημα. Στα περισσότερα λέιζερ, το μήκος κύματος του λέιζερ είναι μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της άντλησης (εξαιρέση: λέιζερ ανοδικής μετατροπής). Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια των φωτονίων λέιζερ είναι μικρότερη από αυτή των φωτονίων άντλησης – υπάρχει μια λεγόμενη *Stokes shift*. Κατά συνέπεια, η απόδοση ισχύος του λέιζερ δεν θα μπορούσε να είναι 100% ακόμη και αν κάθε φωτόνιο αντλίας μπορούσε να μετατραπεί σε φωτόνιο λέιζερ.

Η κβαντική απόδοση ορίζεται από το κλάσμα των φθοροφόρων διεγερμένης κατάστασης που διασπώνται μέσω του φθορισμού:

$$\Phi_f = \frac{k_f}{k_f + \sum k_{nr}}$$

όπου Φ_f είναι η κβαντική απόδοση φθορισμού, k_f είναι η σταθερά ρυθμού για χαλάρωση ακτινοβολίας (φθορισμός), k_{nr} είναι η σταθερά ρυθμού για όλες τις διαδικασίες χαλάρωσης χωρίς ακτινοβολία. Οι μη ακτινοβολούμενες διεργασίες είναι μηχανισμοί αποσύνθεσης διεγερμένης κατάστασης εκτός από την εκπομπή φωτονίων, οι οποίοι περιλαμβάνουν: μεταφορά ενέργειας συντονισμού Förster, εσωτερική μετατροπή, εξωτερική μετατροπή και διασταύρωση μεταξύ συστημάτων. Είναι ένα είδος απώλειας που πρέπει να συνυπολογιστεί με τις υπόλοιπες για να φτάσουμε στο τελικό θεωρητικό μήκος απωλειών. Σε πιο απλή ερμηνεία των όρων είναι ο λόγος $\frac{E_{\text{photon εκπομπής}}}{E_{\text{photon άντλησης}}}$, καλό θα ήταν να το υπολογίσουμε για κάθε μπάντα ξεχωριστά ώστε να δούμε τι απόδοση υπάρχει στο μπλε και στο κίτρινο.

Το μπλε βρίσκεται στο 450-495 nm μήκος κύματος, το κίτρινο βρίσκεται 495-570 nm, το μήκος κύματος του Nd : YAG είναι γνωστό ότι βρίσκεται στα 1064 nm. Με τον παρακάτω τύπο θα υπολογίσω την κβαντική απόδοση που θα έχουμε σε κάθε μία μπάντα ξεχωριστά

$$q = h\nu_{\text{pump}} - h\nu_{\text{laser}} = h\nu_{\text{pump}} \cdot \left(1 - \frac{h\nu_{\text{laser}}}{h\nu_{\text{pump}}}\right) = h\nu_{\text{pump}} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{\text{pump}}}{\lambda_{\text{laser}}}\right)$$

Στην επιστήμη των λέιζερ, ο όρος Quantum defect ;ή στα ελληνικά "κβαντικό ελάττωμα" αναφέρεται στο γεγονός ότι η ενέργεια ενός φωτονίου άντλησης είναι γενικά υψηλότερη από εκείνη ενός φωτονίου σήματος (φωτόνιο της ακτινοβολίας εξόδου). Η διαφορά ενέργειας χάνεται από τη θερμότητα. Το κβαντικό ελάττωμα ενός λέιζερ μπορεί να οριστεί ως μέρος της ενέργειας του φωτονίου άντλησης, το οποίο χάνεται (δεν μετατρέπεται σε φωτόνια στο μήκος κύματος λέιζερ) στο μέσο απολαβής κατά την παραγωγή του λέιζερ.

| ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (nm) | ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ % | ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| ΜΠΛΕ (450-495) | 57.7 % - 53.5 % | 1.58 eV - 1.33 eV |
| ΚΙΤΡΙΝΟ (495-570) | 53.5 % - 46.4 % | 1.33 eV - 1.01 eV |

Συνοψολογίζοντας την απόδοση της τάξεως 4.51-5.1 % τελικής απορρόφησης εντός της ράβδου που βγάλαμε απο τα θεωρητικά μας πειράματα με την κβαντική απόδοση, το αποτέλεσμα αυτών των δύο θα ρίξει κι άλλο την απόδοση ισχύος που περιμένουμε να περάσει εντός της ράβδου λίγο πάνω από το μισό της τελικής απορρόφησης. *Αυτό δηλαδή που περιμένω να δω είναι ένα 2.76% από τα watt ή τα lumen που εκπέμπω πάνω στην ράβδο.* Συμπερασματικά το 2.76% αντιστοιχεί στο 0.33 W των αρχικών 12 W ηλεκτρικής ισχύς. Εδώ είναι στιγμή βέβαια για να σκεφτούμε και το παλμικό λέιζερ αντί του συνεχές ώστε να αυξήσουμε την δύναμη του λέιζερ. Είναι κάτι που σε δεύτερο χρόνο θα γίνει αλλά αρχικά θα ξεκινήσουμε με ένα συνεχές τροφοδοτικό και κατ'επέκταση ένα συνεχή λέιζερ. Το παλμικό λέιζερ θα μας επιτρέψει να στρεσάρουμε τα Led και να τα "οδηγήσουμε" με πέντε έως και δέκα φορές περισσότερο ρεύμα που είναι θεωρητικά και το όριο ώστε για να μην τα κάψουμε. Έτσι επιτυγχάνεται ένα led των 12 watt να δώσει στιγμιαία κοντά στα 120 watt ηλεκτρικά και αν η διάρκεια του παλμού είναι αρκετή να εναποθέσουν τα Led όση ενέργεια μπορούνε στον κρύσταλλο και αυτός να την απορροφήσει. Καλό θα είναι επομένως να μαζευτούν όσο περισσότερα watt γίνεται γύρω από τον κρύσταλλο, ώστε να περάσουμε το ενεργειακό κατώφλι αλλά και για την πιθανή καλύτερη απόκριση του.

Στην επιστήμη των λέιζερ, ο όρος Quantum defect ;ή στα ελληνικά "κβαντικό ελάττωμα" αναφέρεται στο γεγονός ότι η ενέργεια ενός φωτονίου άντλησης είναι γενικά υψηλότερη από εκείνη ενός φωτονίου σήματος (φωτόνιο της ακτινοβολίας εξόδου). *Η διαφορά ενέργειας χάνεται από τη θερμότητα.* Το κβαντικό ελάττωμα ενός λέιζερ μπορεί να οριστεί ως μέρος της ενέργειας του φωτονίου άντλησης, το οποίο χάνεται (δεν μετατρέπεται σε φωτόνια στο μήκος κύματος λέιζερ) στο μέσο απολαβής κατά την παραγωγή του λέιζερ.

8. Επιλογή Καταλληλότερου Led

Παρουσίαση ονομαστικών στοιχείων των LED που δοκιμάστηκαν για την επιλογή τους και εφαρμογή τους στο τελικό λείζερ.

8.1 Διαθέσιμα Led

1. High Power STAR Led 3W - White Cold

- Type of diode: Power LED
- LED version: STAR
- LED color: White cold
- Maximum power: 3W
- Color temperature: 4500-5650K
- Luminosity: 249.6-324.5lm
- Led Current : 700mA
- Operating Voltage: 3.1 - 4.1 V



2. High Power Led 1W - Cold White (Emitter)

- Type of diode: Power LED
- LED version: EMITTER
- LED color: White cold
- Maximum power: 1W
- Color temperature: 4500-5650K
- Luminosity: 120-130lm



3. High Power STAR Led 3W - White Warm

Type of diode: Power LED

- LED version: STAR
- LED colour: White warm
- Colour temperature: 2850-3250K
- Luminosity: 92.9-250.9lm
- Viewing angle: 130



- Operating temperature: -40...90°C
- LED current: 700mA
- Operating voltage: 3.1...4.1V

4. Mega LED AR111 11W / 230 V AC dimmable

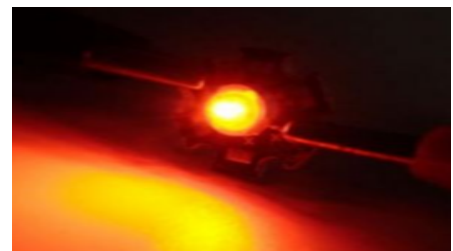
Επιλέγοντας αυτού του είδους την λυχνία led η οποία έχει έντεκα ηλεκτρικά watt είναι σαν δοκιμή για τέτοιου είδους λυχνίες που έχουν μικρότερα led τύπου smd για να δοκιμαστούν αν είναι ίδιου επιπέδου με τα υπόλοιπα ή το γεγονός ότι είναι τόσα πολλά στην πλακέτα όπως φαίνεται και στην εικόνα ώστε να φωτίζουν ικανοποιητικά.

- Type of diode: Power LED
- LED color: Warm white
- Maximum power: 11W
- Size : ,diameter 111mm,length 80mm
- Luminosity: 950 lumens



5. High Power STAR Led 3W - Amber

- Type of diode: Power LED
- LED colour: Amber / Κεχριμπάρι
- Maximum power: 3W
- Luminosity: 99.6-113.6lm
- Wavelength: 587-597 nm
- LED current: 700mA
- Operating voltage: 2...3.25V



Επιλέγω το συγκεκριμένο led καθώς το μήκος κύματος που εκπέμπει και η κυματομορφή του έχει μία υψηλή κορυφή στο μήκος κύματος της ράβδου και είναι πιθανόν να απορροφηθεί περισσότερο φως λόγω αυτού. Όπως

αναφέρθηκε επίσης στη θεωρητική μελέτη τέτοιας απόχρωσης led είναι πιθανό να έχουν καλύτερα αποτελέσματα από τα λευκά led.

6. Power LED 5W white cold



- Diode Type : power LED
- Colour temperature : 6500 K
- Luminosity: 320 lm
- Led current : 1400mA
- Operating voltage : 6.5 - 8 V

Το συγκεκριμένο Led αγοράστηκε χωρίς πεταλούδα καθώς δεν υπήρχε στην αγορά με αυτόνομη ψύκτρα. Αυτό μπορεί να είναι ελάττωμα καθώς καλούμαι να αντιμετωπίσω το πως θα ψυχθεί το led είτε πλεονέκτημα καθώς η ψύκτρα πεταλούδα καταλαμβάνει μεγάλο χώρο σε σχέση με αυτό που θα ήταν ιδανικό για να μπουν περισσότερα leds τέτοιου τύπου. Να επισημανθεί ότι βρέθηκε μόνο 5 Led watt βρέθηκε μόνο για ψυχρό λευκό φως δυστυχώς. Λέω δυστυχώς καθώς οι θεωρητικές μελέτες έδειξαν ότι το θερμό είναι αυτό που θα αποδώσει περισσότερο από οποιαδήποτε άλλο λευκό φως. Ουσιαστικά τώρα φαίνεται να υπάρχει κάποιος ανταγωνισμός του 3 watt θερμού led και του 5 watt ψυχρού led , όλα αυτά θεωρητικά βέβαια πάμε να δούμε και στην πράξη.

8.1.1 Φασματοφωτόμετρο και 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).

Η εισαγωγή αυτή έγινε με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων και τεχνικών που θα χρησιμοποιήσουμε στα πειράματα - μετρήσεις που θα διεξαχθούν.

