

# Nd:YAG Laser

## 1 Σκοπός

Σκοπός του παρόντος εργαστηρίου, είναι η γνωριμία με το laser Nd:YAG και η εξοικείωση με συστήματα laser που δεν είναι ορατά στο ανθρώπινο μάτι. Στο πλαίσιο αυτής της άσκησης θα κατανοήσετε τον τρόπο λειτουργίας του Nd:YAG Laser, θα σήσετε ένα laser που εκπέμπει στο υπέρυθρο, θα εφαρμόσετε παθητικό Q-switching και θα παρακολουθήσετε μια επίδειξη κάποιων βασικών χαρακτηριστικών των laser.

## 2 Γενικά Στοιχεία

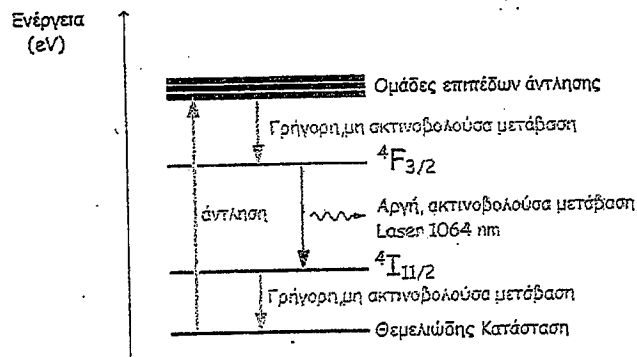
Το laser νεοδυμίου κατασκευάστηκε το 1964 από μια ομάδα των εργαστηρίων Bell, με επικεφαλής τους Joseph E. Geusic και Richard G. Smith<sup>1</sup>. Ανήκει στην κατηγορία των laser στερεάς κατάστασης. Το ενεργό υλικό αυτού του συστήματος είναι το αργλικό ύπριο με χημικό τύπο  $Y_3Al_5O_{12}$ , γνωστό και ως YAG (Yttrium Aluminum Garnet) σε κρυσταλλική μορφή, στο οποίο έχουν αντικατασταθεί ιόντα  $Y^{3+}$  με ιόντα της σπάνιας γαίας  $Nd^{3+}$ , γεγονός που υποδηλώνεται από τον χαρακτήρα ' : ' στον τύπο Nd:YAG. Το χρώμα του κρυστάλλου είναι ιώδες, όπως θα παρατηρήσετε από κοντά, το οποίο οφείλεται στην νόθευση του κρυστάλλου με ιόντα νεοδυμίου. Αυτή, επιτυγχάνεται πλέον<sup>2</sup> με την μέθοδο Czochralski<sup>3</sup>. Όπως είναι γνωστό, για να παρατηρηθεί ακτινοβολία laser πρέπει να έχει επιτευχθεί αντιστροφή πληθυσμών. Στην περίπτωση του Nd:YAG, αυτό γίνεται μέσω οπτικής άντλησης<sup>4</sup>. Αυτή η ακτινοβολία έχει μήκος κύματος 1064 nm, όπως φαίνεται στο απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα 4 επιπέδων που ακολουθεί.

<sup>1</sup>Η πρώτη δημοσίευση στον περιοδικό τύπο [http://apl.aip.org/resource/1/applab/v4/i10/p182\\_s1](http://apl.aip.org/resource/1/applab/v4/i10/p182_s1)

<sup>2</sup>Η χρήση της μεθόδου Czochralski για την ανάπτυξη του Nd:YAG <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/apr/article/download/6022/4856>

<sup>3</sup>Η μέθοδος Czochralski [http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski\\_process](http://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process)

<sup>4</sup>Βλέπε Παράρτημα



Σχήμα 1: Ποιοτικό ενεργειακό διάγραμμα (τεσσάρων επιπέδων) των αποδιεγέρσεων του Nd:YAG.

### 3 Προφυλάξεις

Το laser που θα χρησιμοποιήσετε έχει μέγιστη ισχύ 1000 mW. Για να αντιληφθείτε το μέγεθος αυτής της τιμής, αρκεί να αναφερθεί πως ένα laser 100 mW μπορεί να τρυπήσει ένα μπαλόνι ακαριαία<sup>5</sup>. Θυμηθείτε επίσης πως το πάχος του κερατοειδούς και του αμφιβληστροειδούς είναι συγκρίσιμο με το πάχος ενός φουσκωμένου μπαλονιού. Γι' αυτό, να αποφύγετε οποιαδήποτε επαφή με τα μάτια και το δέρμα σας<sup>6</sup>. Πρέπει να είστε εξαιρετικά προσεκτικοί όχι μόνο λόγω της υψηλής ισχύος, αλλά κυρίως εξ αιτίας του μήκους κύματος των 1064 nm, που δεν είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι. Κατά την διεξαγωγή της άσκησης, να βρίσκεστε όρθιοι ώστε το επίπεδο των ματιών σας να μην συμπίπτει με το επίπεδο της δέσμης. Επίσης, αποφύγετε τα γυαλιά ηλίου σαν προστατευτικό μέσο. Τα γυαλιά σας έχουν φτιαχτεί για να προστατεύουν από την υπεριώδη ακτινοβολία και όχι την υπέρυθρη!

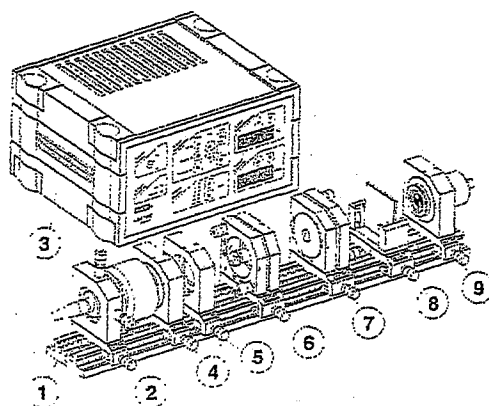
### 4 Πειραματική Διάταξη

Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί είναι ένα laser Nd:YAG, στην πρώτη του αρμονική (1064 nm), οπτικά αντλούμενο από μια δίοδο-L.E.D. (808 nm). Η πλήρης διάταξη φαίνεται σχηματικά παρακάτω.

