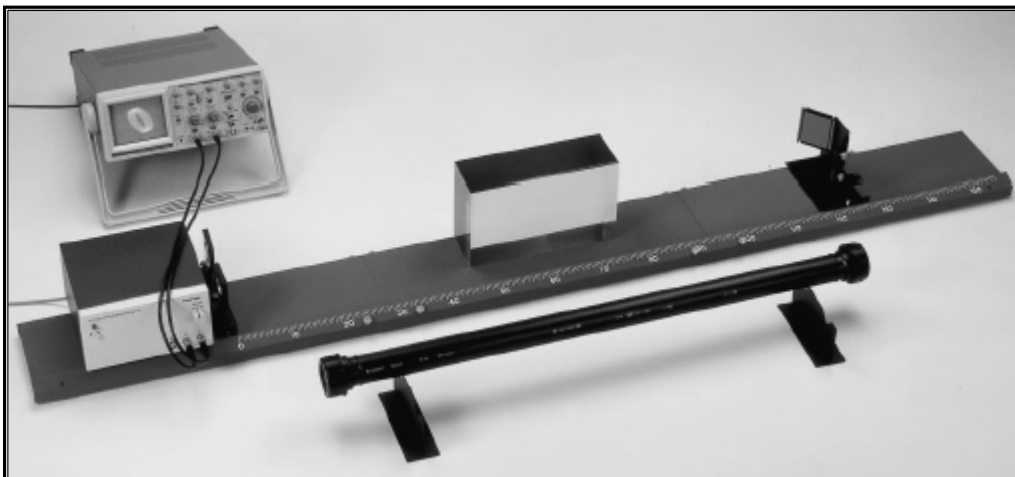


---

ΑΣΚΗΣΗ  
ΝΟ2

---

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ



Γ. Μήτσου

Οκτώβριος 2007

## A. Θεωρία

### Εισαγωγή

Η ταχύτητα του φωτός είναι μια θεμελιώδης φυσική σταθερά με αριθμητική τιμή που σήμερα θεωρείται δεδομένη. Αν όμως λάβουμε υπόψη μας ότι το φως χρειάζεται μόλις ένα δευτερόλεπτο για να ταξιδέψει επτάμισυ φορές γύρω από τη γη, μπορεί κανείς να φανταστεί πόσο δύσκολη θα ήταν η διαδικασία ακριβούς υπολογισμού της ταχύτητάς του. Η αλήθεια είναι ότι χρειάστηκαν προσπάθειες αρκετών αιώνων μέχρι να προσδιοριστεί αυτή η τιμή, με πρώτη αυτή του Γαλιλαίου το 1600, που κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το φως ταξιδεύει πολύ γρήγορα. Σε μεταγενέστερες εποχές αρκετοί παρατηρητές, μεταξύ των οποίων ήταν οι Fizeau, Foucault και Michelson, κατάφεραν με διάφορες τεχνικές να υπολογίσουν την ταχύτητα του φωτός με επιτυχία. Το 1983 η τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό, ορίστηκε διεθνώς ως

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

### 1. Διάδοση του φωτός

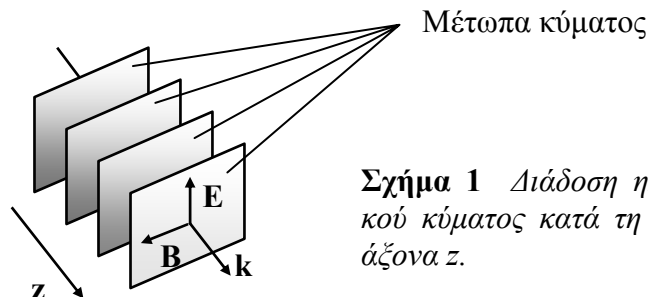
#### 1.1 Το φως ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Το φως, κατά την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, θεωρείται ως ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα με μεταβαλλόμενα, σε σχέση με το χρόνο, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία  $E_x$  και  $B_y$  αντίστοιχα, τα οποία ταλαντώνονται σε διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους και διαδίδονται κατά την διεύθυνση του άξονα  $z$ . Η απλούστερη μορφή ενός τέτοιου κύματος είναι ένα ημιτονοειδές κύμα με γενική μορφή:

$$E_x = E_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0) \quad (1)$$

όπου:  $k$  είναι η σταθερά διάδοσης ή κυματικό άνυσμα και δίνεται από τη σχέση  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα,  $E_0$  το πλάτος του κύματος και  $\phi_0$  η αρχική φάση (για  $t = 0$  και  $z = 0$ ). Το όρισμα  $(\omega t - kz + \phi_0)$  είναι η φάση  $\phi$  του κύματος.

Η σχέση (1) περιγράφει ένα μονοχρωματικό επίπεδο κύμα, που διαδίδεται προς την διεύθυνση του άξονα  $z$ . Σε κάθε επίπεδο, κάθετο προς την διεύθυνση διάδοσης (κατά μήκος του άξονα  $z$ ), η φάση του κύματος είναι σταθερή, πράγμα που σημαίνει ότι το



πεδίο  $\sigma'$  αυτό το επίπεδο είναι επίσης σταθερό. Μια επιφάνεια, πάνω στην οποία η φάση ενός κύματος είναι σταθερή, καλείται μέτωπο κύματος. Είναι φανερό ότι το μέτωπο κύματος ενός επίπεδου κύματος είναι ένα επίπεδο κάθετο προς την διεύθυνση της διάδοσης (Σχήμα 1).

## 1.2 Διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος δια μέσου διηλεκτρικού υλικού

Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται μέσα σε ένα διηλεκτρικό υλικό, το ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο του κύματος επιδρά στα μόρια του υλικού και δημιουργεί ένα μηχανισμό πόλωσης, ο οποίος καθυστερεί τη διάδοση του κύματος μέσα στο υλικό. Με άλλα λόγια η ταχύτητα διάδοσης του κύματος ελαττώνεται σε σχέση με την ταχύτητά του στο κενό.

Αν θεωρήσουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται μέσα σε ένα μη μαγνητικό υλικό διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_r$ , η ταχύτητα διάδοσής του  $v$ , που καλείται και ταχύτητα φάσης, δίνεται από τη σχέση:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} \quad (2)$$

όπου  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  Cb/V m είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $\mu_0 = 12.57 \times 10^{-7}$  Weber/A m η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, στο σύστημα (SI)

Στην περίπτωση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό,  $\epsilon_r = 1$  και επομένως:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}, \text{ που είναι η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό}$$

Ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό ως προς την ταχύτητα του σε υλικό καλείται **δείκτης διάθλασης  $n$**  του υλικού, δηλαδή

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

Γενικά, η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  των υλικών εξαρτάται από τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η σχέση μεταξύ του δείκτη διάθλασης  $n$  και του  $\epsilon_r$  (σχέση 3), θα πρέπει να εφαρμόζεται στην ίδια συχνότητα και για τα δυο. Σε αρκετά υλικά η  $\epsilon_r$  παρουσιάζει διαφορές στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες λόγω ανάπτυξης διαφορετικών μηχανισμών πόλωσης.

## B. ΠΕΙΡΑΜΑ

### 1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή θα προσδιορίσουμε την ταχύτητα ορατού φωτός (ερυθρό) στον αέρα και σε διαφανές υλικό και θα υπολογίσουμε το δείκτη διάθλασης του υλικού.