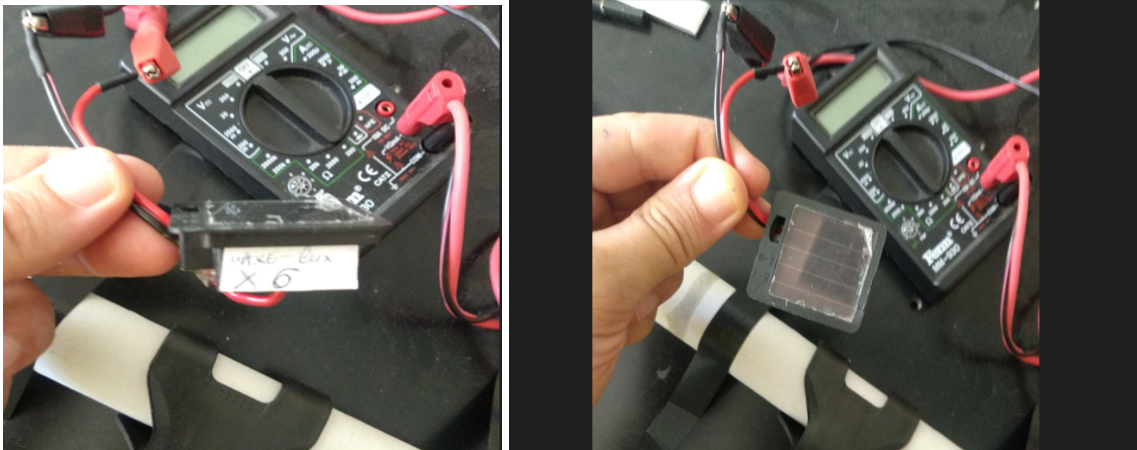
8.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Οι πρώτες μετρήσεις έγιναν με λουξόμετρο όπου τοποθετήθηκε στο σωλήνα χαρτιού όπως φαίνεται και στην εικόνα, η φωτεινότητα του δωματίου το επηρεάζει ελάχιστα στις αρχικές συνθήκες της τάξεως μόνο του 0.01 στο x1. Ο σωλήνας έχει μήκος 30 εκατοστά . Ο σωλήνας έχει διάμετρο 20 cm και ακτίνα $r=10$ cm.



Εικόνα 31 : Λουξόμετρο για τις πρώτες μετρήσεις εντός του εργαστηρίου

Στην συνέχεια έγιναν μετρήσεις και με τον ανιχνευτή από φωτοβολταϊκό panel ώστε να διπλό τσεκάρω τις τιμές που έχω ήδη βρει για ποιο LED είναι καταλληλότερο για την μελέτη και την κατασκευή.



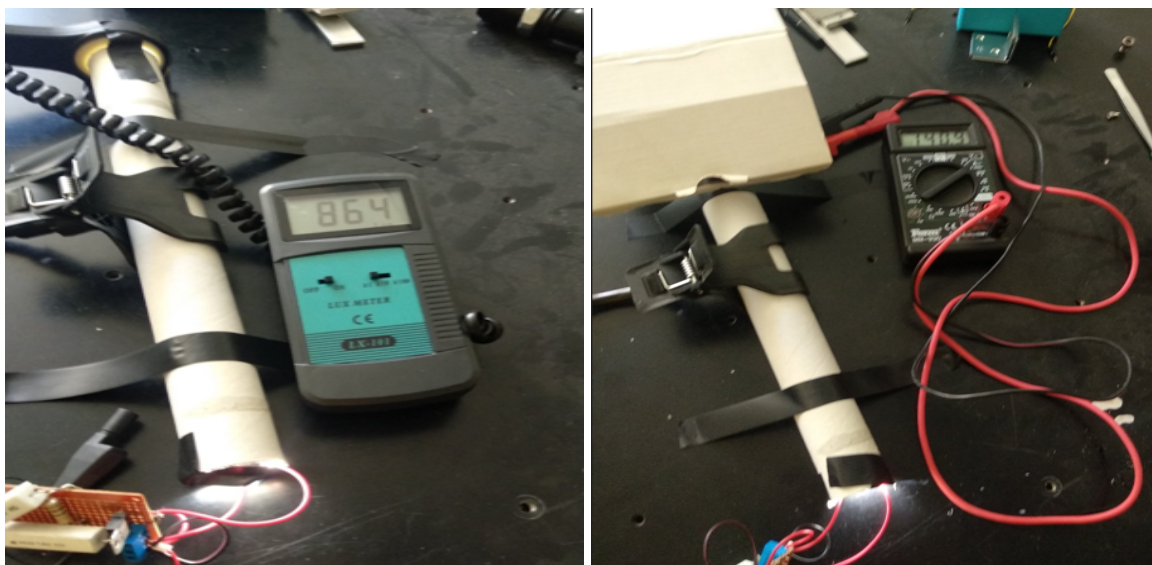
Εικόνα 31 & 32 : Φωτοβολταϊκό πάνελ μέτρησης φωτός. Επάνω αναγράφει ότι τα μA που βρίσκω αν τα πολλαπλασιάσω επί έξι θα μου δίνει την τιμή των μετρούμενων lux σε κάθε περίπτωση.

Ξεκινώντας με το κάθε LED όπως παρουσιάστηκαν αρχικά πάμε να δούμε τις επιδόσεις τους σε κάθε περίπτωση :

8.2.1 Πειράματα και αποτελέσματα

Οι μετρήσεις θα γίνουν με την σειρά που παρουσιάστηκαν παραπάνω τα Led
Επομένως :

1. High Power STAR Led 3W - White Cold



Εικόνα 33 & 34 : Διαδικασία μετρήσεων των LED με δύο διαφορετικούς τρόπους.

Το 1ο LED των 3 Watt η απόδοση του είναι στα **864 lux** όπως βλέπουμε στην αριστερή εικόνα. Στην δεξιά εικόνα κάνουμε την μέτρηση με τον άλλο τρόπο το φωτοβολταϊκό πάνελ για να επιβεβαιώσουμε αν έχουμε ορθή ένδειξη αλλά και ταυτόχρονα να έχουμε περισσότερα δρώμενα για την τελική επιλογή.

Ενώ με τον ανιχνευτή η μετρούμενη τιμή είναι $140.9 \mu\text{A} * 6 = 843.6 \text{ lux}$. Οι τιμές είναι πολύ κοντά έτσι οι μετρήσεις μας θεωρούνται δεκτές.

Η διαδικασία συνεχίστηκε έτσι για όλα τα led και παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις τιμές. Αξίζει να αναφερθεί ότι προστέθηκε μία στήλη με την οπτική ισχύ εξόδου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να υπολογίσουμε την οπτική ισχύ εξόδου από τα μετρημένα lux είναι :

The illuminance E_v in lux (lx) is equal to the luminous flux Φ_v in lumens (lm) divided by the surface area A in square meters (m²):

$$E_v(\text{lx}) = \Phi_v(\text{lm}) / A(\text{m}^2)$$

The illuminance E_v in lux (lx) is equal to the luminous flux Φ_v in lumens (lm) divided by pi the squared sphere radius r in meters (m):

$$E_v(\text{lx}) = \Phi_v(\text{lm}) / (4 \cdot \pi \cdot r^2(\text{m}^2))$$

Επομένως εμείς για να πάρουμε το $\Phi_v(\text{lm}) \Rightarrow \Phi_v(\text{lm}) = E_v(\text{lx}) \cdot (4 \cdot \pi \cdot r^2(\text{m}^2))$, δηλαδή θα έχουμε τα Lumen σε κάθε μία από τις περιπτώσεις. Αμέσως μετά θα διαιρέσουμε τα lumen με τις προδιαγραφές των ηλεκτρικών watt ώστε να βρεθούν τα οπτικά watt και σε συνέχεια η οπτική απόδοση των led. Επίσης προστέθηκε μία στήλη οπτική απόδοσης των led και μία που υπολογίζεται η δυνατότητα συνολικής σύνδεσης - εγκατάστασης όσων εκτιμάται led θα μπουν περιμετρικά της ράβδου καθώς και υπολογιζόμενα watt που θα συγκεντρωθούν τελικά σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας μετρήσεων για τις αποστάσεις τριάντα εκατοστών.

| Επιλογές LED | Ονομαστικά Lumens (lm) (Datasheet) | Μετρήσεις με lux-metre (x100) | Μετρήσεις lux (μΑ * 6) με το 2ο μετρητή | Οπτική Ισχύς εξόδου (lm/W) | Οπτική Απόδοση $P_{\text{οπτ}}/P_{\text{El}}$ | Εκτιμώμενη δυνατότητα συνολικών led στη ράβδο (Watt) |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------|---|----------------------------|---|--|
| 3w cold white | 251-324 | 864 | 845.4 | 86.3 | 0.3 | Οκτώ LED 18 |
| 1w cold white | 120-130 | 156 | 156 | 46.8 | 0.34 | Δεκαέξι LED 5.44 |
| 3w warm white | 92.9 - 251 | 900 | 1094 | 99.67 | 0.57 | Οκτώ LED 24 |
| Mega led 11W | 800 | 463 | 408 | 130.6 | 0.16 | Είκοσι τέσσερα LED 11.44 |
| 3w Amber | 99.6-113.6 | 462 | 918 | 69 | 0.64 | Οκτώ LED 24 |
| 5w white cold | 320 | 890 | 828 | 103.8 | 0.33 | Δεκαέξι LED 56 |
| M.O. | | | | | 0.39 | |

- Για να βρεθεί η οπτική ισχύς από τα μετρημένα lux πάρθηκε η μέση τιμή από τις δύο μετρήσεις που έκανα στο lux μετρο και στο φωτοβολταϊκό πάνελ ώστε στη συνέχεια να μετατραπούν σε αντίστοιχα lumen.
- Στην τελευταία γραμμή στο σύνολο έχει υπολογιστεί η μέση τιμή **οπτικής απόδοσης ισχύος των led με σκοπό να συνυπολογιστεί αργότερα στην μείωση - απώλειας ενέργειας που υφίσταται ο κρύσταλλος από την άντληση των led.**
- Παρατηρήθηκε ότι από την στιγμή που το κάθε LED ισχύος άναβε το ρεύμα μέτρησης πέφτει σταδιακά ρίχνοντας ανά δευτερόλεπτο σταδιακά την φωτεινότητα του και την μέτρηση στο πολύμετρο.
- Δημιουργήθηκε μία στήλη στο τέλος του πίνακα με την πιθανότητα ανάλογα με το μέγεθος του led τοποθέτησης τους στο λέιζερ. Για μήκος απόστασης πάρθηκε αυτό της ράβδου.

8.3 Συμπεράσματα μετρήσεων Led ισχύος

Προκύπτει από τα πειράματα ότι δεν αξίζει να ασχοληθούμε προφανώς με όλα τα led των αρχικών επιλογών για αυτό και θα επιλέξω βάση των αποτελεσμάτων να συνεχίσω με τα

- 5 watt λευκό led
- 3 watt λευκό led (πεταλούδα)
- 3 watt θερμό λευκό led (πεταλούδα)
- 3 watt κεχριμπάρι led (πεταλούδα)

Τα led των 3 watt είχαν καλύτερες αποκρίσεις ατομικά σε σχέση με αυτό των 5 watt σε αυτό βέβαια μπορεί να οφείλεται

- Η εστίαση του φακού που πιθανόν να υπάρχει μπροστά στο led ισχύος του εκάστοτε led. Είναι σημαντική αυτή η πληροφορία καθώς στο led των 5 watt υπάρχουν στο εσωτερικό του 2 δίοδοι led όπως φαίνεται και στην εικόνα επομένως είναι πιθανόν ο εστιακός φακός να μην βοηθάει τόσο πολύ σε μακρινές αποστάσεις όσο βοηθάει τα led των 3 watt.
- Το ελάττωμα των led 3 watt είναι ότι έχουν σχήμα πεταλούδας για ψύξη σε αντίθεση με αυτό των 5 όπου είναι χωρίς ψύξη , αυτό βέβαια σημαίνει ότι αν χρησιμοποιηθεί το 5 watt led θα απασχολήσει εμάς ο τρόπος ψύξης του (έστω και για ένα παλμικό λείζερ).
- Στα Led ισχύος το ρεύμα μέτρησης πέφτει σταδιακά όταν τροφοδοτείται ρίχνοντας ανά δευτερόλεπτο σταδιακά την φωτεινότητα του και την μέτρηση στο πολύμετρο. Άρα η θερμοκρασία είναι εχθρός των led.
- Ο Μέσος Όρος της οπτικής ισχύς των led είναι 39%. Ένα αρκετά καλό ποσοστό απόκρισης αν αναλογιστούμε τις γενικές τιμές που υπάρχουν και κυκλοφορούν. Δηλαδή τα led επιλογής μας είναι σε καλό επίπεδο. Οι πηγές τεχνητού φωτός συνήθως αξιολογούνται ως προς την αποτελεσματικότητα οπτικής ισχύς της πηγής.



| | | | |
|----------------------|---|-----------------------------|------------|
| Light-emitting diode | LED screw base lamp (120 V) | 102 ^{[24][25][26]} | 14.9% |
| | 5–16 W LED screw base lamp (230 V) | 75–210 ^{[27][28]} | 11–30% |
| | 21.5 W LED retrofit for T8 fluorescent tube (230 V) | 172 ^[29] | 25% |
| | Theoretical limit for a white LED with phosphorescence color mixing | 260–300 ^[30] | 38.1–43.9% |

Εικόνα 35 : Η βικιπαίδεια προσφέρει μία τυπική αξιολόγηση led της οπτικής τους απόδοσης.