1. Βοηθητική ράγα, μήκους 50 cm, πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί η διάταξη.
2. Δίοδος άντλησης του Nd:YAG, με ρύθμιση x-y. Μέγιστη ισχύς 450 mW. Θα παρατηρήσετε μια ένδειξη κόκκινου LED όταν βρίσκεται σε λειτουργία.

<sup>5</sup>Green Laser 100mW Popping a Balloon <http://www.youtube.com/watch?v=fGEdH-nTK1INR=1>

<sup>6</sup>Class IV laser. Περισσότερα για την ασφάλεια των laser [http://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_safety](http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_safety)



Σχήμα 2: Η διάταξη του πειράματος: Laser Nd:YAG.

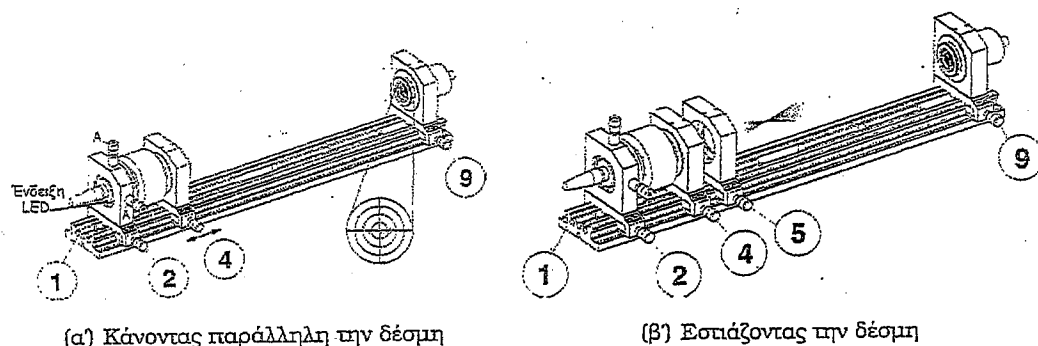
3. **Τροφοδοτικό** ρεύματος, της διόδου άντλησης. Δυνατότητα ρύθμισης του ρεύματος και της θερμοκρασίας άντλησης. Δυνατότητα άντλησης με τριγωνικό και τετραγωνικό παλμό. Μπορεί να συνδεθεί με φωτοανιχνευτή και να ενισχυθεί η ένταση του ανιχνευομένου φωτός.
4. **Φακός** που μειατρέπει το σφαιρικό φως που εκπέμπει η διόδος σε παράλληλο (θυμηθείτε πως μια πηγή φωτός εκπέμπει σφαιρικά και ομοιογενώς).
5. **Συγκλίνων φακός**, εστιακής απόστασης 60 mm που εστιάζει την, παράλληλη πλέον, δέσμη που εκπέμπει η διόδος, στον κρύσταλλο Nd:YAG.
6. Κρύσταλλος **Nd:YAG**, το ενεργό υλικό δηλαδή του συστήματός μας. Στην πλευρά του κρυστάλλου, που βρίσκεται προς την διόδο, υπάρχει ανακλαστική επίστρωση. Έτσι ο κρύσταλλος δεν είναι μόνο το ενεργό υλικό, αλλά και το ένα κάτοπτρο της κοιλότητας μας(συγκεκριμένα το **κάτοπτρο '100%'**)!
7. Το **κάτοπτρο '50%'**, δηλαδή το ημιανακλαστικό κάτοπτρο του οπτικού αντηχείου, το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπει την διέλευση τόσο της πρώτης (1064 nm) όσο και της δεύτερης αρμονικής (532 nm).
8. **Φίλτρο** που εμποδίζει την διέλευση ορατού φωτός. Πρακτικά είναι ένα μαύρο γυαλί, που λόγω χρώματος, μπορεί να απορροφά κάθε ορατό μήκος κύματος.
9. **Φωτοανιχνευτής** με περιοχή βέλτιστης απόκρισης 400 – 1100 nm. Μπορεί να συνδεθεί με παλμογράφο μέσω σύνδεσης BNC. Μπορείτε επίσης να χρησιμοποιήσετε ένα ψηφιακό βολτόμετρο, απευθείας στην υποδοχή BNC <sup>7</sup>.
10. Τέλος, θα χρησιμοποιήσετε μια **κάρτα** ανίχνευσης **υπέρουθρης** ακτινοβολίας, έναν **παλμογράφο**, ένα **ψηφιακό βολτόμετρο** και ένα **ισχυόμετρο**.

<sup>7</sup>Βλέπε παράρτημα

## 5 Μετρήσεις με το Nd:YAG Laser

### 5.1 Ρεύμα διόδου VS Ισχύς διόδου

Οι εργαστηριακές μετρήσεις θα ξεκινήσουν απλά, προσπαθώντας να κατανοήσουμε την συμπεριφορά της αντλητικής διόδου. Αυτό που θέλουμε να δούμε είναι η σχέση μεταξύ του ρεύματος που την διαρρέει και της «έντασης»-ισχύος του φωτός που εκπέμπει. Αυτή η μέτρηση είναι σημαντική, διότι το φως που εκπέμπει η διόδος θα χρησιμοποιηθεί για να διεγείρει τον κρύσταλλο Nd:YAG. Η γνώση λοιπόν, της συμπεριφοράς αυτού του φωτός, θα βοηθήσει να επιτευχθεί η βέλτιστη άντληση. Για την διεξαγωγή της μέτρησης ενεργείστε ως εξής:



Σχήμα 3: Διάταξη για την μέτρηση ρεύματος-ισχύος της διόδου

- ο Τοποθετείστε την διόδο και τον φακό που θα παραλληλίσει την δέσμη(είναι ο μικρότερος, σε διάμετρο, φακός) στην ράγα, σε απόσταση 1-2 mm μεταξύ τους. Τοποθετείστε τον φωτοανιχνευτή.
- ο Θέσατε σε λειτουργία το τροφοδοτικό, χρησιμοποιώντας τον διακόπτη που βρίσκεται στην πίσω πλευρά και το κλειδί που βρίσκεται στην μπροστινή. Μόλις το κλειδί γυρίσει στη θέση «On» θα ανάψει το LED της διόδου, υποδεικνύοντας πιθανή εκπομπή ακτινοβολίας.
- ο Αυξείστε το ρεύμα μέχρι την μέγιστη τιμή του (567 mA). Μέσω των βιδών A, οι οποίες μετακινούν την δέσμη κατά x-y και μικρής μετακίνησης του φακού, προσπαθήστε να κεντράρετε την δέσμη (Σχήμα 3(α)).
- ο Τοποθετείστε τον συγκλίνοντα φακό σε απόσταση  $\sim 2$  cm από τον φακό που παραλληλίζει την δέσμη(Σχήμα 3(β)).
- ο Πλησιάστε τον φωτοανιχνευτή (ή το ισχυόμετρο) κοντά στον συγκλίνοντα φακό ( $\sim 10 - 15$  cm).