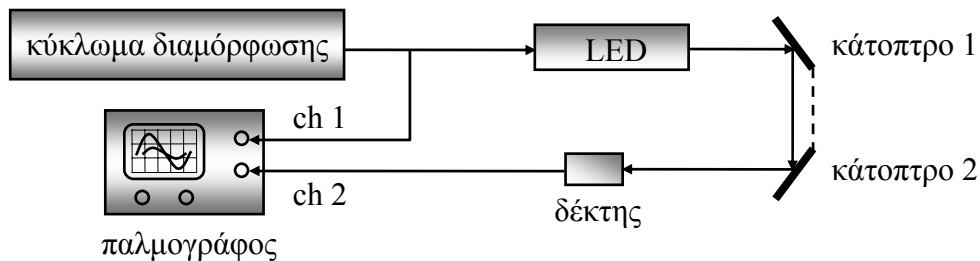
### 2. Πειραματική διαδικασία

#### 2.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

1. παλμογράφο δυο καναλιών, 20 MHz
2. Μπλοκ συνθετικής ρητίνης
3. Διάταξη μέτρησης της ταχύτητας του φωτός
  - i. μεταλλική βαθμολογημένη βάση (οπτική τράπεζα) μήκους 1.5 m
  - ii. μονάδα πομπού – δέκτη
  - iii. δυο επιπεδόκυρτους φακούς  $f = 5 \text{ mm}$
  - iv. γωνιακό κάτοπτρο για την ανάκλαση της δέσμης

Η φωτεινή πηγή (πομπός) που είναι μια φωτοεκπέμπουσα δίοδος (LED) τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας, περίπου 50 MHz, έτσι που η ένταση του εκπεμπόμενου φωτός διαμορφώνεται περιοδικά (παλμικό φως). Το φως αυτό



**Σχήμα 2.** Μπλοκ διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

οδηγείται σε ένα δέκτη (φωτοδίοδος) αφού διανύσει μια οπτική διαδρομή, το μήκος της οποίας διαμορφώνεται από τη θέση των κατόπτρων 1 και 2 (Σχήμα 2). Το διαμορφωμένο σήμα που φτάνει στο δέκτη αφού ανακλαστεί στα κάτοπτρα, ανιχνεύεται από τη φωτοδίοδο και μετασχηματίζεται σε εναλλασσόμενη τάση η οποία έχει την ίδια συχνότητα με το αρχικό σήμα, αλλά παρουσιάζει διαφορά φάσης σε σχέση με αυτό. Η διαφορά φάσης που δημιουργείται είναι συνάρτηση του μήκους του οπτικού δρόμου (σημειώνεται ότι η μεταβολή του μήκους του οπτικού δρόμου πραγματοποιείται με τη μετακίνηση των κατόπτρων κατά μήκος της οπτικής τράπεζας – στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη τα δυο κάτοπτρα είναι δομημένα στην ίδια βάση και σχηματίζουν ένα γωνιακό κάτοπτρο).

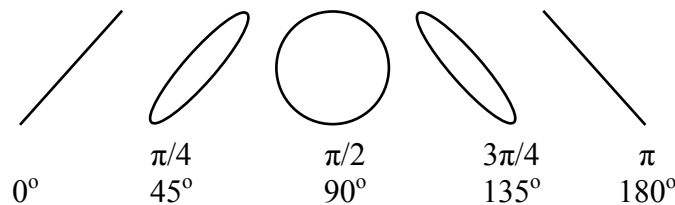
Αν χρησιμοποιήσουμε ένα παλμογράφο και τροφοδοτήσουμε το κανάλι 1 με το αρχικό σήμα (το σήμα δηλαδή που διαμορφώνει την ένταση του φωτός που εκπέμπεται

από τη LED) και το κανάλι 2 με το σήμα που προέρχεται από το δέκτη (Σχήμα 2), στην οθόνη του θα εμφανιστούν δυο κυματομορφές που έχουν την ίδια συχνότητα αλλά παρουσιάζουν διαφορά φάσης μεταξύ τους. Παρατηρείται δηλαδή μια χρονική μετατόπιση της δεύτερης κυματομορφής από την πρώτη, στον άξονα των χρόνων. Αν θέσουμε τον παλμογράφο σε λειτουργία X-Y μπορούμε να υπολογίσουμε κάθε φορά τη διαφορά φάσης μεταξύ των δυο αυτών ημιτονικών σημάτων από τις εικόνες Lissajous που εμφανίζονται στην οθόνη.