Παρακάτω θα ελέγξουμε αν το 5 watt led είναι πιο δυνατό και όντως πιο ισχυρό από τα 3 watt ελέγχοντας την εστίαση του αρχικά κάνοντας και πειράματα σε απόσταση των 5 εκατοστών και αμέσως μετά θα κάνω πειράματα φθορισμού για να δω τις αποκρίσεις και να παρθεί η τελική απόφαση για την επιλογή του led.

8.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ- ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΟΝΤΙΝΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ

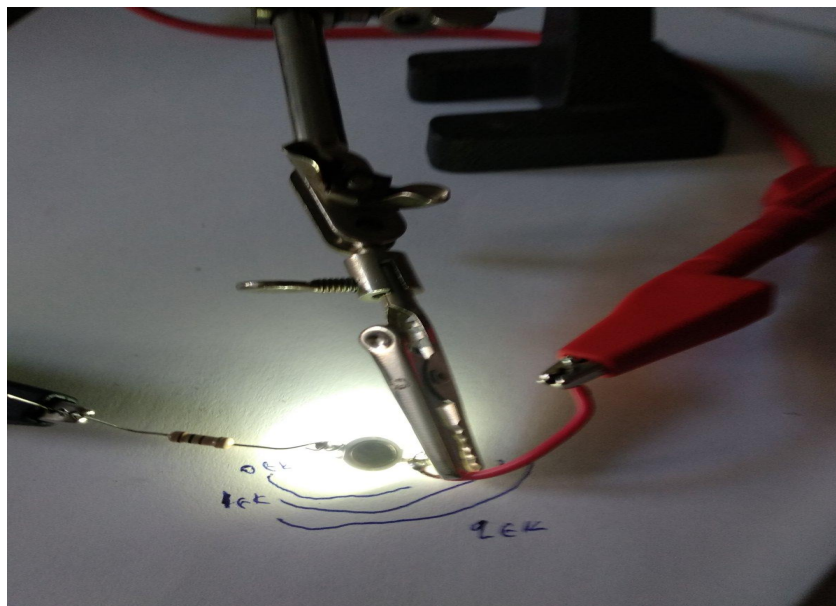
Πειράματα σε πιο κοντινή θέση ώστε να εντοπίσουμε το πιο ισχυρό εκ αυτών των τεσσάρων led ισχύος που πέρασαν την πρώτη διαδικασία. Σίγουρα η τελική θέση των led θα είναι της τάξης του 1 - 0.3 εκατοστών αλλά προέχουν τα πειράματα τα οποία αν γινόταν σε τέτοια απόσταση πολύ πιθανόν τα αποτελέσματα να ήταν πανομοιότυπα στα περισσότερα led , καθώς τα όργανα μέτρησης που έχουμε δεν είναι τόσο μεγάλης ευκρίνειας. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας των μετρήσεων και των αποτελεσμάτων των led :

| | Lux Meter (lux) | Photovoltaic Panel (mA) |
|---------------|-----------------|-------------------------|
| White Warm 3w | 17000 | 2.5 |
| White Cold 3w | 14000 | 3 |
| Amber 3w | 6000 | 1 |
| White Cold 5w | 23500 | 5 |

Είναι ξεκάθαρη η υπεροχή του 5 watt white cold led ισχύος στα 5 εκατοστά παρόλο που φαίνεται να μην εστιάζει καλά το συγκεκριμένο led ισχύος στις μακρινές αποστάσεις. Τα διπλά led φαίνεται να μην αποτελούν τελικά ελάττωμα στην εστίαση.

8.4.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ

Ένα σημαντικό κομμάτι για την τελική θέση του LED είναι το πόσο αποκλίνει η εστίαση του φωτός που εκπέμπει ανάλογα με την απόσταση από τον κρύσταλλο, ώστε να μην είναι πολύ μακριά από αυτόν και έτσι να διασκορπίζονται τα φωτόνια αντί να τα εισάγουμε στην ράβδο. Έτσι λοιπόν θα κάνουμε ένα μικρό πείραμα- τεστ για τον έλεγχο του κύκλου που εκπέμπει το LED των πέντε watt ανάλογα με τα εκατοστά απομάκρυνσής του από την ράβδο. Οι θέσεις που επιλέγω να το τοποθετήσω είναι 0, 1, 2 και ίσως 3 εκατοστά από την ράβδο ώστε να δω μέχρι πόσο είναι ικανό να φωτοβολεί εστιασμένα. Έχοντας υπ' όψιν επίσης και από τις προδιαγραφές του LED ότι έχει 140 μοίρες viewing angle άρα το αποτέλεσμα και η λογική μας προδιαγράφει ότι το LED δεν θα πρέπει να έχει μεγάλη απόσταση εκ της ράβδου.



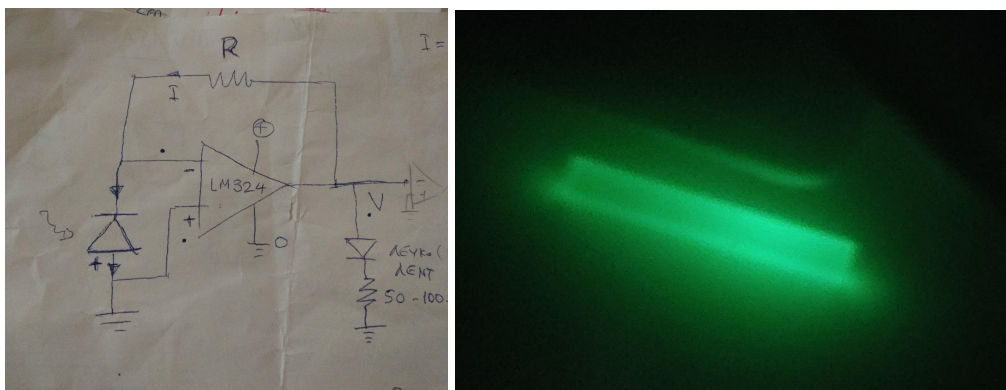
Εικόνα 36 : Έλεγχος της απόκλισης της δέσμης φωτός ανάλογα με την απόσταση του από το έδαφος.

Στην παραπάνω φωτογραφία η σκιαγράφηση με ημικύκλια την εκπομπή του LED σε κάθε εκατοστό που προείπα παρατηρήθηκε ότι στα τρία εκατοστά η δέσμη χάνεται εντελώς ενώ αποδεκτό είναι σε τιμές κάτω των 2 εκατοστών.

Αποτέλεσμα : Τα LED θα ήταν ιδανικά και αποδεκτά σε θέση από ένα εκατοστό και κάτω στην τελική διάταξη ώστε να απορροφηθούν όσο περισσότερα φωτόνια. Επίσης η απόσταση δεν μπορεί να είναι μακρινή καθώς και ενεργειακά θα έχουμε μεταπτώσεις.

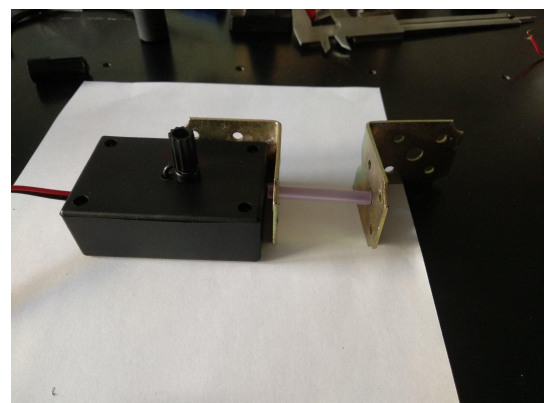
9. ΦΘΟΡΙΣΜΟΣ & ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ο κρύσταλλος Nd:YAG είναι το πιο γνωστό είδος κρυστάλλων οξειδίων που χρησιμοποιείται ευρέως ως ενεργό μέσο σε λέιζερ στερεάς κατάστασης. Θα φωταγωγήσουμε τον κρύσταλλο με το εκάστοτε led σε απόσταση ενός εκατοστού και με τον ανιχνευτή που έχω φτιάξει θα μετράμε τον φθορισμό σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 37 & 38 : Το κύκλωμα του ανιχνευτή που δημιουργήθηκε για την μέτρηση του φθορισμού στα αριστερά και στα δεξιά είναι η ράβδος φωταγωγημένη από LED. Το πράσινο που φαίνεται είναι ο φθορισμός που φαίνεται όταν η ράβδος φωτοβολείται.

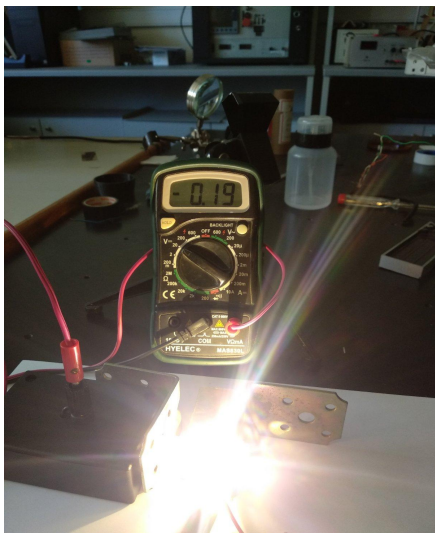
Το κύκλωμα έχει τοποθετηθεί εντός του πλαστικού μαύρου κουτιού, προεξέχει το καλώδιο της τροφοδοσίας 5V και από πάνω είναι η εσοχή για την έξοδο της τάσης (V_{out}) είτε του καλωδίου για πολύμετρο είτε και για παλμογράφο. Βλέπουμε επίσης δύο στηρίγματα για τον κρύσταλλο ώστε να τον έχουν στο ίδιο ύψος και εξ' επαφής με τον κρύσταλλο. Τέλος βλέπουμε τον κρύσταλλο, ν' αναφερθεί εδώ ότι δεν είναι ο τελικός κρύσταλλος. Η διαφορά αυτού του κρυστάλλου είναι ότι δεν είναι γυαλισμένος στα άκρα όπως ο κρύσταλλος που θα χρησιμοποιηθεί, αυτό βέβαια σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που θα δούμε θα είναι ασθενέστερα. Επίσης δεν έχουν το ίδιο μήκος, καθώς ο εικονιζόμενος είναι 8 εκατοστά σε αντίθεση με τα 11 του κανονικού κρυστάλλου. Παρόλα αυτά και οι δύο κρύσταλλοι περιέχουν νεοδύμιο YAG και αυτό φαίνεται άλλωστε από την μοβ απόχρωση που φαίνεται να έχει στην εικόνα ο κρύσταλλος.