- ο Μεταβάλλοντας το ρεύμα της διόδου (I) από 0 – 567 mA με βήμα 50 , μετρήστε την τάση (V) στον φωτοανιχνευτή (ή στο ισχυόμετρο), αφού έχετε αφαιρέσει τον στόχο.

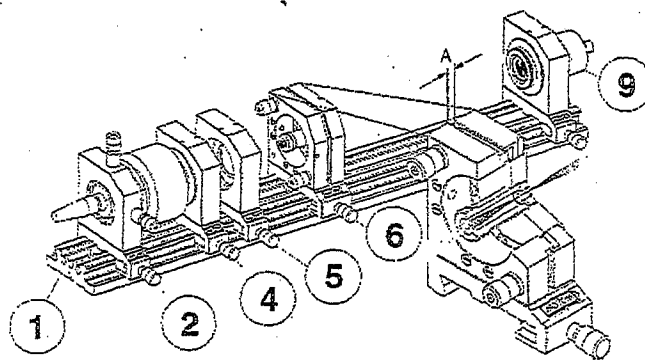
Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στον παρακάτω πίνακα.

I (mA)	V (mV)	I (mA)	V (mV)
0		300	
50		350	
100		400	
150		450	
200		500	
250		567	

Πίνακας 1: Μειρήσεις της συνάρτησης  $V=f(I)$

## 5.2 Φάσμα απορρόφησης του Nd:YAG

Η εργαστηριακή άσκηση θα συνεχιστεί με μια ενδιαφέρουσα μέτρηση... Θα μετρηθεί το φάσμα απορρόφησης του Nd:YAG, με έναν ανορθόδοξο αλλά πολύ απλό τρόπο. Η βασική ιδέα είναι, να ρίξουμε φως, διαφορετικών μηκών κύματος, πάνω στον κρύσταλλο και να μετρήσουμε με έναν φωτοανιχνευτή πόσο ισχυρό είναι αυτό. Τα μήκη κύματος που περνούν, θα είναι ισχυρά, ενώ αυτά που απορροφώνται, ασθενέστερα. Για να ξεκινήσει η μέτρηση, πρέπει να τοποθετηθεί ο κρύσταλλος στην εστία του φακού, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4: Μέτρηση του φάσματος απορρόφησης Nd:YAG

Για να βρείτε το εν λόγω σημείο, χρησιμοποιήστε ένα μαύρο, φωτογραφικό χαρτί. Το σημείο, στο οποίο το φωτογραφικό χαρτί φλέγεται, είναι η εστία του φακού.

Στη συνέχεια, αφού κλείσετε όσο το δυνατόν περισσότερο τα φώτα, εκτελέστε τα παρακάτω βήματα για να πάρετε το φάσμα:

- ο Τοποθετείστε τον ανιχνευτή σε μια απόσταση  $\sim 10-15$  cm από τον κρύσταλλο, στο σημείο όπου μπορείτε να παρατηρήσετε μεταβολή στο προσπίπτον φως, για κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας (T) από  $20^{\circ}\text{C}$  -  $28^{\circ}\text{C}$  για σταθερό ρεύμα άντλησης  $567$  mA.
- ο Μόλις βρείτε την σωστή θέση του ανιχνευτή, χωρίς να μεταβάλετε στην συνέχεια το ρεύμα της άντλησης(εξάρτηση μήκους κύματος και ρεύματος άντλησης!), θέσατε την θερμοκρασία στους  $5^{\circ}\text{C}$  και αναμείνατε 2 λεπτά. Μετρήστε την «ένταση» (V) του διερχόμενου φωτός, απευθείας από τον φωτοανιχνευτή με το βολτόμετρο.
- ο Μεταβάλλοντας με βήμα 1 ή 2 ή  $5^{\circ}\text{C}$ , μέχρι τους  $35^{\circ}\text{C}$ , μετρήστε την ένταση του διερχόμενου φωτός.
- ο **Προσοχή!** Στις θερμοκρασίες  $< 30^{\circ}\text{C}$  ένας χρόνος των  $\sim 15$  sec επαρκεί για την αποκατάσταση της θερμοκρασιακής ισορροπίας. Στις θερμοκρασίες  $> 30^{\circ}\text{C}$  δεν χρειάζεται αναμονή, διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της διόδου.

Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στον παρακάτω πίνακα.

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	V (mV)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	V (mV)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	V (mV)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	V (mV)
5		13		21		29	
6		14		22		30	
7		15		23		31	
8		16		24		32	
9		17		25		33	
10		18		26		34	
11		19		27		35	
12		20		28		-	-

Πίνακας 2: Φάσμα απορρόφησης του Nd:YAG

### 5.3 Εξάρτηση μήκους κύματος και ρεύματος άντλησης

Σε αυτήν την ενότητα, θα δούμε πως το μήκος κύματος εκπομπής της διόδου, μεταβάλλεται σε σχέση με το ρεύμα άντλησης της. Η διάταξη είναι η ίδια (βλ. Σχήμα 5.2) που χρησιμοποιήθηκε πριν. Για να προχωρήσετε:

- ο Βρείτε την **θερμοκρασία** για την οποία είχατε την **μέγιστη απορρόφηση**<sup>8</sup> και θέστε την στο τροφοδοτικό.
- ο Με διαδοχικά βήματα, των 50 mA προς τα κάτω, μεταβάλετε το **ρεύμα** της άντλησης (I).
- ο Μετρήστε την **έξοδο** (V) του φωτοανιχνευτή. Θα παρατηρήσετε, πως η τιμή που μόλις μετρήσατε διαφέρει από την αντίστοιχη ελάχιστη τιμή, της προηγούμενης ενότητας. Αυτό σημαίνει πως ο κρύσταλλος παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ως προς την απορρόφηση. Δηλαδή, για την ίδια θερμοκρασία, για διαφορετικό όμως ρεύμα άντλησης, η δίοδος εκπέμπει διαφορετικό μήκος κύματος.
- ο Για κάθε μεταβολή στο ρεύμα, **μεταβάλετε την θερμοκρασία**, μέχρι η έξοδος στον φωτοανιχνευτή, να πάρει την ελάχιστη τιμή της προηγούμενης ενότητας.

