



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική

Πέτρος Ρακιτζής

Τμήμα Φυσικής

5. ΜΕΛΕΤΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑΣ - ΠΟΛΩΣΙΜΕΤΡΟ

1. Σκοπός

- Μελέτη οπτικής ενεργότητας
- Χρήση πολωσιμέτρου
- Μέτρηση στροφοτικής ικανότητας δεξτρόζης

2. Στοιχεία θεωρίας

Βασική προαπαιτούμενη γνώση

Serway, Physics for Scientists & Engineers, Τόμος ΙΙΙ, Σύγχρονη Φυσική, Κεφ. 38.6 και αντίστοιχες ερωτήσεις και ασκήσεις

2.1 Οπτική ενεργότητα

Ορισμένα υλικά έχουν την ικανότητα να στρέφουν το επίπεδο πόλωσης γραμμικά πολωμένου φωτός. Τέτοιο υλικό είναι, παραδείγματος χάριν, η ζάχαρη⁹. Τα οπτικώς ενεργά υλικά αποτελούνται συνήθως από μακρομόρια, τα οποία έχουν σπειροειδή διάταξη με αριστερόστροφη ή δεξιόστροφη απεικόνιση κοχλία. Ένα γραμμικά πολωμένο κύμα που διαδίδεται μέσα από ένα τέτοιο υλικό προκαλεί ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων, τα οποία κινούνται όχι μόνο κατά μήκος του άξονα της σπείρας, αλλά και γύρω από αυτήν. Γενικά, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα γραμμικά πολωμένο εγκάρσιο κύμα σαν άθροισμα δύο κυκλικά πολωμένων κυμάτων, του ενός με αριστερόστροφη πόλωση και του άλλου με δεξιόστροφη¹⁰. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αναμένεται το αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένο τμήμα της δέσμης να συμπεριφέρεται διαφορετικά στα σπειροειδή μόρια με δεξιόστροφη μορφή από ότι σε αυτά με αριστερόστροφη μορφή. Το ίδιο ισχύει και για την άλλη κυκλική συνιστώσα. Συνεπώς, η ταχύτητα διάδοσης των δύο κυκλικά πολωμένων κυμάτων θα είναι διαφορετική μέσα από το οπτικά ενεργό υλικό. Αν το υλικό έχει περισσότερα δεξιόστροφα σπειροειδή μόρια από αριστερόστροφα, τότε το συνολικό αποτέλεσμα θα είναι στροφή του επιπέδου της γραμμικής πόλωσης.

Έστω v_R η ταχύτητα διάδοσης για τα δεξιόστροφα κυκλικά κύματα, και v_L για τα αριστερόστροφα κυκλικά κύματα. Επειδή $v=c/n$, θα έχουμε διαφορετικούς δείκτες διάθλασης, n_R και n_L , για τα δεξιόστροφα και τα αριστερόστροφα κύματα.

Οι αντίστοιχοι κυματάρηθμοι για τα αριστερόστροφα και δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένα κύματα θα είναι:

$$k_L = (\omega/c)n_L \quad (1)$$

και

$$k_R = (\omega/c)n_R \quad (2)$$

Οι αντίστοιχες καθυστερήσεις φάσης, μετά από διάδοση κατά ένα μήκος l μέσα στο υλικό (κατά μήκος του άξονα Z), θα είναι