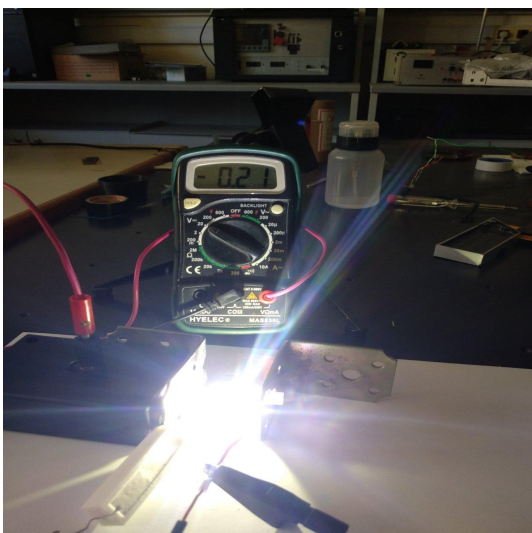
9.1 Επιλογή Led μέσω φθορισμού

Παρακάτω παρουσιάζονται με την σειρά φωτογραφίες από τα πειράματα που έγιναν σύμφωνα με την διάταξη που παρουσιάστηκε προηγουμένως για την επιλογή του καλύτερου Led φωτοβολώντας την ράβδο και εξάγοντας αποτελέσματα μέσω φθορισμού της.

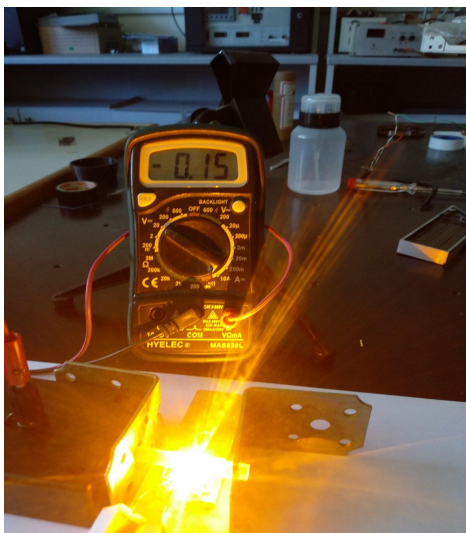
1) White warm 3 watt



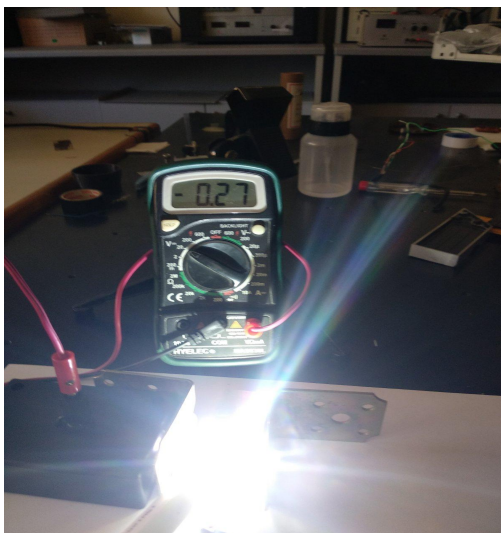
2) White Cold 3 watt



3) Amber 3 watt



4) White Cold 5 watt



Και ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις μετρήσεις που έγιναν στα πέντε εκατοστά προηγουμένως προστιθέμενος από τις μετρήσεις φθορισμού που μόλις έγιναν, ώστε να καταλήξουμε στο τελικό LED.

| | Lux Meter (lux) | Photovoltaic Panel (mA) | Μέτρηση Φθορισμού (V) |
|---------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| White Warm 3w | 17000 | 2.5 | 0.19 |
| White Cold 3w | 14000 | 3 | 0.21 |
| Amber 3w | 6000 | 1 | 0.15 |
| White Cold 5w | 23500 | 5 | 0.27 |

Προστέθηκαν στον πίνακα και οι μετρήσεις φθορισμού και πλέον έχουμε ολοκληρωμένη άποψη για την επιλογή του τελικού led, **καταλήγουμε ότι το 5 watt cold led ισχύος είναι το πιο κατάλληλο και αποδοτικό** σε σχέση με τα επιλεγμένα μας led και με αυτό θα δοκιμάσουμε να τροφοδοτήσουμε φως τον κρύσταλλο.

9.2 Συμπεράσματα για τα LED

1. Όσον αφορά το θερμό ή ψυχρό στις δύο πρώτες στήλες βλέπουμε στις μετρήσεις με λουξόμετρο το θερμό led να είναι πιο δυνατό ενώ με το φωτοβολταϊκό πάνελ το ψυχρό είναι πιο δυνατό. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο διαφορετικό φίλτρο που μπορεί να έχει κάθε δέκτης και έτσι να βλέπει πιο δυνατό αυτό που το φάσμα απορρόφησης του δέκτη δέχεται καλύτερα.
2. **Από την θεωρητική μελέτη όπου το θερμό είχε απορροφητικότητα 5.1% ενώ το ψυχρό είχε 4.6%.** Παρά την μικρή διαφορά μεταξύ των δύο το συμπέρασμα είναι ότι το θερμό έχει ένα μικρό προβάδισμα σημαντικό όμως, όταν συζητάμε για ενέργειες.
3. **Οι μετρήσεις φθορισμού δείχνουν ότι τα ψυχρά led είναι πιο ισχυρά στην πράξη από ότι τα θερμά.** Είναι πιθανόν οι μπάντες του νεοδυμίου στα 532 & 580 να απορροφούν τα υψηλά επίπεδα κίτρινα και μπλε του led.
4. Αξίζει να αναφερθεί ότι το led με χρώμα **κεχριμπάρι** δεν είχε εν τέλη καθόλου καλή απόδοση, αυτό μπορούμε να το δούμε και στις προδιαγραφές του από τον κατασκευαστή, αλλά **αν είχαμε το συγκεκριμένο χρώμα led σε πιο ισχυρή προδιαγραφή σε lumen όπως τα άλλα πολύ πιθανόν να ήταν πιο ισχυρό από όλα τα led** καθώς εκπέμπει στο μήκος κύματος όπου ο κρύσταλλος Nd:YAG έχει μία

μεγάλη κορυφή και θα ήταν δυνατόν να ξεπεράσει τα άλλα led ισχύος. Θα ήταν λοιπόν άξιο προσπάθειας και με led χρώματος κεχριμπάρι αν βρισκόταν στην αγορά. Αυτή η θεωρία βασίζεται στον πίνακα με τα αποτελέσματα καθώς ενώ το led ήταν χαμηλότερων δυνατοτήτων ανταγωνίστηκε επάξια στην στήλη του φθορισμού και μείωσε σημαντικά την διαφορά των πρώτων δύο στηλών.

Το LED της τελικής επιλογής είναι το 5 watt white cold.



Χαρακτηριστικά LED

Power : 5 watt
 Color temperature : 6500(typ) K
 Led Current DC : 1.4A
 Operating Voltage : 6.5-8V
 Luminosity : 320(typ)lm
 Size : 8 mm
 Viewing angle : 140
 Series : Xeon Power

Κριτήρια επιλογής του Led

- Δυνατότερο και εύκολα διαθέσιμο στην ελληνική αγορά
- Μικρό μέγεθος του (0.8 cm) επιτυγχάνοντας μεγιστοποίηση του αριθμού τοποθέτησης
- Φασματική εκπομπή, καλό ποσοστό του ψυχρού Led στο φάσμα απορρόφησης Nd:Yag
- Πυκνότητα Οπτικής Ισχύος
- Μεγάλη συνεχή ισχύ $18 \text{ led} * 5 \text{ watt} = 90 \text{ W}$
- Φακός μπροστά στο Led για συγκέντρωση δέσμης
- Υπάρχει δυνατότητα ψύξης λόγω του μεταλλικού υποστρώματος

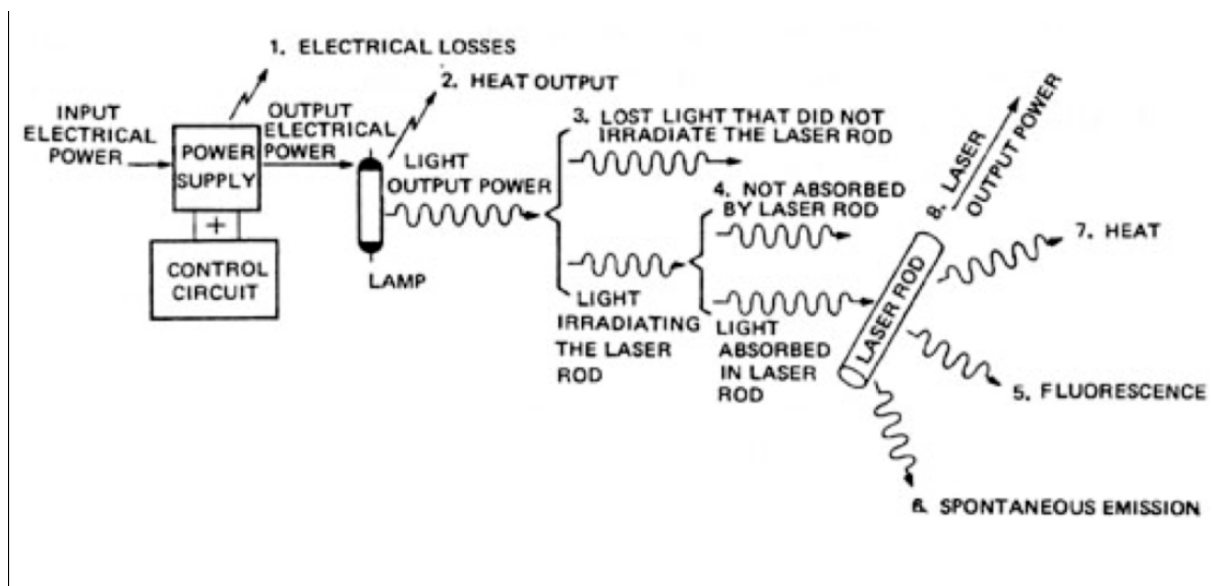
9.3 Θεωρητικός Υπολογισμός Απώλειας Ενέργειας

Ένα πρώιμο αλλά κάπως κατευθυντικό στάδιο είναι ένας θεωρητικός υπολογισμός απώλειας της ενέργειας, δηλαδή από όλη την ενέργεια που σκοπεύουμε να εισάγουμε στην διάταξη του λέιζερ, τι εν τέλη θα μείνει εντός.

Προσέξτε σε αυτό το στάδιο θα αφαιρέσω κάποιες από τις σημαντικές απώλειες ενέργειας μόνο και μόνο για να δούμε σε τι επίπεδο ενέργειας αναμένουμε να βρεθούμε και σε δεύτερο χρόνο να συγκριθεί με άλλες έρευνες παγκοσμίως για να προλάβουμε λάθη και να δούμε σε τι μήκος επιτυχίας κυμαινόμαστε.

Σαφώς και το αποτέλεσμα δεν είναι οριστικό η μοναδικό καθώς υπάρχουν και πολλά τεχνάσματα αύξησης αυτής της ενέργειας είτε με τους καθρέφτες είτε με κάποιο καλύτερο τροφοδοτικό αλλά σε αυτή την ενότητα και σε αυτή την περίπτωση επικεντρωνόμαστε αν θα ξεπεραστεί το ενεργειακό κατώφλι του κρυστάλλου, στα ζητήματα ενίσχυσης της ενέργειας θα συζητήσουμε σε επερχόμενο κεφάλαιο.

Έχοντας πλέον επιλέξει το LED που θα χρησιμοποιηθεί και με κριτήριο ότι σίγουρα το σύστημα μας θα περιέχει από 18 έως και 36 LED μπορεί να γίνει μια αρχική όχι καθοριστική εκτίμηση.



Input Electrical Power 90W

1. Electrical Losses -10% → Μείωση απόδοσης λόγω του τροφοδοτικού στην μετατροπή από 230 σε 24V dc από τις προδιαγραφές του τροφοδοτικού
2. Heat Output - 67% → Η οπτική απόδοση των ηλεκτρικών watt. Υπολογίζεται στην διατριβή στο 33% η απόδοση για το led της επιλογής.
3. Lost Light that did not irradiate the laser rod - 7% → Απόσταση από την ράβδο & κβαντική απόδοση μειώνουν την ισχύ κατά 7%

4. Not Absorbed by Laser rod - 95.39% → Μέσω της θεωρητικής μελέτης για το white cold led βγήκε το πόρισμα της απορρόφησης στο 4.61%
5. Fluorescence - 6% → Φως που εκπέμπεται σε μήκος κύματος διαφορετικό από την έξοδο λέιζερ
6. Spontaneous Emission - 20% → Αυθόρμητη εκπομπή φωτός στο μήκος κύματος εξόδου λέιζερ αλλά όχι κατά μήκος του οπτικού άξονα
7. Heat - 14% → Η διαφορά ενέργειας χάνεται συνήθως από τη **θερμότητα** και την ενεργειακή απόσταση.