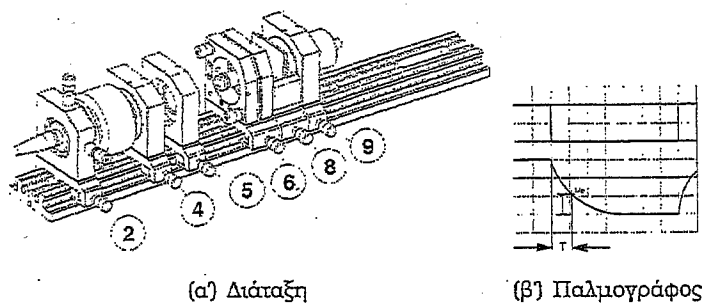
Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στον παρακάτω πίνακα.

I (mA)	(T) (°C)	I (mA)	(T) (°C)
300		450	
350		500	
400		567	

Πίνακας 3: Εξάρτηση μήκους κύματος και ρεύματος άντλησης

#### 5.4 Μέτρηση μέσου χρόνου ζωής του ενεργειακού επιπέδου $^4F_{3/2}$

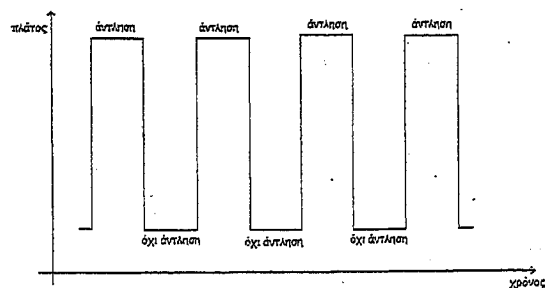
Το ενεργειακό επίπεδο  $^4F_{3/2}$ , είναι το επίπεδο στο οποίο δημιουργείται η αντιστροφή πληθυσμών και συνεπώς μας δίνει ακτινοβολία laser. Η διάταξη γι' αυτήν την μέτρηση είναι η εξής:



Σχήμα 5: Διάταξη για την μέτρηση του μέσου χρόνου ζωής της στάθμης  $^4F_{3/2}$

<sup>8</sup>Είναι η θερμοκρασία, στην οποία η έξοδος που μετρήσατε, είναι ελάχιστη και βρίσκεται μεταξύ  $25^{\circ}C$  και  $27^{\circ}C$ .

Η βασική ιδέα είναι να αντλήσουμε με έναν τετραγωνικό παλμό, το οποίο πρακτικά σημαίνει να διεγείρουμε περιοδικά για μια χρονική περίοδο, όπως δείχνει το διπλανό σχήμα. Είναι ανάλογο του να πιέζουμε ένα κουμπί για 2 δευτερόλεπτα και ύστερα να το αφήνουμε. Να το ξαναπατάμε και να το ξαναφήνουμε κ.ο.κ.. Ο κρύσταλλος αποτελεί ένα φυσικό σύστημα. Γνωρίζουμε, πως όλα τα φυσικά συστήματα χαρακτηρίζονται από αδράνεια. Αυτό σημαίνει πως σε κάθε μεταβολή του περιβάλλοντός τους, απαιτείται ένα χρονικό διάστημα μέχρι να προσαρμοστούν, ο λεγόμενος χρόνος απόκρισης ή προσαρμογής. Εκμεταλλευόμενοι αυτήν την θεμελιώδη ιδιότητα, θα μετρήσουμε τον χρόνο ζωής της στάθμης  $^4F_{3/2}$ . Κατά την άντληση, ο κρύσταλλος έχει διεγερθεί. Όταν εμείς, απότομα σταματήσουμε την άντληση (γιαυτό χρησιμοποιούμε τετραγωνικό παλμό), περιμένουμε ο κρύσταλλος να αποδιεγερθεί. Το γεγονός της μη ακαριαίας απόκρισης, μας δίνει την δυνατότητα να μετρήσουμε τον χρόνο ζωής  $T$ , ο οποίος βρίσκεται στο σημείο όπου το σύστημά μας έχει αποδιεγερθεί σε έναν παράγοντα  $1/e$  (έχει πέσει στο  $\sim 30\%$  του αρχικού πληθυσμού), όπως φαίνεται στο σχήμα 5(β). Για να μετρήσουμε τον χρόνο  $T$ , ακολουθούμε τα εξής βήματα:



Σχήμα 6: Ορθογώνιος παλμός

- ο Συνδέστε τον φωτοανιχνευτή με έναν παλμογράφο, δύο καναλιών.
- ο Στην πίσω όψη του τροφοδοτικού<sup>9</sup>, υπάρχει μια υποδοχή τύπου BNC, με όνομα **Modulator, Output**. Συνδέστε σε αυτήν την υποδοχή το δεύτερο κανάλι του παλμογράφου.
- ο Το τροφοδοτικό, στην μπροστινή πλευρά<sup>10</sup>, διαθέτει μια περιοχή επιλογών **Modulation**. Επιλέξτε **rectangle**. Στην συνέχεια, στην ίδια περιοχή επιλογών, πιέστε το κουμπί **Off**, αν και μόνο αν ανάβει το πράσινο LED δίπλα του.
- ο Ρυθμίστε τον παλμογράφο, έτσι ώστε να βλέπετε δύο κυματομορφές: τον ορθογώνιο παλμό της άντλησης και την έξοδο του φωτοανιχνευτή, όπως στο σχήμα 5(β). Αν είναι αναγκαίο, χρησιμοποιήστε την επιλογή **Frequency**, η οποία ρυθμίζει την συχνότητα της διέγερσης, ώστε να βελτιώσετε την εικόνα στην οθόνη του παλμογράφου.
- ο Μετρήστε και καταγράψτε τον χρόνο  $T$ .