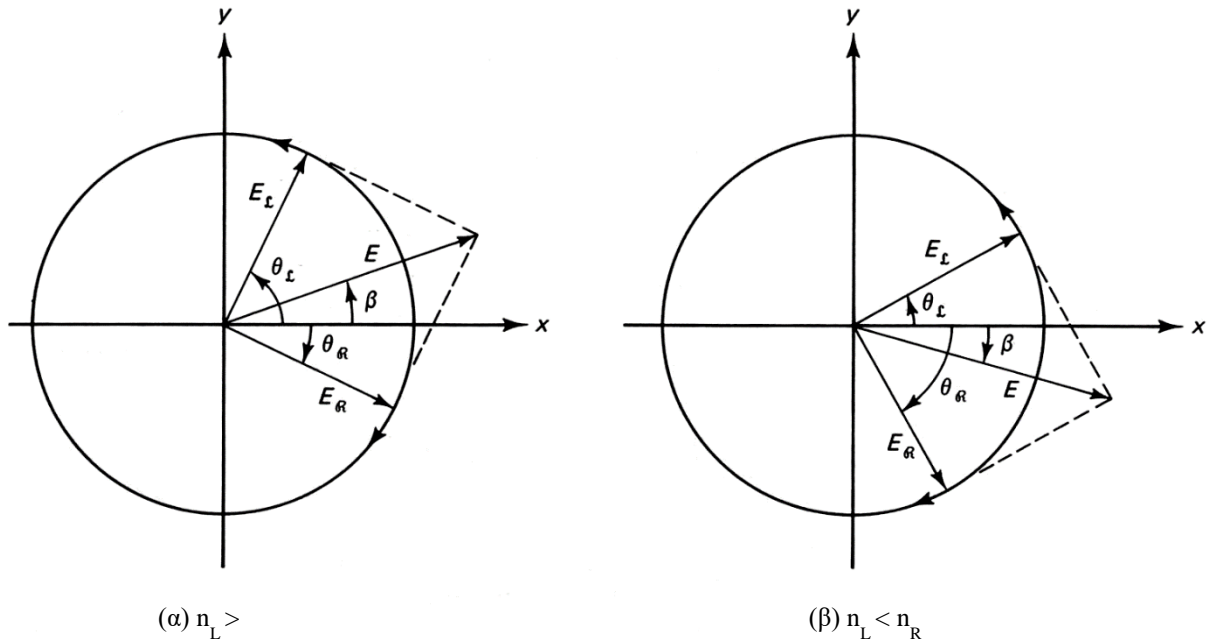
$$\theta_L = k_L l \quad (3)$$

$$\theta_R = k_R l \quad (4)$$

Από την σύνθεση των δύο πολώσεων, θα προκύψει και πάλι ένα γραμμικά πολωμένο κύμα, αλλά με το επίπεδο ταλάντωσης να έχει περιστραφεί κατά γωνία β σε σχέση με τον άξονα X όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

⁹ Ορισμένοι κρύσταλλοι, όπως ο χαλαζίας, είναι οπτικά ενεργοί, λόγω της ελικοειδούς διάταξης των μορίων τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, ενώ τα μόρια αυτά καθ'εαυτά έχουν πλήρη περιστροφική συμμετρία.

¹⁰ Η απόδειξη αφήνεται στον φοιτητή



Σχήμα 1. Οπτική περιστροφή που προέρχεται από την αριστερόστροφη και δεξιόστροφη πολωμένη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου, που διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες στο ενεργό υλικό. Στο α) ισχύει $n_L > n_R$ (και το γραμμικά πολωμένο φως περιστρέφεται αριστερόστροφα), ενώ στο (b) $n_L < n_R$ (και το γραμμικά πολωμένο φως περιστρέφεται δεξιόστροφα).

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 1, το μέγεθος της περιστροφής β , μπορεί να καθορισθεί σημειώνοντας ότι το τελικό διάνυσμα του πεδίου \mathbf{E} , που καθορίζει την γωνία β , είναι πάντα η διαγώνιος ενός ισόπλευρου παραλληλόγραμμου. Έτσι έχουμε

$$\theta_L - \beta = \theta_R + \beta \quad (5)$$

και επομένως

$$\beta = \frac{1}{2}(\theta_L - \theta_R) \quad (6)$$

Χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους κυματάρθρωτους, $k_L = k_0 n_L$ και $k_R = k_0 n_R$, όπου $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ με λ_0 το μήκος κύματος στο κενό, έχουμε