**Σημείωση:** Για να μπορούν τα σήματα να απεικονιστούν σε ένα κοινό παλμογράφο, απαιτείται υποβιβασμός της συχνότητας των 50 MHz. Εδώ ο κατασκευαστής έχει υποβιβάσει τη συχνότητα στα 50 KHz, χωρίς αυτό να επηρεάζει τη διαφορά φάσης.

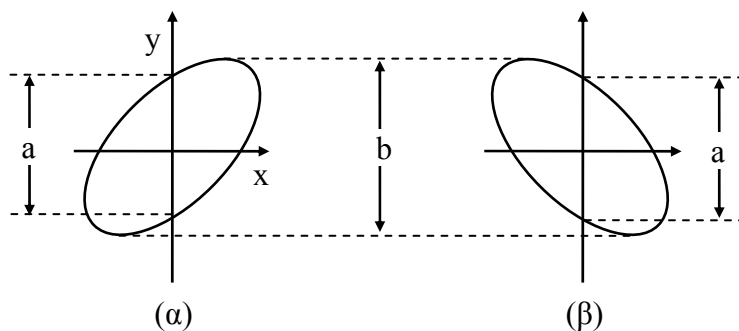
## 2.2 Μέτρηση διαφοράς φάσης μεταξύ δυο κυμάτων με τη μέθοδο Lissajous

Για να μετρήσουμε τη διαφορά φάσης μεταξύ δυο ημιτονικών σημάτων θα πρέπει, εξ ορισμού, να έχουν την ίδια συχνότητα. Επομένως, αν δυο ημιτονικά σήματα της ίδιας



**Σχήμα 3.** Εικόνες Lissajous κατά τη μέτρηση διαφοράς φάσης

συχνότητας εφαρμοστούν ταυτόχρονα στις εισόδους X και Y ενός παλμογράφου αντίστοιχα, στην οθόνη θα εμφανιστεί μια έλλειψη (σχήμα Lissajous). Η μορφή της



**Σχήμα 4.** Μέτρηση διαφοράς φάσης

έλλειψης εξαρτάται από τη διαφορά φάσης μεταξύ των δυο κυμάτων (Σχήμα 3). Με την εξαίρεση μερικών τιμών διαφοράς φάσης ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) η απεικόνιση της συμβολής δυο κάθετων αρμονικών ταλαντώσεων της ίδιας συχνότητας, είναι γενικά έλλειψη.

Κατά τη μέτρηση της διαφοράς φάσης, φροντίζουμε ώστε τα πλάτη των δυο σημάτων να είναι περίπου ίσα για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Αν  $\Delta\phi = \phi$  η διαφορά φάσης, τότε (Σχήμα 4):

$$\phi = \sin^{-1} \frac{a}{b} \text{ περίπτωση (α) και} \tag{4}$$

$$\phi = 180^\circ - \left( \sin^{-1} \frac{a}{b} \right) \text{ περίπτωση (β)}$$

### 2.3 Ανάλυση μεθόδου εύρεσης της ταχύτητας του φωτός

Θεωρούμε τη γενική εξίσωση του κύματος  $E_x = E_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0)$ . Όπως προαναφέραμε (παραγ. 1.1) το όρισμα  $(\omega t - kz + \phi_0)$  είναι η φάση  $\phi$  του κύματος, δηλαδή

$$\phi = \omega t - kz + \phi_0$$

Αν θεωρήσουμε σε κάποια χρονική στιγμή την επαλληλία δυο τέτοιων κυμάτων που παρουσιάζουν την ίδια συχνότητα, αλλά έχουν διανύσει διαφορετικούς δρόμους (για παράδειγμα  $z_1$  και  $z_2$ ), τότε η διαφορά φάσης τους θα είναι:

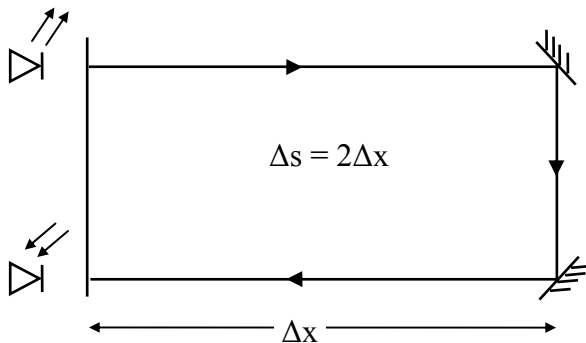
$$\phi_2 - \phi_1 = k(z_2 - z_1) \quad \text{ή} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s \quad (5)$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος και  $\Delta s = z_2 - z_1$

Όμως  $\lambda = \frac{c}{f}$  και επομένως:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi f}{c} \Delta s \quad (6)$$

όπου  $f$  η συχνότητα του κύματος



**Σχήμα 5.** Μετακινώντας το γωνιακό κάτοπτρο κατά μήκος της οπτικής τράπεζας, μπορούμε να μεταβάλλουμε την απόσταση  $\Delta x$ .

Στο συγκεκριμένο πείραμα η διαδικασία μέτρησης της ταχύτητας του φωτός  $c$ , βασίζεται στη σχέση (6). Αν είναι γνωστή η συχνότητα  $f$ , το πρόβλημα ανάγεται στη δημιουργία μιας διαφοράς δρόμου, η οποία μπορεί να μετρηθεί, μεταξύ του σήματος αναφοράς (σήμα πομπού) και του σήματος που παίρνουμε από το δέκτη. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια του γωνιακού κατόπτρου, που μετακινούμε επάνω στην οπτική τράπεζα (Σχήμα 5).

Θέτουμε το γωνιακό κάτοπτρο στο τέλος της οπτικής τράπεζας και ρυθμίζουμε το κουμπί της φάσης που βρίσκεται επάνω στη μονάδα, ώστε στον παλμογράφο (λειτουργία X-Y) να εμφανιστεί μια κεκλιμένη γραμμή (δεν ξαναρυθμίζουμε μέχρι το τέλος της πειραματικής διαδικασίας). Η διαφορά φάσης μεταξύ των δυο σημάτων είναι τώρα (ανάλογα με την κλίση της ευθείας που παρατηρούμε στον παλμογράφο)  $\theta$  ή  $\pi$  (Σχήμα 3). Μετακινούμε το κάτοπτρο προς το μέρος της μονάδας έως ότου στον παλμογράφο σχηματιστεί πάλι ευθεία γραμμή, αλλά με κλίση αντίθετη ως προς την αρχική.

**Σημείωση:** Επειδή το σήμα από το δέκτη έχει αυξηθεί αισθητά, θα χρειαστεί να ρυθμίσουμε στον παλμογράφο την κλίμακα του κατακόρυφου άξονα.

Η διαφορά φάσης είναι τώρα  $\pi$  ή  $0$ .

Όταν η διαφορά δρόμου από την αρχική θέση του γωνιακού κατόπτρου έως την τελική είναι  $\Delta x$ , τότε η συνολική διαφορά δρόμου είναι  $\Delta s = 2\Delta x$ . Αυτή η διαφορά δρόμου  $\Delta s$  έχει αλλάξει τη φάση κατά  $|\pi - 0| = \pi$  ή  $|0 - \pi| = \pi$ , δηλαδή  $\Delta\phi = \pi$  και επομένως από τη σχέση (6) έχουμε:

$$\Delta\phi = \pi = \frac{2\pi f}{c} \Delta s \Rightarrow c = 4f\Delta x$$

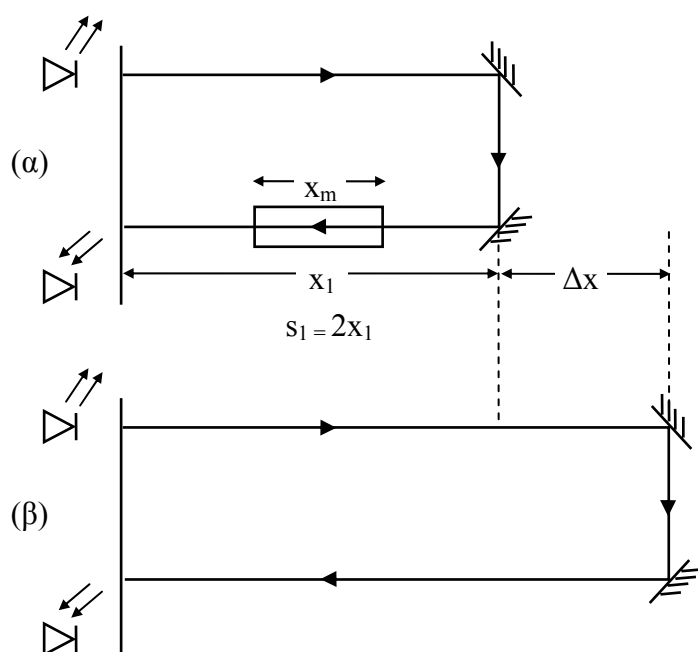
Αν θεωρήσουμε ότι  $f = 50$  MHz και  $\Delta x = x_2 - x_1 = 150$  cm  $-$  1 cm  $=$  149 cm, τότε η παραπάνω σχέση μας δίνει  $c = 4 \times 50 \times 10^6$  Hz  $\times$  149  $\times$  10<sup>-2</sup> m  $=$  2.9800  $\times$  10<sup>8</sup> m/s

#### 2.4 Ανάλυση μεθόδου εύρεσης του δείκτη διάθλασης $n$ υλικού

Στην πορεία του οπτικού σήματος από τον πομπό προς το δέκτη παρεμβάλλουμε ένα τεμάχιο κάποιου υλικού, μήκους  $x_m$  (εν προκειμένω συνθετική ρητίνη) και τοποθετούμε το γωνιακό κάτοπτρο λίγα εκατοστά πίσω από το υλικό. Ρυθμίζουμε το κουμπί της φάσης που βρίσκεται επάνω στη μονάδα πομπού – δέκτη, μέχρι να εμφανιστεί στην οθόνη του παλμογράφου μια εικόνα Lissajous (κεκλιμένη ευθεία). Αυτή είναι η φάση των δυο σημάτων (πομπού – δέκτη). Το φως για να φτάσει στο δέκτη (Σχήμα

6(α)) χρειάζεται χρόνο  $t_1 = \frac{s_1 - x_m}{c} + \frac{x_m}{v}$ , όπου  $v$  είναι η ταχύτητά του στο υλικό.

Αφαιρούμε το υλικό και μετακινούμε προς τα πίσω το κάτοπτρο (Σχήμα 6(β)), έως ότου παρατηρήσουμε στην οθόνη του παλμογράφου πάλι ευθεία γραμμή με την ίδια



Σχήμα 6

κλίση. Σημειώνουμε τη νέα θέση του κατόπτρου. Σ' αυτή την περίπτωση ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να φτάσει στο δέκτη είναι  $t_2 = \frac{s_1 + 2\Delta x}{c}$ . Όμως και στις δυο περιπτώσεις η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων είναι η ίδια και επομένως ο

χρόνος που χρειάζεται το φως για να διανύσει τις δυο οπτικές διαδρομές είναι ο ίδιος, δηλαδή  $t_1 = t_2$ .

Εξισώνοντας τις δυο τελευταίες σχέσεις, καταλήγουμε:

$$\frac{c}{v} = \frac{2\Delta x}{x_m} + 1 \quad (7)$$

Όταν η ταχύτητα του φωτός  $c$  στον αέρα είναι γνωστή, από τη σχέση (7) μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα  $v$  του φωτός στο υλικό. Από τη σχέση (3) υπολογίζουμε το δείκτη διάθλασης του υλικού.