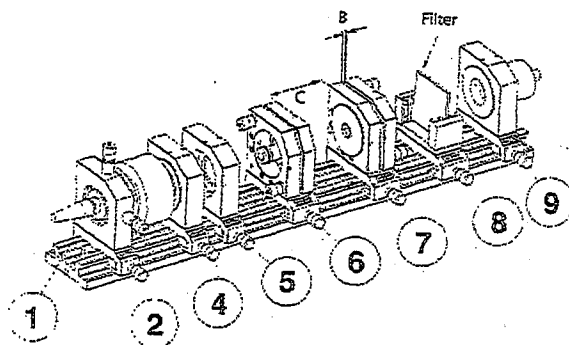
<sup>9</sup>Βλέπε παράρτημα

<sup>10</sup>Βλέπε παράρτημα



## 5.5 Παραγωγή υπέρυθρης ακτινοβολίας laser

Και επιτέλους έφτασε η στιγμή που όλοι περιμέναμε! Θα «δείτε», πιθανότητα για πρώτη φορά, υπέρυθρη ακτινοβολία. Όπως έχει προαναφερθεί, να είστε εξαιρετικά προσεκτικοί (θυμηθείτε το φωτογραφικό χαρτί) και να διατηρείτε το επίπεδο των ματιών σας ψηλότερα από το επίπεδο της δέσμης. Μην έχετε γυαλιά κρεμασμένα στο στήθος σας, γιατί είναι επίφοβη η ανάκλαση της δέσμης στα μάτια κάποιου συμφοιτητή σας. Ας αρχίσουμε την ταλάντωση! Η διάταξη τροποποιείται, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 7: Laser Nd:YAG

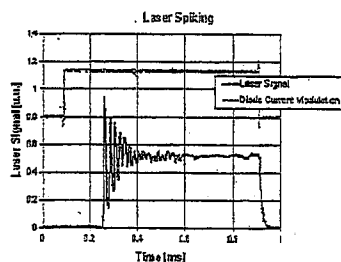
- ο Αφαιρέστε την ορθογώνια άντληση, πιέζοντας το κουμπί **Off** στην περιοχή **Modulation**.
- ο Αφαιρέστε από τον παλμογράφο, την **κυματομορφή** της άντλησης.
- ο Απομακρύνετε, προσωρινά το **φίλτρο** αποκοπής ορατής ακτινοβολίας.
- ο Τοποθετείστε το **κάτοπτρο 50%** σε απόσταση περί τα 5 cm από τον κρύσταλλο Nd:YAG.
- ο Επανατοποθετείστε το **φίλτρο**, μεταξύ του κατόπτρου 50% και του φωτοανιχνευτή.
- ο Ρυθμίστε το ρεύμα της τροφοδοσίας στην τιμή **567 mA**.
- ο Μεταξύ φίλτρου και φωτοανιχνευτή, παρεμβάλετε την κάρτα **υπερύθρου**. Αν δεν σας δίνει ένδειξη υπέρυθρης ακτινοβολίας, ακολουθείστε τις οδηγίες του επόμενου βήματος. Αν «βλέπετε» υπέρυθρη ακτινοβολία, παραλείψτε το επόμενο βήμα.
- ο Ρυθμίστε τον παλμογράφο, ώστε να βλέπετε μια κυματομορφή. Μεταβάλετε την **απόσταση B** μέσω των δύο κοχλιών, που βρίσκονται πάνω στο κάτοπτρο 50%, μέχρι να δείτε την κυματομορφή στον παλμογράφο να «ανεβαίνει». Προσπαθήστε να την φέρετε στο μέγιστο δυνατό σημείο. Αν χρειαστεί μεταβάλετε την απόσταση C. Μόλις το καταφέρετε, παρεμβάλετε ξανά την κάρτα **υπερύθρου**.

- ο Μεταβάλετε την απόσταση Β, μέχρι να σχηματιστεί πάνω στην κάρτα υπερύθρου, ένα κυκλικό αποτύπωμα. Αν χρειαστεί μεταβάλετε την απόσταση C. Προσπαθήστε να σχηματίσετε, μια όμορφη και συμμετρική κηλίδα.
- ο Αυτό ήταν! Μόλις καταφέρατε να φτιάξετε την πρώτη σας υπέρυθη ακτινοβολία laser!

## 5.6 Laser Spiking

Σε αυτήν την ενότητα, θα παρατηρήσετε μια χαρακτηριστική ιδιότητα των laser, το λεγόμενο **spiking**<sup>11</sup>. Η ιδιότητα αυτή, έχει να κάνει με τον χρόνο προσαρμογής ενός φυσικού συστήματος σε εξωτερικές διεγέρσεις. Όταν λοιπόν, διεγείρουμε τον κρύσταλλο μας, με έναν οποιοδήποτε τρόπο, αυτός όχι μόνο δεν αποκρίνεται άμεσα, αλλά παρουσιάζει μια διαφορετική, πιο εχθρική, συμπεριφορά από αυτήν που αναμένουμε. Για να παρατηρήσετε αυτήν την συμπεριφορά, ακολουθείστε τα παρακάτω βήματα:

- ο Εφαρμόστε ορθογώνια άντληση, πιέζοντας το κουμπί **On** στην περιοχή **Modulation**.
- ο Μεταξύ φίλτρου και φωτοανιχνευτή, παρεμβάλετε την κάρτα **υπερύθρου**.
- ο **Μειώστε**, το **ρεύμα** της άντλησης, σταδιακά, μέχρι να εξαφανιστεί η υπέρυθη κηλίδα. Το σημείο που αυτό συμβαίνει, είναι το **κατώφλι** του laser. Για να παρατηρήσετε το **spiking**, πρέπει το laser να λειτουργεί κοντά στο **κατώφλι**. Αυξήστε το ρεύμα, μέχρι να εμφανιστεί στον παλμογράφο μια εικόνα σαν την παρακάτω.



Σχήμα 8: Laser spiking

- ο Ρυθμίστε κατάλληλα τον παλμογράφο, ώστε να εμφανιστεί η εν λόγω εικόνα.
- ο Αν χρειάζεστε **καθαρότερη** εικόνα, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την **ενίσχυση** που παρέχει το τροφοδοτικό. Συνδέστε τον **φωτοανιχνευτή** με την υποδοχή **Photo Diode Input**, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του τροφοδοτικού.

<sup>11</sup>Για περισσότερες πληροφορίες <http://www.rp-photonics.com/spiking.html>

- ο Συνδέστε τον **παλμογράφο** με την υποδοχή **Photo Diode Output**, που βρίσκεται και αυτή στο πίσω μέρος του τροφοδοτικού.
- ο Επιλέξτε την επιθυμητή ενίσχυση, μέσω του επιλογέα **gain**.
- ο Ρυθμίστε κατάλληλα τον παλμογράφο, ώστε να βλέπετε το **spiking**.