$$\beta = \frac{\pi l}{\lambda_0} (n_L - n_R) \quad (7)$$

Στην ουσία η οπτική ενεργότητα δεν είναι τίποτε άλλο από μια κυκλική διπλοθλαστικότητα, που χαρακτηρίζεται από τους δείκτες διάθλασης n_L και n_R (συγκρίνετε με την συνήθη διπλοθλαστικότητα που χαρακτηρίζεται από τους δείκτες n_{\perp} και n_{\parallel} για διάδοση γραμμικά πολωμένου φωτός με κατεύθυνση είτε κάθετη είτε παράλληλη με τον ΟΑ).

Το γεγονός ότι η γωνία β είναι ανάλογη του l (εξ. 7) δείχνει ότι το επίπεδο ταλάντωσης του κύματος αυτού στρέφεται βαθμιαία, καθώς το κύμα διεισδύει στο οπτικά ενεργό μέσο. Όταν $n_L > n_R$, τότε η β είναι θετική, δηλ. έχει την φορά περιστροφής των δεικτών του ρολογιού ως προς τον παρατηρητή που βλέπει την φωτεινή πηγή. Σε αυτή την περίπτωση το υλικό είναι αριστερόστροφο (Σχήμα 1α) οπτικά ενεργό. Όταν $n_L < n_R$, τότε η β είναι αρνητική, και το υλικό λέγεται δεξιόστροφο (Σχήμα 1β) οπτικά ενεργό.

Στην περίπτωση διαλύματος οπτικά ενεργής ουσίας, είναι προφανές ότι η τελική στροφή, φ , του επιπέδου πόλωσης γραμμικά πολωμένου φωτός, θα είναι (α) ανάλογη της περιεκτικότητας, c , του διαλύματος σε

μόρια της οπτικά ενεργής ουσίας, και (β) ανάλογη του μήκους της διαδρομής, l , του πολωμένου φωτός μέσα από το ενεργό διάλυμα. Δηλαδή,

$$\varphi = \alpha l c \quad (8)$$

όπου α λεγόμενη ειδική στροφική ικανότητα του υλικού. Η ειδική στροφική ικανότητα εξαρτάται από το είδος της διαλυμένης ουσίας (που καθορίζει την διαφορά $n_L - n_R$), και από το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου φωτός (βλ. εξίσωση 7).

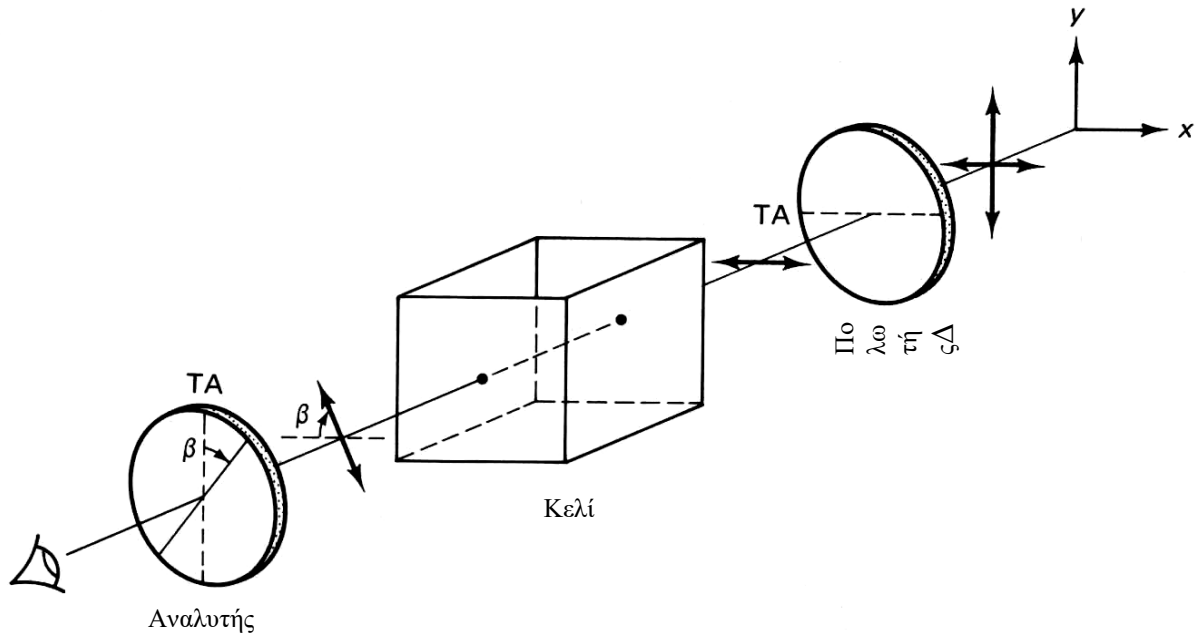
3. Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