8. LASER OUTPUT → 68 mW

Αποτέλεσμα συνεχής λειτουργίας. Ένα παλμικό λέιζερ θα ήταν καλύτερη επιλογή. Σαφώς υπάρχουν και τρόποι αύξησης της ενέργειας του laser και όχι μόνο μείωσης απλά η διαδικασία αυτή έγινε με σκοπό να πάρουμε ένα δείγμα της ελάχιστης βαττικής ισχύς που περιμένουμε να δώσει το laser.

Έχοντας πλέον τον αριθμό που αναμένουμε να εξέλθει εκ του λέιζερ μπορούμε να συγκρίνουμε με άλλα λέιζερ παγκοσμίως ιδίων προδιαγραφών ή χειρότερων ώστε να μπορέσουμε να δώσουμε μια κατευθυντική πορεία στο αν τελικά αναμένεται να ξεκινήσει το λέιζερ. Καθώς δεν υπάρχουν αναφορές για συνεχή λέιζερ με συνεχή λειτουργία αντλούμενα από LED ισχύος θα πρέπει να ανατρέξουμε στο παρελθόν **σε λέιζερ με λαμπτήρες πυρακτώσεως**.

Συγκρίνω τα λέιζερ αντλούμενα από LED ισχύος με λέιζερ από λαμπτήρες πυρακτώσεως για να υπολογιστεί αν το ενεργειακό κατώφλι είναι κοντά στο να ξεπεραστεί. Συγκρίνω τα δύο λέιζερ καθώς :

- Έχουν μεγάλες ράβδους
- Είναι συνεχές λέιζερ

Όμως τα Laser με LED είναι σε πλεονεκτικότερη θέση καθώς :

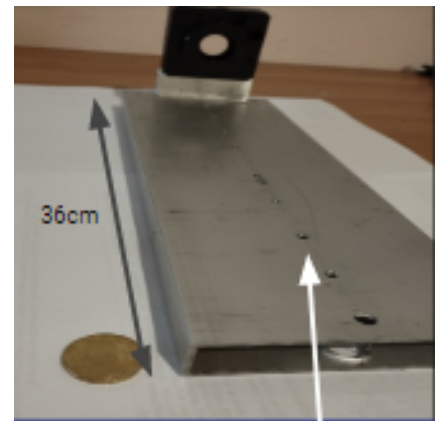
- Λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις
- Απουσία υπεριώδεις φωτός

Η συνέχεια με την ανάλυση των μελετών θα γίνει στο κεφάλαιο 11 όπου θα αναλυθούν διατριβές παγκόσμιου επιπέδου με σκοπό τον καθορισμό όλων αυτών που προαναφέρθηκαν.

10. ΥΛΙΚΑ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Τα υλικά και κατασκευαστικά μέρη που θα χρειαστούν για την κατασκευή σε αρχικό στάδιο καθώς η πρώτη σκέψη είναι το συγκεκριμένο λείζερ να είναι πλήρως επεκτάσιμο και ανανεώσιμο ώστε να φέρνει βελτιώσεις και μετατροπές είναι :

- Βάση
 - Καθρέφτες και στηρίγματα για καθρέφτες
 - Στηρίγματα ράβδου
 - Στηρίγματα LED
 - Ράβδος
 - Τροφοδοτικό
- Αρχικά επιλέχθηκε **Μεταλλική Βάση** για την στήριξη όλων των μερών και υλικών του λείζερ. Όπως φαίνεται και στην εικόνα η βάση είναι **τριάντα έξι εκατοστά**. Με το άσπρο βελάκι επιδεικνύονται οι οπές στήριξης οι οποίες είναι 5 χιλιοστών (M5).



Εικόνα 39 : Μεταλλική Βάση

- **Κινηματικό στήριγμα καθρέφτη και βάση υπερύψωσης.** Για κινηματικό στήριγμα καθρέφτη χρησιμοποιήθηκαν δύο ήδη υπάρχον στην κατοχή μας και δεν σχεδιάστηκε κάποιο καινούργιο για αποφυγή δυσκολιών και αποτυχίας της υλοποίησής τους. Σχετικά με την βάση υπερύψωσης είναι ένα αντικείμενο που χρειάστηκε κατά την διάρκεια του project, ώστε το κέντρο του καθρέφτη να πέσει συνευθειακά με την ράβδο η οποία βρίσκεται στα 4.9 εκατοστά ύψος από την επιφάνεια της μεταλλικής βάσης. Η βάση υπερύψωσης είναι στα 1.4 εκατοστά και έχει οπή στο κέντρο της όπως φαίνεται και στην εικόνα ώστε με μία βίδα να ενώνεται με το κινηματικό στήριγμα και ταυτόχρονα να είναι σταθερή στην μεταλλική βάση.



Εικόνας 40 : Κινηματικό στήριγμα καθρέφτη και βάση υπερύψωσης

- Καθρέφτες ή οπτικό αντηχείο**, ο σχεδιασμός του έγινε σύμφωνα με τις απαραίτητες μεταλλικές βάσεις και οπτο-μηχανικά στηρίγματα (κινηματικά ή σταθερά), λαμβάνοντας υπόψη και την διαθεσιμότητα οπτικών υλικών και στοιχείων, όπως π.χ. καθρεπτών laser και ράβδων (κρυστάλλων) Nd:YAG στο εργαστήριο Laser του ΗΜΜΥ.
 Οι καθρέφτες θα είναι 100% και 98 % αρχικά αλλά αν δούμε ότι το σύστημα ξεκινάει και ξεπερνά το ενεργειακό κατώφλι τότε θα τοποθετηθεί ένας καθρέφτης χαμηλότερης ανάκλασης ώστε να αυξηθεί η έξοδος του συστήματος λέιζερ.



Εικόνα 41 : Επίπεδοι καθρέφτες για λέιζερ Nd:YAG. και κρύσταλλος Nd: YAG

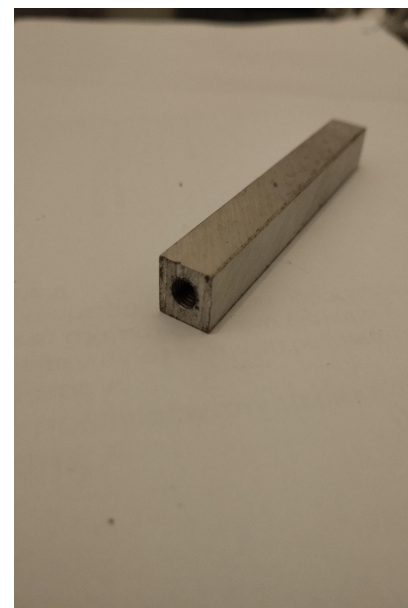
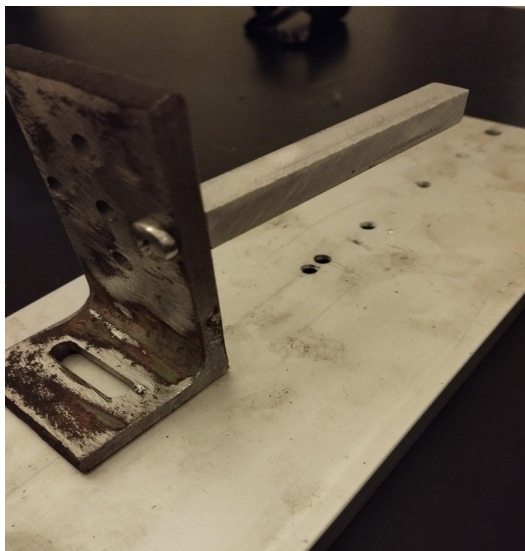
- Βάση για στήριξη της ράβδου στήριξης των LED**



Μεταλλικό στήριγμα για στήριξη των LED και της ράβδου Nd : YAG. Οι τέσσερις περιμετρικές οπές είναι για τις βάσεις που θα τοποθετηθούν τα LED και στην συνέχεια θα βιδωθούν και η μεσαία οπή είναι για την ράβδο. Το συνολικό ύψος του στηρίγματος είναι στα 8 εκατοστά και το κέντρο της μεσαίας οπής είναι στα 4.9 εκατοστά από την μεταλλική βάση. Στην βάση φαίνεται σε σχήμα οβάλ ένα μεγάλο άνοιγμα ώστε να υπάρχει ευχέρεια στην μετακίνηση δεξιά - αριστερά για τις δοκιμές ώστε να είναι συνευθειακά με τους καθρέφτες.

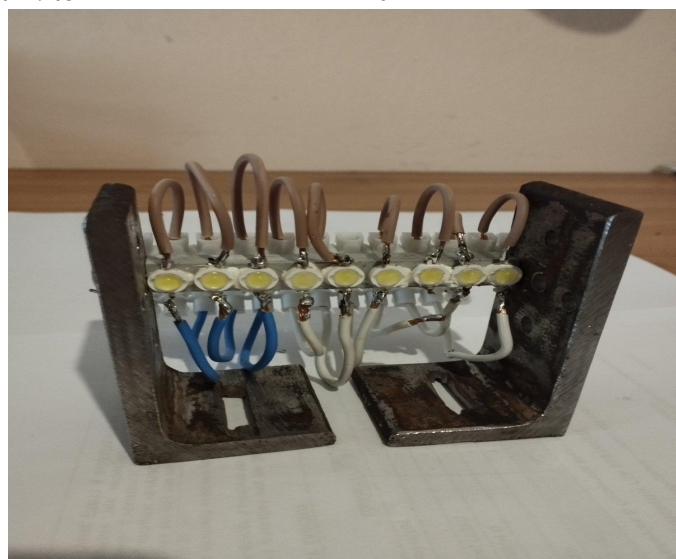
Εικόνα 42: Βάση στήριξης ράβδου & LED

- Βάση για στήριξη & ψύξη των LED.** Το μήκος αυτής της ράβδου είναι 8.2 εκατοστά. Έχει δύο οπές με σπείρωμα M3 ώστε να βιδώνεται στα μεταλλικά στηρίγματα. Λόγω του μετάλλου της έχει δυνατότητα απορρόφησης θερμότητας. Πάνω της τοποθετούνται Εννιά από τα επιλεγμένα LED ισχύος, αυτό μας κάνει ένα συνολικό αποτέλεσμα ισχύος της τάξης των 45 watt ηλεκτρικής ισχύος ανά τέτοια βάση στήριξης των LED.



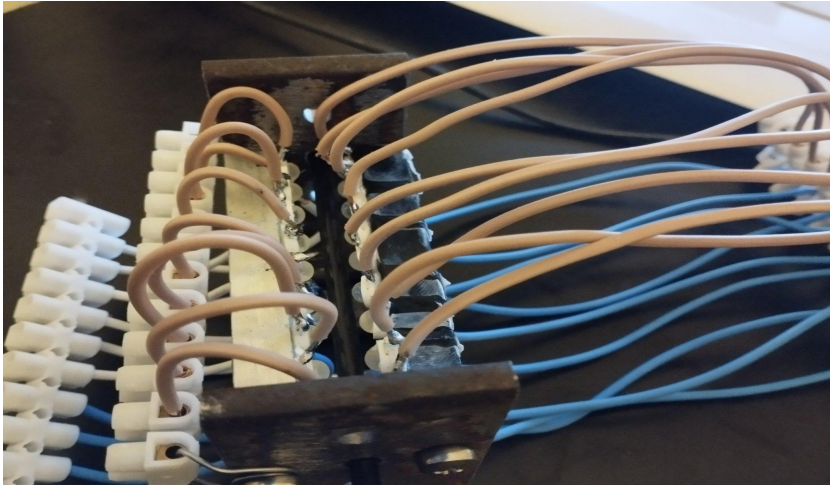
Εικόνες 43 & 44 : Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η ράβδος προσαρμογής των LED και στη δεύτερη εικόνα υποδεικνύεται η εφαρμογή της βάσης LED στο στηρίγμα με βίδα.