### 5.7 Εγκάρσιοι ρυθμοί laser [TEM<sub>nm</sub>]

Μια τελευταία, αλλά ζωτικής σημασίας για εφαρμογές, επίδειξη αποτελεί η ρύθμιση των εγκάρσιων ηλεκτρομαγνητικών ρυθμών ταλάντωσης. 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:

$$E(x, y, z) = E_0 \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L}\right) e^{\mp \gamma_{nm} z} \quad (1)$$

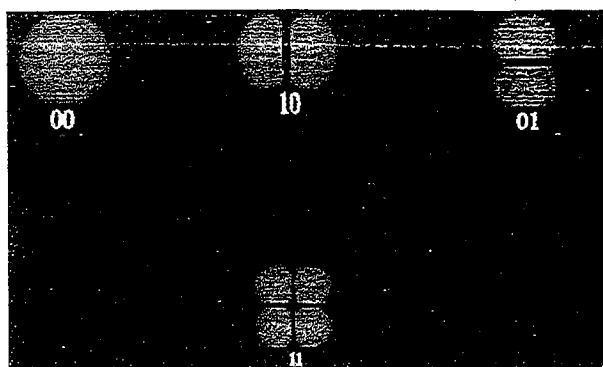
$$H(x, y, z) = \pm \frac{E_0}{z_0} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L}\right) e^{\mp \gamma_{nm} z} \quad (2)$$

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<sup>12</sup> και  
 $z_0$  η κυματική αντίσταση του κενού<sup>13</sup>

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.

<sup>12</sup>  $\gamma_{nm} = \sqrt{\epsilon\mu(\omega_{nm}^2 - \omega^2)}$ , όπου  $\omega_{nm}$  η συχνότητα αποκοπής του εκάστοτε ρυθμού,  
 $\omega_{nm}^2 = \left(\frac{m\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2$

<sup>13</sup>  $z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$



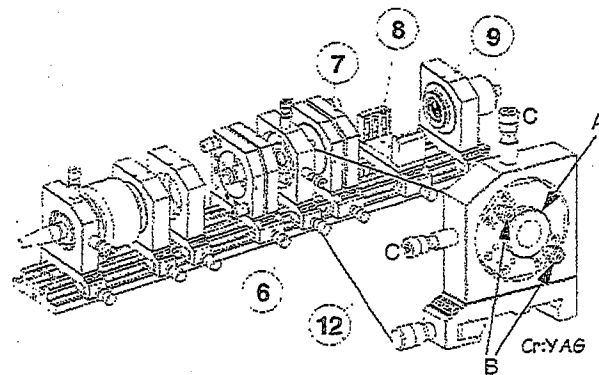
Σχήμα 9: Μερικοί βασικοί ρυθμοί  $TEM_{nm}$ .

Για να παρατηρήσετε τους διάφορους ρυθμούς:

- ο Μιαζύ φωτοανιχνευτή και φίλτρου, τοποθετήστε την κάρτα **υπερύθρου**.
- ο Αυτήν την στιγμή βλέπετε τον ρυθμό  $TEM_{00}$ .
- ο Μιατοπιζοντας τους κοχλίες του κατόπτρου 50% κατάλληλα, θα καταφέρετε να δείτε περισσότερους ρυθμούς.

### 5.8 Παθητικό Q-Switching

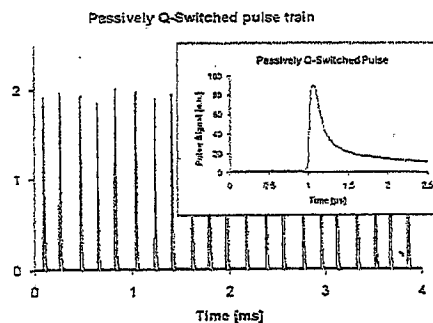
Στην τελευταία ενότητα θα δείτε μια πολύ εντυπωσιακή και απλή τεχνική για την μετατροπή μιας συνεχούς δέσμης, σε παλμική. Θα χρησιμοποιήσετε την τεχνική του παθητικού Q-Switching με έναν κορέσιμο απορροφητή: τον κρύσταλλο Cr:YAG. Οι κορέσιμοι απορροφητές, είναι υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μεταβάλλουν την συμπεριφορά της απορρόφησής τους στο φως, ανάλογα με την ένταση και την συχνότητα της ακτινοβολίας που προσπέφτει σε αυτά. Σε απλά λόγια, αυτό σημαίνει πως με την πρόσπτωση ακτινοβολίας, αρχικά είναι διαφανή. Καθώς όμως η δέσμη, εναποθέτει ενέργεια στο υλικό, αυτό γίνεται σκοτεινότερο με αποτέλεσμα να αφήνει λιγότερο φως να το διαπεράσει, μέχρι το σημείο που γίνεται πλήρως σκοτεινό στην ακτινοβολία. Στην συνέχεια αρχίζει η αντίστροφη διαδικασία και το υλικό γίνεται όλο και πιο διαφανές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία μέχρι να γίνει πλήρως διαπερατό. Και ο κύκλος συνεχίζεται... Για να παρατηρήσετε αυτό το φαινόμενο θα πρέπει να προσθέσετε τον κρύσταλλο Cr:YAG μέσα στο οπτικό αντηχείο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



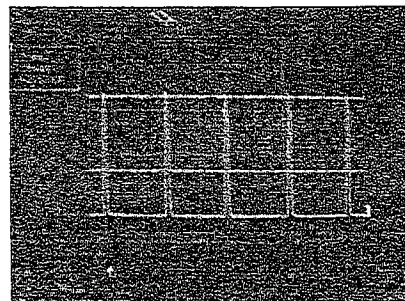
Σχήμα 10: Πειραματική διάταξη για την εφαρμογή παθητικού Q-Switching

Είναι πολύ πιθανό να μην παρατηρήσετε παλμική λειτουργία, στον παλμογράφο. Σε αυτήν την περίπτωση:

- ο Μετατοπίστε το κάτοπτρο 50% σε απόσταση περί τα 10 cm από τον κρύσταλλο .
- ο Μετακινήστε τον κρύσταλλο μέχρι να δείτε στον παλμογράφο μια παλμοσειρά όπως στο σχήμα 11(α).