3.1 Απαιτούμενος εξοπλισμός

- η συσκευή του πολωσιμέτρου, για την μέτρηση της στροφής του επιπέδου πόλωσης γραμμικά πολωμένου φωτός
- δοχεία, ζυγός ακριβείας, ζάχαρη, νερό για την δημιουργία διαλυμάτων ζάχαρης

3.2 Λειτουργία πολωσιμέτρου

Η οπτική ενεργότητα μετράται εύκολα αν χρησιμοποιήσουμε τη διάταξη του Σχήματος 2, όπου με τον πρώτο πολωτή επιλέγουμε μια κατεύθυνση γραμμικής πόλωσης (TA) για το μη πολωμένο φως της πηγής. Ο αναλυτής τοποθετείται αρχικά σε θέση πλήρους απόσβεσης της διερχόμενης δέσμης με το κελί του ενεργού υλικού να περιέχει μόνο τον διαλύτη. Αυτό γίνεται για να αποκλείσουμε πιθανή στροφή που οφείλεται στο υάλινο δοχείο και τον διαλύτη, από τις μετρήσεις της στροφής του επιπέδου ταλάντωσης του πεδίου, που οφείλονται στη διαλυμένη ουσία. Στη συνέχεια αντικαθιστούμε τον διαλύτη με το διάλυμα και προσδιορίζουμε τη γωνία φ , που πρέπει να στραφεί ο αναλυτής για να επέλθει απόσβεση της διερχόμενης δέσμης.



Σχήμα 2. Διάταξη μέτρησης της οπτικής ενεργότητας.

Η απλή διάταξη του Σχήματος 2 αποτελεί την αρχή λειτουργίας του πολωσιμέτρου. Η συγκεκριμένη συσκευή που θα χρησιμοποιήσετε στο πείραμά σας φαίνεται στο Σχήμα 3.

Το πολωσίμετρο αυτό αποτελείται από έναν πολωτή, από δοχείο στο οποίο τοποθετείται το οπτικά ενεργό υλικό, από ένα αναλυτή που φέρει ένα γωνιομετρικό κύκλο, και από μία διόπτρα για την παρατήρηση. Επειδή απόσβεση του φωτός επέρχεται για αρκετά μεγάλη περιοχή γωνιών γύρω από την θέση