Αφού λοιπόν έχουμε αντιληφθεί σχετικά το τρόπο που θα στηθεί η διάταξη του λέιζερ, πάμε να τοποθετήσουμε τα LED πάνω στην ράβδο στήριξης, να τα καλωδιώσουμε ηλεκτρικά σε κλέμμες ώστε να είναι πιο εύκολο να συνδεθούν στο τροφοδοτικό. Στην παρακάτω εικόνα έχουμε εννιά κολλημένα LED των 5 watt έτοιμα να χρησιμοποιηθούν. Αυτή θα είναι αρχικά η διαρρύθμιση της κάθε μπάρας των led.



Εικόνα 47 : Ενδεικτική Διάταξη του συστήματος λέιζερ, σε κάθε σειρά που προστίθεται θα υπάρχουν εννιά LED

Προσθέτοντας και την δεύτερη μπάρα η διάταξη μας θα έχει την παρακάτω μορφή κάθε LED ισχύος είναι συνδεδεμένο σε μία επαφή κλέμας όπως προείπαμε ώστε να είναι πιο εύκολες οι συνδέσεις από το τροφοδοτικό προς τα LED. Εδώ επιδεικνύονται δύο τρόποι καλωδίωσης με κοντά και μακριά αφημένα τα καλώδια ώστε να αποφασισθεί ποιο είναι πιο βολικό. Υπενθυμίζεται ότι η διαδικασία δημιουργίας του λέιζερ είναι πειραματική για αυτό και οι προκλήσεις, οι βελτιώσεις, οι μετατροπές είναι κομμάτι της καθημερινής ρουτίνας επισκευής του λέιζερ για αυτό και γίνονται δοκιμές ακόμα και στα πιο απλά κατασκευαστικά μέρη ώστε να εξακριβώνεται η βέλτιστη διάταξη.



Εικόνας 48 : Εφαρμογή και της δεύτερης σειράς των εννιά LED συγκόλληση των LED και ένωση τους σε κλέμες για την ευκολία συνδέσεων με οποιοδήποτε τροφοδοτικό.

10.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟΥ

Η ερώτηση είναι παλμικό ή συνεχές τροφοδοτικό ; Η απάντηση σε αυτό είναι απλή το συνεχές τροφοδοτικό είναι κάτι που μπορεί να βρεθεί άμεσα με χαμηλό κόστος ώστε να γίνουν οι πρώτες δοκιμές. Όμως η συνεχής τροφοδοσία θα δημιουργήσει πρόβλημα θερμοκρασίας στην ράβδο και στο led. Είναι γνωστό ότι τα led όταν θερμαίνονται πολύ χάνουν την αποδοτικότητα τους ή ακόμα χειρότερα καίγονται. Επίσης στη συνεχή λειτουργία το λείζερ θα είναι χαμηλότερης απόδοσης λόγω της μακράς διάρκειας. Επομένως η σκέψη μας κατευθύνεται στο παλμικό το οποίο θα ήταν χρησιμότερο καθώς η ενέργεια θα βγαίνει συγκεντρωμένη στο χρόνο με μεγαλύτερη πιθανότητα να αποκτήσει δύναμη ακόμα και να κάψει το υλικό που θα βρει μπροστά του. Δεύτερον εφόσον είναι υπέρυθρο το κύμα παλμού που θα βγει από την ράβδο τότε το συνεχές δεν μας χρειάζεται. Τρίτον επιλέγοντας παλμικό και συμπιέζοντας τους παλμούς με την μέθοδο Q switching μπορείς να συγκεντρώσεις σε ns όλη την ενέργεια ικανό να διαλύσει κομμάτια υλικού, να τα αποδομήσει , να τα εξαερώσει. Άρα θα ξεκινήσουμε την αρχή της λειτουργίας με ένα συνεχές για τα αρχικά πειράματα και τις ρυθμίσεις και στην συνέχεια ευελπιστώ σε εναλλαγή σε παλμικό τροφοδοτικό.

Κάθε led των 5 watt έχει τάση λειτουργίας 6.5-8 Volt και ρεύμα λειτουργίας 1.4 Ampere. Η πρώτη δοκιμή θα γίνει με 18 led. Άρα αν τα led συνδεθούν σε έξι τριάδες (3 επί 8 =24V). Το τροφοδοτικό λοιπόν θα πρέπει να είναι **24 Volt**. Οι έξι τριάδες χρειάζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές ρεύμα 1.4 η κάθε μία, άρα $1.4 \times 6 = 8.4 \text{ A}$ θα πρέπει να είναι οι προδιαγραφές του τροφοδοτικού.

Έχει επιλεγθεί μεταλλικό τροφοδοτικό PELV για προϊόντα LED 400W 16.6A - AC 220-240V σε DC 24V.



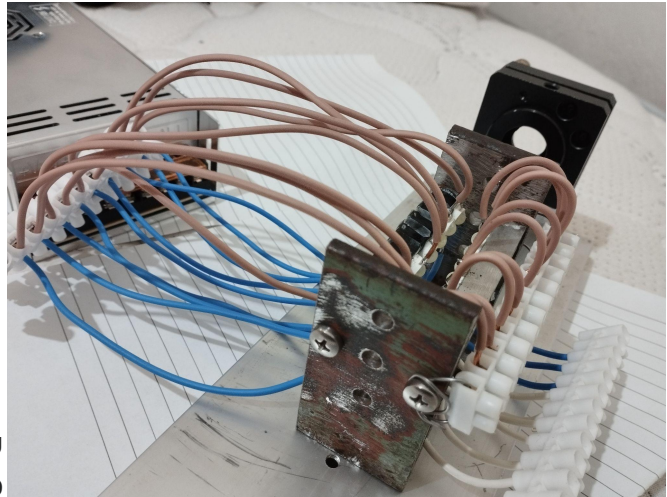
Θυμίζω ότι αρχικός στόχος είναι να δούμε στον παλμογράφο το σήμα από τον κρύσταλλο και να ξεπεραστεί το κατώφλι ενέργειας ξεκινώντας το λείζερ. Ευελπιστώ σε δεύτερο χρόνο σε παλμικό τροφοδοτικό ώστε να μεγιστοποιηθούν τα αποτελέσματα, είναι δηλαδή μία βελτίωση που μπορεί να γίνει στη συνέχεια.

10.2 Διάταξη Άντλησης Laser

Τοποθετώντας κάθε κομμάτι της πειραματικής διάταξης στην θέση του και ενώνοντας το με τα υπόλοιπα η διάταξη θα έχει την εξής μορφή :

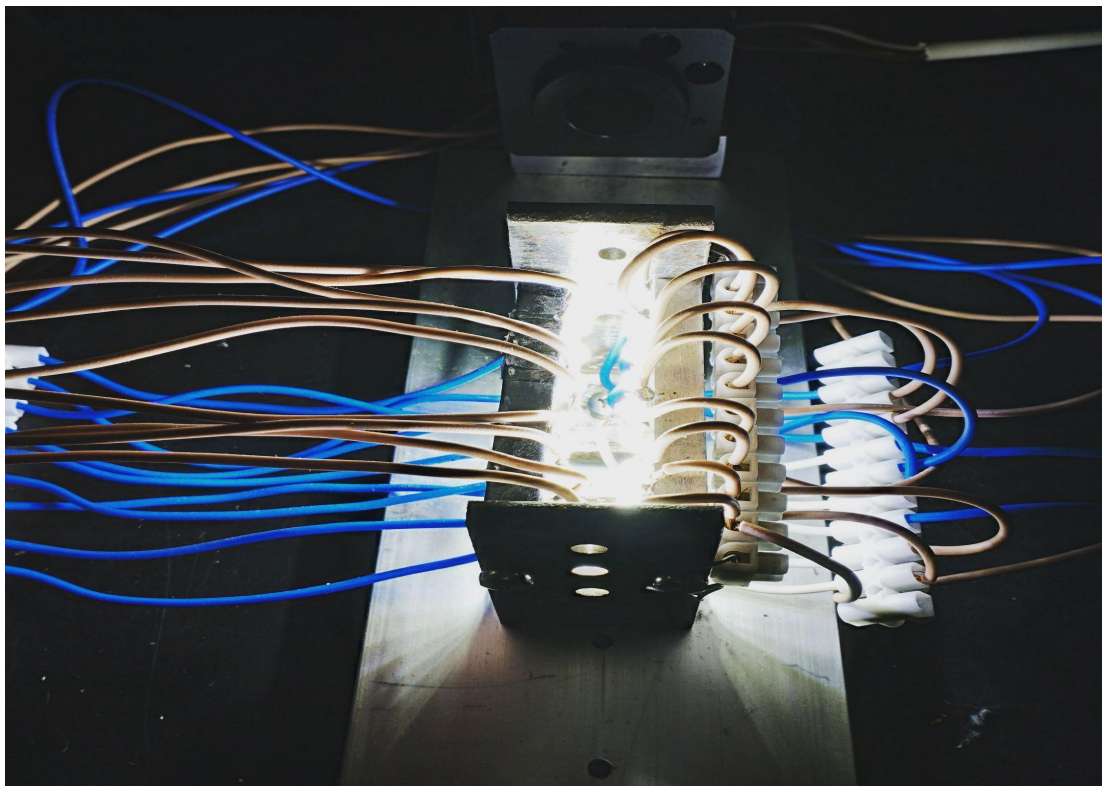
Ουσιαστικά είμαστε έτοιμοι να ξεκινήσουμε τις πειραματικές δοκιμές

- Ενεργοποιώντας το τροφοδοτικό
- Τροφοδοτώντας τα LED
- Ελέγχοντας αν όλα είναι συνευθειακά
- Ελέγχοντας αν έχουμε σήμα που εκπέμπεται από τον κρύσταλλο



Εικόνα 49 : Τελική διάταξη του λέιζερ έτοιμο να τροφοδοτηθεί

- Κάνοντας τις απαραίτητες μετατροπές



Εικόνα 50 : Δεκαοχτώ LED αναμμένα έτοιμα να φωταγωγήσουν την ράβδο.

11. ΑΝΑΦΟΡΕΣ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΛΛΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ

11.1 Σύγκριση του λέιζερ αντλούμενου από LED με λέιζερ από λαμπτήρες πυρακτώσεως

Πρώτη σύγκριση που θα διαλευκάνει λίγο στην ενεργειακή κατάσταση που ευελπιστούμε να φτάσουμε και σίγουρα θα δώσει κάποια πλεύση στην κατεύθυνση που θα πρέπει να βρισκόμαστε από άποψη ηλεκτρικής ισχύς σε watt είναι τα ενεργειακά κατώφλια. Πιο συγκεκριμένα θα δούμε για τα λέιζερ που ξεκινούν αντλούμενα από λυχνία πυρακτώσεως. Υπάρχει μεγάλη αντιστοιχία στο λέιζερ αντλούμενου από LED σαν το δικό μας και αυτά με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως.

Αρχικά και τα δύο έχουν :

- Μεγάλες ράβδους
- Συνεχές λέιζερ

Συνοψολογίζοντας σε όλο αυτό ότι τα LED έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα όπως έχει προαναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Θα αναφέρω επιγραμματικά και υπενθυμιστικά ότι :

- Τα LED λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις
- Απουσία υπεριώδεις φωτός. Η έλλειψη υπεριώδεις φωτός στα LED είναι πολύ σημαντική καθώς το υπέρυθρο φως καταστρέφει στοιχεία - υλικά του λέιζερ όπως η ράβδος ή και διάφορα πλαστικά υλικά τα οποία μαυρίζουν από την συνεχή έκθεση στο υπέρυθρο φως και χρειάζονται τακτική αντικατάσταση.
- Η υπέρυθρη ακτινοβολία της λυχνίας πυρακτώσεως είναι περισσότερο επιβλαβής για τον άνθρωπο.