(α) Παλμοσειρά

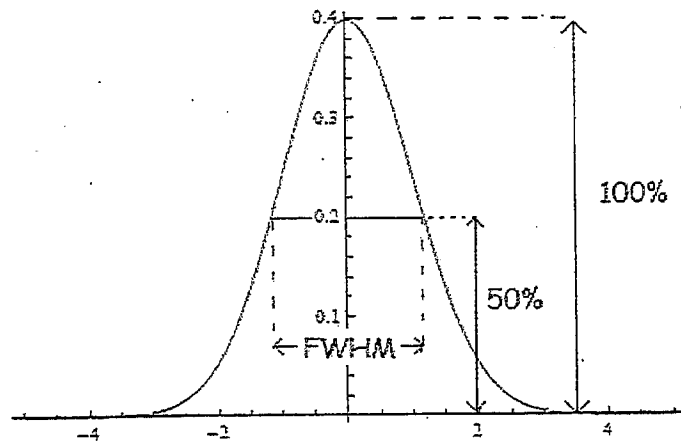


(β) Κατόφλι παλμοσειράς

Σχήμα 11: Παλμοσειρές μετά την εφαρμογή του Q-Switching

- ο Στην αρχή, θα δείτε λίγους παλμούς, όπως στο σχήμα 11(β).
- ο Ρυθμίστε κατάλληλα την θέση του κρυστάλλου Cr:YAG ώστε να επιτύχετε μια συχνότητα παλμών περί τα 10kHz. Αυτό σημαίνει πως πρέπει να βλέπετε περίπου 10 παλμούς, όταν το πλάτος του παλμογράφου σας είναι 1 msec.
- ο Αφού επιτύχετε μια ικανοποιητική συχνότητα παλμών, ρυθμίστε τον παλμογράφο ώστε να επικεντρωθεί σε έναν από αυτούς.

- ο Μετρήστε την χρονική του διάρκεια μειρώντας το FWHM (Full Width at Half Maximum), όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 12: Full Width @ Half Maximum

- ο Τέλος, θα δούμε τι σχέση έχει το ρεύμα άνιλησης με την συχνότητα των παλμών.
- ο Μεταβάλλετε το ρεύμα της άνιλησης, από 400 έως 550 mA με βήμα 10 και μετρήστε το πλήθος των παλμών.

Καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στον παρακάτω πίνακα.

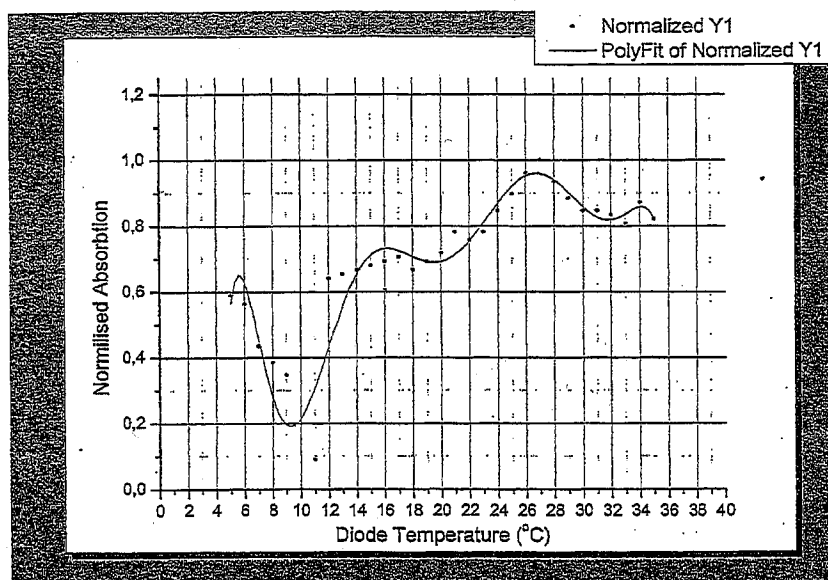
I (mA)	πλήθος παλμών	I (mA)	πλήθος παλμών
400		480	
410		490	
420		500	
430		510	
440		520	
450		530	
460		540	
470		550	

Πίνακας 4: Εξάρτηση συχνότητας παλμών και ρεύματος άνιλησης

## 6 Επεξεργασία των μετρήσεων

Για να επεξεργαστείτε τις μετρήσεις σας, για δική σας ευκολία, θα χρειαστείτε κάποιο πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων και γραφημάτων, όπως το Excel της Microsoft. Ένα πολύ εύχρηστο σχεδιαστικό πακέτο, με πολλές δυνατότητες, κατά την γνώμη του γράφοντα, είναι το Origin Pro 8 ή οποιαδήποτε έκδοσή του. Κάποια άλλα είναι το Root<sup>14</sup>, το graphmatica<sup>15</sup>, το gnuplot<sup>16</sup> και το qtiplot<sup>17</sup>. Μπορείτε επίσης να χρησιμοποιήσετε τα πακέτα Mathematica και Matlab, τα οποία έχετε διδαχθεί στο σχετικό μάθημα. Μπορείτε βέβαια, με περισσότερο κόπο, να κατασκευάσετε τα όποια γραφήματα ζητούνται, σε μιλιμετρέ χαρτί.

1. Σχεδιάστε την γραφική παράσταση της εξόδου του φωτοανιχνευτή, σε σχέση με το ρεύμα άντλησης (Πίνακας 1). Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.
2. Σχεδιάστε το φάσμα απορρόφησης του κρυστάλλου Nd:YAG (Πίνακας 2). Προσοχή! Η έξοδος που έχετε μετρήσει είναι αντιστρόφως ανάλογη της απορρόφησης: όσο μεγαλύτερη η έξοδος, τόσο μικρότερη η απορρόφηση. Αν προσπαθήσετε λοιπόν, να φτιάξετε το φάσμα, χρησιμοποιώντας απευθείας στο διάγραμμα τα ζεύγη, θερμοκρασία-έξοδος φωτοανιχνευτή, θα κάνετε λάθος. Για δική σας ευκολία, ακολουθεί ένα ενδεικτικό φάσμα απορρόφησης.