## 2.5 Αρχικές ρυθμίσεις της πειραματικής διάταξης

### Βήμα 1

Τοποθετούμε τη μονάδα πομπού – δέκτη στο αριστερό άκρο της οπτικής τράπεζας και τους δυο φακούς σε απόσταση περίπου 5 cm εμπρός από τον πομπό και δέκτη αντίστοιχα, με την επίπεδη πλευρά τους προς το μέρος της μονάδας. Ρυθμίζουμε το ύψος τους και τους μετακινούμε πλευρικά, κατά τρόπο που να βλέπουν ακριβώς τις δυο διόδους.

### Βήμα 2

Τοποθετούμε το γωνιακό κάτοπτρο στο άλλο άκρο της οπτικής τράπεζας (στα 150 cm) και θέτουμε τη μονάδα σε λειτουργία. Παρακολουθούμε την πορεία της δέσμης από τη LED προς το κάτοπτρο που βρίσκεται απέναντί της και την εστιάζουμε πάνω του, χρησιμοποιώντας ένα κομμάτι χαρτί εμπρός απ' αυτό. Για να πάρουμε καθαρό είδωλο ρυθμίζουμε πάλι τη θέση του φακού.

### Βήμα 3

Παρακολουθούμε την πορεία της δέσμης από το δεύτερο κάτοπτρο προς τη φωτοδίοδο. Αν η φωτεινή κηλίδα δεν είναι καλά εστιασμένη επάνω στην επιφάνεια της διόδου, ρυθμίζουμε τη θέση του φακού που βρίσκεται εμπρός της. Εδώ ίσως χρειαστεί να ρυθμίσουμε και την καθετότητα των κατόπτρων με τους κοχλίες που βρίσκονται στο πίσω μέρος τους.

Αν η ρύθμιση πραγματοποιηθεί σωστά, στην οθόνη του παλμογράφου θα παρατηρήσουμε ένα καθαρό και δυνατό σήμα.



### 3. Εργασίες

#### α. Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός στον αέρα

1. Αναγνωρίζουμε τη διάταξη και πραγματοποιούμε τις αρχικές ρυθμίσεις όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.5
2. Τοποθετούμε το γωνιακό κάτοπτρο στο δεξιό άκρο της οπτικής τράπεζας. Ρυθμίζουμε το κουμπί φάσης που βρίσκεται στη μονάδα, έως ότου στον παλμογράφο απεικονίσουμε κεκλιμένη ευθεία, σημειώνουμε την ένδειξη της κλίμακας και την καταχωρούμε στον Πίνακα 1 ως  $x_5$
3. Μετακινούμε το κάτοπτρο προς το μέρος της μονάδας μέχρις ότου απεικονίσουμε στον παλμογράφο έλλειψη, που ο κύριος άξονάς της έχει περίπου την ίδια κλίση με την προηγούμενη ευθεία. Σημειώνουμε τη θέση του κατόπτρου επάνω στην οπτική τράπεζα και την καταχωρούμε στον Πίνακα 1 ως  $x_4$
4. Μετακινούμε εκ νέου το κάτοπτρο (πάντα προς το μέρος της μονάδας), μέχρις ότου στον παλμογράφο απεικονιστεί κύκλος. Αν χρειαστεί ρυθμίσουμε τις ευαισθησίες των κλιμάκων των δυο καναλιών. Σημειώνουμε τη θέση του κατόπτρου επάνω στην οπτική τράπεζα και την καταχωρούμε στον Πίνακα 1 ως  $x_3$
5. Σημειώνουμε δυο ακόμη θέσεις του κατόπτρου επάνω στην οπτική τράπεζα στις οποίες παρατηρούμε διαδοχικά μία έλλειψη (αντίθετη κλίση του άξονά της σε σχέση με την προηγούμενη έλλειψη) και μια ευθεία αντίθετης κλίσης με την πρώτη ευθεία που απεικονίσαμε. Καταχωρούμε τις δυο θέσεις στον Πίνακα 1 ως  $x_2$  και  $x_1$  αντίστοιχα
6. Σε κάθε μια από τις παραπάνω θέσεις του κατόπτρου βρίσκουμε από το Σχήμα (3) την αντίστοιχη φάση και καταχωρούμε στον Πίνακα 1
7. Συμπληρώνουμε στον Πίνακα 2 τις διαφορές δρόμων  $\Delta x$  και  $\Delta s$  ( $\Delta s = 2\Delta x$ ) καθώς και τις αντίστοιχες διαφορές φάσης  $\Delta\phi$
8. Από τις παραπάνω τιμές υπολογίζουμε κάθε φορά την ταχύτητα  $c$  του φωτός, κάνοντας χρήση της σχέσης (6) και στη συνέχεια τη μέση τιμή της  $c$ . Δίνεται  $f = 50.1 \text{ MHz}$