Σύμφωνα με τις έρευνες που βρέθηκαν σχετικά με τις λάμπες πυρακτώσεως έχουμε τα εξής παραδείγματα :

1) Τίτλος εργασίας : **Efficient Nd: YAG CW lasers using alkali additive lamps**

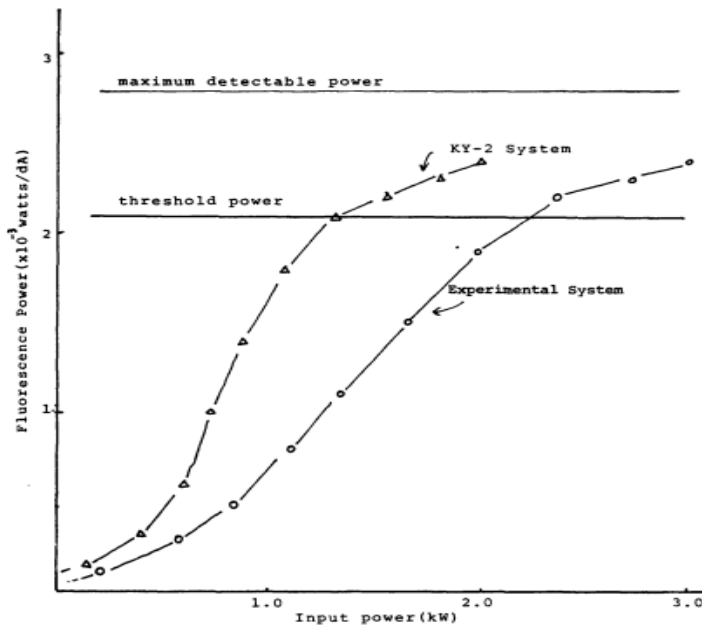
Περίληψη : A potassium-mercury lamp in a sapphire envelope was constructed. Under the proper conditions of pressure and temperature the potassium resonance lines radiate efficiently at the infrared absorption lines of Nd 3+ in YAG. Spectral tests indicate that a threefold improvement in pumping efficiency should be obtained compared with a tungsten filament lamp. CW room-temperature laser tests result in an output of 10 watts for an input of 420 watts for a 2.4 percent overall efficiency. This compares with a 1 percent overall efficiency for the tungsten filament lamp.

Ουσιαστικά αναφέρεται ότι χρησιμοποιώντας 420 watt για είσοδο και βγάζοντας ως έξοδο 10 watt η αποδοτικότητα άγγιξε το 1%

2) Τίτλος εργασίας : **THE CONSTRUCTION OF A Nd:YAG LASER AND OBSERVATION OF THE OUTPUT**

Περίληψη : An experimental Neodymium-YAG laser has been constructed using a gold coated circular cylindrical pumping cavity. The rod is located along the cylinder axis and is pumped by three tungsten-halide filament lamps symmetrically spaced at equal radial distances from the rod. The resonator consists of a concave 100 percent reflecting mirror and a flat output mirror with variable axial spacing. Lasing threshold was achieved at an input power of 2000 watts with the lamps 12 millimeters from the rod, using a 6.1 percent transmittance output mirror. Threshold was not achieved with a 27 percent transmittance mirror. A maximum CW output of 2.05 watts was observed with 3300 watts input power. The maximum slope efficiency at the maximum available power of 3300 watts was measured as 0.19 percent, which is considerably lower than found in commercial systems using elliptical cavities. The slope efficiency increased with increase in the input power; this was probably due to the change in the wavelength of the peak emission from the lamps. The optimized output power was greatest at the minimum resonator length of approximately one half the mirror radius of curvature, and reached a minimum at one radius of curvature spacing.

Η περίληψη αναφέρεται σε ένα λέιζερ τροφοδοτούμενο από τρεις λαμπτήρες πυρακτώσεως που δίνουν είσοδο 2000 watt που ενισχύοντας το φτάνει τα 3300 watt αλλά η απόδοση του λέιζερ είναι μόλις 0.19%. Το ενεργειακό κατώφλι είναι στα 2.2 KW όπου ισοδυναμεί με έξοδο 1.1 watt και το λέιζερ τους ήταν λειτουργικό με 2.05 watt εντός της ράβδου.



Εικόνα 51 : Διάγραμμα που δείχνει ενεργειακό κατώφλι στα 2.2 kw

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Τα αποτελέσματα κυρίως της δεύτερης διατριβής είναι διαφωτιστικά καθώς είναι λίγο υψηλότερο από την τωρινή έξοδο του δικού μας λέιζερ, αλλά υπάρχει η προοπτική διπλασιασμού των watt στην ράβδο. Αυτή την στιγμή το λέιζερ μας προσμετράται στα 68 mW /s απέχει σχετικά λίγο από τα 200 mW /s από το λέιζερ της δεύτερης διατριβής αλλά είναι ακόμα πιο κοντά από το ενεργειακό κατώφλι που βρίσκεται στα 110 mW/s. Αν προστεθεί η τρίτη και τέταρτη μπάρα η ηλεκτρική ισχύς θα μεγαλώσει κατά 90 ηλεκτρικά watt. Δεν είναι βέβαιο ότι με αυτή την μετατροπή θα ξεπεραστεί το ενεργειακό κατώφλι για αυτό και η κατασκευή του λέιζερ έχει μελετηθεί για να είναι επεκτάσιμη και όσο το δυνατόν πιο πειραματική από όλες τις πλευρές και απόψεις.

Η παλμική λειτουργία που θα δώσει 5-10 φορές μεγαλύτερη ισχύς στο λέιζερ και θα ξεπεράσει κατά πολύ το ενεργειακό κατώφλι, είναι μία λειτουργία που φαίνεται ότι θα δώσει την λύση στα σίγουρα απλά μιλάμε για παλμικό και όχι συνεχές λέιζερ.

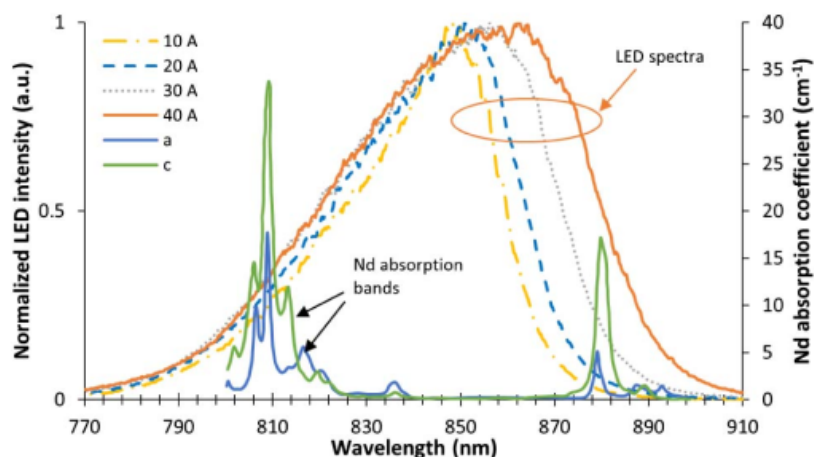
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του λέιζερ για την δική μου διατριβή η απόδοση του λέιζερ αντλούμενου από LED ισχύος αγγίζει το 0.75% τότε υπάρχουν σοβαρές ενδείξεις ότι το λέιζερ είναι κοντά στο να ξεπεράσει το ενεργειακό κατώφλι και να ξεκινήσει απομένουν οι τελικές δοκιμές επιβεβαίωσης.

11.2 Λέιζερ αντλούμενα από LED παγκοσμίως

Ας δούμε τώρα κάποιες έρευνες για λέιζερ αντλούμενα από LED.

(1) Τίτλος έρευνας : Revisiting of LED pumped bulk laser: first demonstration of Nd:YVO₄ LED pumped laser.

Το πρώτο λέιζερ Nd:YVO₄ με άντληση από LED. Συστοιχίες LED- IR με ένα μήκος κύματος με κέντρο κοντά στα 850 nm χρησιμοποιήθηκαν για την εγκάρσια άντληση του κρυστάλλου. Με παλμικά LED, διάρκειας της τάξης ζωής μετάβασης του λέιζερ, ώστε να φτάσουν στο κατώφλι του λέιζερ. Σε συχνότητα 250 Hz, έλαβαν ενέργεια εξόδου 40 μJ στα 1064 nm για ενέργεια εισόδου 7,4 mJ, η οποία αντιστοιχεί σε οπτική απόδοση 0,5%. Ένα θετικό στοιχείο είναι η μεταβολή του φάσματος LED καθώς αυξάνεται το ρεύμα.



Εικόνα 52 : Φασματική παραμόρφωση αύξησης του ρεύματος και ζώνες απορρόφησης Nd:YVO₄ για 1 at. % συγκέντρωση

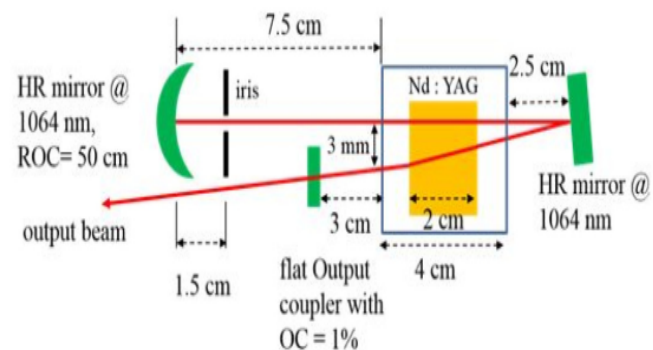
Το αποτέλεσμα της έρευνας δεν ήταν ικανοποιητικό και μάλιστα σημειώθηκε ότι αξίζει να εξεταστεί περαιτέρω η άντληση LED σε κρυστάλλους στο μέλλον, ιδιαίτερα στο ορατό εύρος όπου βρίσκονται τα LED είναι εξαιρετικά βελτιστοποιημένα.

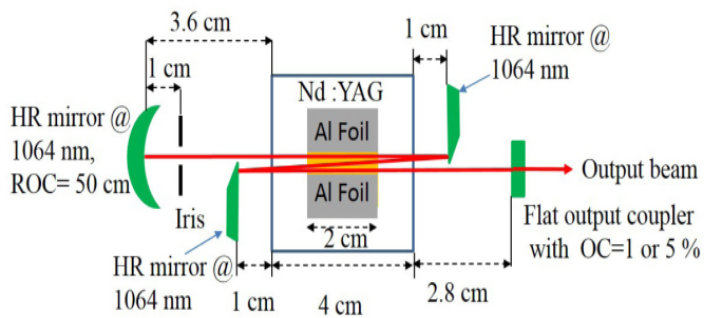
(2) Τίτλος έρευνας : High Stability LED-Pumped Nd:YVO4 Laser with a Cr:YAG for Passive Q-Switching

Λέιζερ Nd:YVO4 με άντληση από LED σε συνεχή λειτουργία (QCW) και passive Q-switched (PQS). Με προσπίπτων παλμό ενέργειας στα 6,28 mJ (παλμοί 150 μ s στο 1 Hz), το λέιζερ Nd:YVO4 έχει ενέργεια 206 μ J στα 1064 nm στο καθεστώς QCW. Η απόδοση οπτικής μετατροπής του συστήματος είναι 4,1%, και η απόδοση είναι 9,0%. Η παλμική ενέργεια ήταν 2,5 μ J λήφθηκε με διάρκεια 897 ns (FWHM) στο PQS, που σημαίνει ότι η μέγιστη ισχύς είναι 2,79 W. Η πηγή άντλησης που επιλέχθηκε είναι ένα LED υπέρυθρο με κέντρο 810 nm (OSRAM), όπου τοποθετήθηκαν 20. Η σταθερή ενέργεια εξόδου είναι 97,54%. Αναφέρετε ότι είναι το πρώτο υψηλής ευστάθειας λέιζερ Nd:YVO4 με παθητική μεταγωγική Cr:YAG Q με άντληση από LED. Επόμενο βήμα είναι η αύξηση της πυκνότητας ισχύος εισόδου. Αυτό το σημείο κάνει την έξοδο του λέιζερ να έχει στενά πλάτη παλμών και επαρκής ενέργεια, εάν λυθεί αυτό το πρόβλημα τότε θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ένα μεγάλο φάσμα χρήσεων.