Σχήμα 13: Φάσμα απορρόφησης του Nd:YAG

<sup>14</sup> Διατίθεται ελεύθερα από το Cern στην ιστοσελίδα [root.cern.ch](http://root.cern.ch) και βασίζεται στην γλώσσα C++

<sup>15</sup> Με ελληνική έκδοση <http://graphmatica.com/>

<sup>16</sup> <http://www.gnuplot.info/>

<sup>17</sup> <http://soft.proindependent.com/qtiplot.html>

3. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του πίνακα 3, κατασκευάστε το διάγραμμα της θερμοκρασίας σε σχέση με το ρεύμα άντλησης. Αυτό το διάγραμμα, αναφέρεται σε λειτουργία ενός μήκους κύματος(αυτό για το οποίο είχατε την μέγιστη απορρόφηση) και μας βοηθάει να επιλέξουμε σωστά το ζεύγος θερμοκρασία-ρεύμα άντλησης, όταν θέλουμε να δουλεύουμε στην μέγιστη απορρόφηση.
4. Συγκρίνετε τον χρόνο ζωής της στάθμης  ${}^4F_{3/2}$  που μετρήσατε με την τιμή που δίνεται στην βιβλιογραφία(81 μsec σε θερμοκρασία δωματίου 25°C). Αν υπάρχουν σημαντικές διαφορές (> 10%) που νομίζετε ότι οφείλονται;  
**Ερώτηση bonus:** Αξιολογήστε την μέθοδο που χρησιμοποιήσατε για αυτήν την μέτρηση. Θα μπορούσαμε να μετρήσουμε οποιαδήποτε μετάβαση; Υπάρχουν περιορισμοί;
5. Η επίδειξη του spiking ήταν πολύ σημαντική. Με βάση το φαινόμενο αυτό, απαντήστε στο εξής ερώτημα(**Ερώτηση bonus**): μπορεί να χρησιμοποιηθεί ορθογώνια άντληση, σαν μια τεχνική παραγωγής παλμών;
6. **Ερώτηση bonus:** Στο εργαστήριο, μετρήσατε την διάρκεια των παλμών μετά την εφαρμογή του Q-Switching. Προσπαθήστε να βρείτε στο διαδίκτυο ή στην βιβλιογραφία, σε ποιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται αντίστοιχοι χρόνοι.
7. Κατασκευάστε το γράφημα της συχνότητας των παλμών σε σχέση με το ρεύμα άντλησης. Σχολιάστε.
8. Τέλος, βρείτε και καταγράψτε δύο εφαρμογές του laser Nd:YAG, συνεχούς ή παλμικής λειτουργίας.



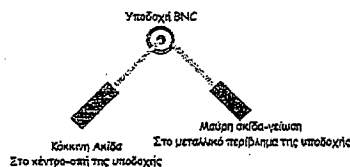
## 7 Παράρτημα

### 7.1 Οπτική άντληση

Για να έχουμε ακτινοβολία laser, πρέπει να προκαλέσουμε μια αργή μετάβαση από ένα επίπεδο, υψηλότερο ενεργειακά, με μεγαλύτερο πληθυσμό σε ένα χαμηλότερης ενέργειας με μικρότερο πληθυσμό (αντιστροφή πληθυσμών). Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό, είναι να «βομβαρδίσουμε» το υλικό με φως. Παλιότερα αυτό γινόταν με το «τύλιγμα» μιας λυχνίας flash γύρω από το υλικό<sup>18</sup>. Η τελευταία και πιο διαδεδομένη πλέον μέθοδος οπτικής άντλησης, έχει αντικαταστήσει την λυχνία flash με μια δίοδο εκπομπής φωτός οι οποίες λόγω της υψηλής τους μονοχρωματικότητας, μπορούν να διεγείρουν το υλικό στα επιθυμητά ενεργειακά επίπεδα. Το laser που θα χρησιμοποιήσετε, διαθέτει μια τέτοια δίοδο, με μήκος κύματος 808 nm.

### 7.2 Μέτρηση σήματος τάσης από έξοδο BNC

Σε αυτήν την παράγραφο, θα μάθετε να μετράτε με το ψηφιακό πολύμετρο, σε μια έξοδο BNC. Η σωστή τοποθέτηση των ακίδων φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



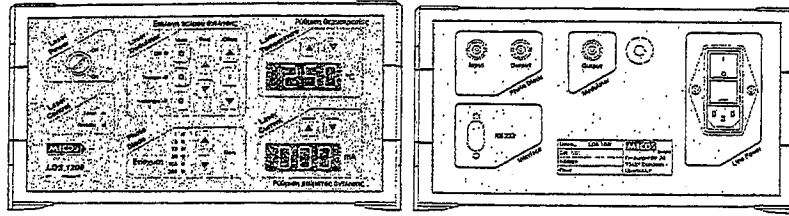
Σχήμα 14: Υποδοχή BNC και σωστή τοποθέτηση των ακίδων

Η βασική τεχνική, είναι να τοποθετήσετε την κόκκινη ακίδα στο κέντρο της υποδοχής. Σε μια υποδοχή BNC, το κέντρο της υποδοχής είναι μια οπή. Η μαύρη ακίδα, η οποία είναι συνδεδεμένη με την γείωση του πολυμέτρου, τοποθετείται στο μεταλλικό κέλυφος που περιβάλλει την υποδοχή. Αν η συνδεσμολογία γίνει ανάποδα, το πολύμετρο θα μετρήσει αρνητική τάση. Η μέτρησή σας όπως δεν θα επηρεαστεί, αφού εσείς θέλετε να μετρήσετε την διαφορά δυναμικού, συνεπώς την απόλυτη τιμή της τάσης. Να είστε ιδιαίτερα προσεκτικοί κατά την μέτρηση, καθώς ενδέχεται να δημιουργηθεί βλάβη στον αντίπαρο BNC από βίαιες κινήσεις.

<sup>18</sup>Μιας λάμπας δηλαδή που ήταν τυλιγμένη γύρω από το υλικό και αναδόσθινε γρήγορα εκπέμποντας δυνατό φως, όπως το flash της φωτογραφικής σας μηχανής

### 7.3 Τροφοδοτικό

Για λόγους πληρότητας και εξοικείωσης με το τροφοδοτικό που θα χρησιμοποιήσετε, ακολουθούν οι δύο όψεις του.



(α) Πρόσωση

(β) Πίσω όψη

Σχήμα 15: Το τροφοδοτικό της εργαστηριακής άσκησης