#### β. Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός σε υλικό – εύρεση δείκτη διάθλασης υλικού

1. Θέτουμε τη διάταξη σε λειτουργία και παρεμβάλουμε το τεμάχιο της συνθετικής ρητίνης στην πορεία του οπτικού σήματος, έτσι ώστε το αριστερό του άκρο να συμπίπτει με τη θέση  $x = 0$  της οπτικής τράπεζας
2. Τοποθετούμε το γωνιακό κάτοπτρο πίσω από το υλικό, στη θέση  $x = 35 \text{ cm}$  και ρυθμίζουμε το κουμπί της φάσης που βρίσκεται επάνω στη μονάδα, έως ότου απεικονίσουμε στην οθόνη του παλμογράφου μια κεκλιμένη ευθεία
3. Αφαιρούμε το υλικό από την οπτική τράπεζα και μετακινούμε προς τα δεξιά το γωνιακό κάτοπτρο (περίπου  $7 - 10 \text{ cm}$ ), έως ότου λάβουμε στον παλμογράφο την ίδια ευθεία, όπως και προηγουμένως (έχουμε δηλαδή την ίδια διαφορά φάσης)
4. Μετρούμε το μήκος του τεμαχίου της ρητίνης και χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή του  $c$  που βρήκαμε από την προηγούμενη εργασία, υπολογίζουμε από τη σχέση (7) την ταχύτητα  $v$  του φωτός μέσα στο υλικό

5. Γνωρίζοντας πλέον την ταχύτητα  $v$  του φωτός στο υλικό, υπολογίζουμε από τη σχέση (3) το δείκτη διάθλασης  $n$  του υλικού
6. Θέτουμε τις τιμές  $c$ ,  $v$ ,  $n$  στον Πίνακα 3

**Πίνακας 1**

<b>Θέση κατόπτρου</b>	<b><math>x_1</math> (cm)</b>	<b><math>x_2</math> (cm)</b>	<b><math>x_3</math> (cm)</b>	<b><math>x_4</math> (cm)</b>	<b><math>x_5</math> (cm)</b>
<b>Φάση</b>					

**Πίνακας 2**

<b><math>\Delta x</math></b>	<b><math>x_5 - x_4</math></b>	<b><math>x_5 - x_3</math></b>	<b><math>x_5 - x_2</math></b>	<b><math>x_5 - x_1</math></b>	<b><math>x_4 - x_3</math></b>	<b><math>x_4 - x_2</math></b>	<b><math>x_4 - x_1</math></b>	<b><math>x_3 - x_2</math></b>	<b><math>x_3 - x_1</math></b>	<b><math>x_2 - x_1</math></b>
<b><math>\Delta s</math></b>										
<b><math>\Delta \varphi</math></b>										
<b><math>c</math> (m/s)</b>										
<b><math>\bar{c}</math> (m/s)</b>										

**Πίνακας 3**

<b><math>c</math> (m/s)</b>	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b><math>n</math></b>