(3) Τίτλος έρευνας : Efficient 750-nm LED-pumped Nd:YAG laser

Ένα λέιζερ Nd:YAG με άντληση από LED 750 nm με πολύ καλή αποτελεσματικότητα και σταθερότητα. Όταν τροφοδοτήθηκε από 2,73 mJ, 1 ms με ρυθμό 10 Hz, το λέιζερ παράγει 37,5 μ J παλμική ενέργεια με οπτική απόδοση 1,36% και απόδοση 9%. Άντληση από led με παλμικό λέιζερ οδηγήθηκε με 1ms 4 φορές υψηλότερο απ' ό,τι στη λειτουργία CW, η V-cavity λέιζερ παράγει παλμική ενέργεια 0,15mJ. Το πείραμα με τους καθρέφτες σε V-cavity υποδεικνύει μια πολλά υποσχόμενη διαμόρφωση πολλαπλών περασμάτων για την επίτευξη υψηλής ισχύος, υψηλής απόδοσης εξόδου από ένα λέιζερ που αντλείται από led χαμηλής οπτικής έντασης. Με Z-cavity παράγει μέγιστη ενέργεια παλμού 346 μ J με οπτική απόδοση και απόδοση 3,4 και 6,6% αντίστοιχα, όταν η ενέργεια εισόδου του led ήταν 10,2 mJ σε πλάτος παλμού 1 ms.





.Εικόνα 53 : Schematic of the V-cavity laser: the intra-cavity iris ensures a fundamental Gaussian mode at the output.

Εικόνα 54 : Configuration of the Z cavity for the 750-nm LED pumped Nd:YAG laser with 1 or 5% output coupling.

Καταλήγοντας η έρευνα αναφέρει ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να βελτιώσουν περαιτέρω την ισχύ εξόδου και την απόδοση του λέιζερ. Πρώτα απ' όλα, η μέγιστη οπτική ένταση των 25 W/cm^2 του LED τους θα μπορούσε να αυξηθεί σημαντικά με πολύ *υψηλότερο ρεύμα οδήγησης*. Αν και η διαμόρφωση πλάκας των Led και κρυστάλλου λέιζερ μας ταιριάζει καλά με την τετράγωνη διάταξη του LED χάνει την “δύναμη” και επιτρέπει τη σύγκριση απόδοσης μεταξύ γραμμικών, V- και Z-cavity laser.

12. Συμπεράσματα & Προοπτικές

Στην εργασία αυτή επιτεύχθηκε η υλοποίηση σε θεωρητικό και κατασκευαστικό επίπεδο μιας νέας ιδέας για την άντληση του ενεργού υλικού laser Nd : YAG όπως αναλύεται στα επόμενα επιμέρους στάδια :

- Ο καθορισμός των παραμέτρων της διάταξης laser και των επιθυμητών προδιαγραφών των υλικών του
- Η βασική θεωρητική - υπολογιστική ενεργειακή μελέτη του συστήματος από την ηλεκτρική τροφοδοσία μέχρι την αναμενόμενη οπτική έξοδο
- Η συγκριτική πειραματική μελέτη και επιλογή των καταλληλότερων στοιχείων LED για τον σκοπό της άντλησης του ενεργού υλικού με κριτήρια
 - (i) την μέγιστη απορροφούμενη οπτική ισχύ
 - (ii) το προκύπτον σήμα εκπομπής από τον κρύσταλλο Nd:YAG ανά μονάδα ονομαστικής ισχύος LED
- Η προμήθεια - συγκέντρωση των καταλληλότερων LED άντλησης
- Η προμήθεια - συγκέντρωση των οπτικών υλικών και των οπτομηχανικών στηριγμάτων του αντηχείου
- Η προμήθεια - συγκέντρωση των ηλεκτρολογικών υλικών τροφοδοσίας
- Η σχεδίαση & κατασκευή των υπόλοιπων μηχανικών τμημάτων στήριξης και συναρμογής της διάταξης
- Η συναρμογή - ολοκλήρωση της διάταξης laser με όλα τα απαραίτητα υποσυστήματα (τροφοδοσία, άντληση, αντηχείο, στηρίγματα, κλπ)
- Αρχικές λειτουργικές δοκιμές και μετρήσεις σε συνεχή άντληση
- Το ενεργειακό κατώφλι του Nd:YAG λέιζερ που έχουμε δημιουργήσει αντλούμενο από LED ισχύος στο ορατό φάσμα είναι πολύ κοντά στο κατώφλι των λέιζερ από λαμπτήρες πυρακτώσεως. Γεγονός που δείχνει ότι δύναται το λέιζερ να ξεκινήσει.
- Η απόδοση εξόδου του λέιζερ που είναι της τάξης του 0.75% είναι επίσης ένα ενθαρρυντικό κομμάτι για λέιζερ συνεχής λειτουργίας.
- Συγκρίνοντας με άλλες διατριβές και έρευνες που έχουν γίνει δεν βρέθηκαν να έχουν προσεγγίσει άλλοι την κατασκευή λέιζερ στο ορατό φάσμα με LED ισχύος, κάτι που κάνει αυτή την ερευνητική εξαιρετικά ενδιαφέρον για την έκβαση της.

Προοπτικές

- **Ισχυρότερα LED σε watt**, εφόσον έχουμε επιλέξει συγκεκριμένα μορφή LED μορφής chip δηλαδή και όχι COB ή κάποια άλλη μορφή θα μπορούσαμε να κοιτάξουμε και εκτός Ελλάδος για κάποια δυνατότερα LED από άποψη ισχύος σε watt. Σαφώς η πρώτη μας σκέψη ήταν η γρήγορη ανατροφοδότηση μας σε LED και το χαμηλό κόστος αλλά σε δεύτερη φάση θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε και κάτι πιο μακρινό και δυνατότερο.
- Πέρα από την ισχύς θα μπορούσε να βελτιωθεί και στο φάσμα να προσεγγίσουμε δηλαδή LED μονοχρωματικά όπως **Amber LED** όπως αυτά που δοκιμάστηκαν στα πειράματα αλλά πιο δυνατά σε ισχύς που σε συνδυασμό με το χρώμα και φάσμα εκπομπής τους να μας δώσει βελτίωση στο φάσμα και στην απορρόφηση του κρυστάλλου. Πιο συγκεκριμένα να επωφεληθούμε της κορυφής του φάσματος του Amber LED που βρίσκεται στα 592 nm όπου εκεί έχει κορυφή και το Nd :YAG.
- **Βελτιστοποίηση κοιλότητας. Δοκιμές άλλων καθρεπτών (καμπυλότητα, κυρτότητα)** , αποφεύγοντας ουσιαστικά τους επίπεδους καθρέφτες που ναι έχουν πολλά θετικά όπως η εκμετάλλευση όλου του μήκους του κρυστάλλου αλλά με την καμπυλότητα και κυρτότητα θα καταφέρουμε να παγιδεύσουμε περισσότερα ηλεκτρόνια εντός του συστήματος μας.
- **Βελτιστοποίηση ράβδου** π.χ Nd:ASL υλικό με μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας των Led. έχουν αναλυθεί η λόγοι επιλογής της ράβδου αλλά είναι λογικό να υπάρχουν και καλύτεροι αυτής , πολλά άλλα πλεονεκτήματα αυτό είναι κάτι που αξίζει να διερευνηθεί και να δειχθεί αν όντως υπάρχει καλύτερη ράβδος για την άντληση λέιζερ από LED ισχύος.
- Μελέτη παλμικής λειτουργίας που θα πολλαπλασιάσει την ισχύ (**Q-switching**). Η Q- switching λειτουργία είναι μία λειτουργία που χρησιμοποιείται κατά κόρον με τον κρύσταλλο Nd:YAG άρα θα είναι επόμενο να υπάρχει μία τέτοια ανάγκη και απαίτηση για την μετέπειτα συνέχιση και βελτίωση του λέιζερ ώστε πάρουμε τα μέγιστα από αυτό.
- **Βελτιστοποίηση άντλησης ισχύος με παλμικό τροφοδοτικό διάρκειας παλμού 200μs** αλλά πολλαπλάσια ισχύ κορυφής. Δηλαδή ένταση ρεύματος

5-10 φορές της 'ονομαστικής' DC λειτουργίας των Led. Αυτό θα εκτόξευε την απόδοση του λέιζερ και ταυτόχρονα θα δοκίμαζε πραγματικά τα LED για το αν είναι εν τέλη ικανά να δώσουν ένα αποδοτικό λέιζερ.

- Θάλαμος άντλησης , ο θάλαμος άντλησης χρησιμοποιείται στα λέιζερ για την βελτίωση της απόδοσης τους. Κρίθηκε ότι σε αυτό το λέιζερ δεν είναι σκόπιμο σε αρχικό στάδιο για να υπάρχει καλύτερος έλεγχος στα εσωτερικά κυκλώματα και συστήματα του λέιζερ όμως σε δεύτερο χρόνο θα ήταν άξια προσθήκη στην διάταξη

Η μελέτη αυτή αφορά την εκτίμηση της εφικτότητας της επιτυχούς υλοποίησης και λειτουργίας του σκοπούμενου συστήματος, της προδιαγραφής των απαραίτητων οπτικών στοιχείων, καθώς και της πρόβλεψης αναγκαίων μέτρων μετέπειτα βελτίωσης του σχεδιασμού και της αποδοτικότητάς του.

13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

[1] Thermal Analysis of the Factors Influencing Junction Temperature of LED Panel Sources
Krzysztof Baran, Antoni Różowicz , Henryk Wachta , Sebastian Różowicz and Damian Mazur.

[2] LSPDD: Lamp Spectral Power Distribution Database
https://lspdd.org/app/en/lamps?lampcat=LED&numericfilters=cct-0.12-0.92_cri-0-1_ipi-0.3-0.7_msi-0.3-0.7_sli-0.3-0.7_percentblue-0-1

[3] The Nation Gallery Further information relating to examination of SPD Curves
<https://research.ng-london.org.uk/scientific/spd/?page=info&ids=183>

[4] Light Intensity <https://www.silumen.com/en/content/42-light-intensity-watts-or-lumens>

[5] Quantum Defect Dr. Rüdiger Paschotta
https://www.rp-photonics.com/quantum_defect.html

[6] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9B%CE%AD%CE%B9%CE%B6%CE%B5%CF%81>

[7]<https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/MED263/Laser%20and%20medical%20applications.pdf>

[8]<https://ledstuff.co.nz/calculators>

[9]<https://www.rapidtables.com/calc/light/lux-to-lumen-calculator.html>

[10]https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficacy

[11]<https://kithub.cc/2015/11/how-many-volts-are-needed-to-power-an-led-2/>

[12]https://en.wikipedia.org/wiki/Xenon_arc_lamp

[13]https://www.researchgate.net/figure/Fig-2-Spectra-of-the-different-indoor-light-sources-a-Xenon-lamp-b-incandescent_fig1_330372622

[14]https://www.researchgate.net/figure/Fig-2-Spectra-of-the-different-indoor-light-sources-a-Xenon-lamp-b-incandescent_fig1_330372622

[15]https://www.aogcrystal.com/products/laser-crystals/nd-yag-crystal/?gclid=CjwKCAiArY2fBhB9EiwAWqHK6sKK4u6bBHylRmOMPvgnpRF9CWpg_9Cq7n0CyPGQIGNZeFDCsqKsnRoCfCEQAvD_BwE

[16]<https://ieeexplore.ieee.org/document/1075762>

[17]<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA138055.pdf>