καθετότητας του επιπέδου ταλαντώσεως του φωτός με το χαρακτηριστικό επίπεδο του αναλυτή, η θέση απόσβεσης δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθεί με μεγάλη ακρίβεια. Για να αυξηθεί η ακρίβεια της μέτρησης χρησιμοποιούνται πολωσίμετρα που έχουν εκτός από τον κύριο πολωτή και έναν (ή δύο) πρόσθετο πολωτή Nicol, που καλύπτει πλευρικά τον κύριο πολωτή, από την μία πλευρά της κεντρικής ακτίνας. Το βοηθητικό αυτό Nicol ρυθμίζεται έτσι ώστε το χαρακτηριστικό του επίπεδο να σχηματίζει γωνία μερικών μοιρών με το χαρακτηριστικό επίπεδο του κύριου πολωτή. Με αυτό τον τρόπο το οπτικό επίπεδο χωρίζεται σε δύο περιοχές που αντιστοιχούν σε φως με επίπεδα ταλάντωσης διαφορετικά κατά μερικές μοίρες. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει θέση του αναλυτή για την οποία και οι δυο περιοχές να αποσβένονται ταυτόχρονα: εάν για μια γωνία επιτυγχάνεται απόσβεση του ενός πεδίου, το άλλο πεδίο θα είναι φωτεινό. Στροφή κατά μερικές μοίρες θα φέρει το αντίστροφο αποτέλεσμα. Ενδιάμεσα από τις δύο αυτές θέσεις του αναλυτή, υπάρχει μια θέση στην οποία επιτυγχάνεται ισοφωτισμός, κατά τον οποίο τα όρια μεταξύ των δύο πεδίων εξαφανίζονται, οπότε όλο το οπτικό πεδίο εμφανίζεται ασθενώς και ομοιόμορφα φωτισμένο. Η θέση αυτή ισοφωτισμού μπορεί να προσδιορισθεί με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 3. Φωτογραφία του πολωσίμετρου που θα χρησιμοποιηθεί στο πείραμα

4. Εκτέλεση του πειράματος

1. Βεβαιωθείτε με τη χρήση πολωτή ότι το φως της λυχνίας μετά το φίλτρο είναι γραμμικά πολωμένο.
2. Εξοικειωθείτε με τη συσκευή και τη λειτουργία της.
3. Φτιάξτε στα διαφορετικά δοχεία που σας δίνονται διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων ζάχαρης (οι κατά βάρος συγκεντρώσεις αναγράφονται πάνω στα δοχεία), χρησιμοποιώντας τον ζυγό ακριβείας.
4. Γεμίστε τον γυάλινο σωλήνα με ένα από τα διαλύματα. Φροντίστε να μην υπάρχουν φυσαλίδες μέσα στον σωλήνα. Τοποθετήστε τον στο πολωσίμετρο και βρείτε την θέση αμυδρού ισοφωτισμού, περιστρέφοντας τον αναλυτή. Σημειώστε την γωνία στροφής, φ , και την αντίστοιχη συγκέντρωση, c , του διαλύματος.
5. Επαναλάβετε την διαδικασία μέτρησης 2-3 φορές για να εκτιμήσετε το σφάλμα της μέτρησής σας.
6. Επαναλάβετε την ίδια διαδικασία για όλα τα διαλύματα.
7. Επαναλάβετε την ίδια διαδικασία έχοντας γεμίσει τον σωλήνα με καθαρό νερό. Η γωνία που θα μετρήσετε σε αυτή την περίπτωση αποτελεί διόρθωση για τις γωνίες στροφής που μετρήσατε προηγουμένως
8. Να γίνει η γραφική παράσταση $\varphi = \varphi(c)$. Από την κλίση της ευθείας βρείτε την ειδική στροφική ικανότητα της ζάχαρης σε $\text{μοίρες} \cdot \text{cm}^2 / \text{gr}$. Δίνεται ότι το μήκος του σωλήνα είναι ίσο με $l = 10 \text{ cm}$. Βρείτε το πειραματικό σφάλμα της μέτρησής σας. Συγκρίνετε την τιμή που βρήκατε με την τιμή της βιβλιογραφίας ($6.645 \text{ μοίρες} \cdot \text{cm}^2 / \text{gr}$). Από την σύγκριση αυτή μπορείτε να βγάλετε κάποιο συμπέρασμα για την καθαρότητα της ζάχαρης που χρησιμοποιήσατε; Εξηγήστε.
9. Για το άγνωστο διάλυμα ζάχαρης που σας δίνεται, προσδιορίστε τη συγκέντρωσή του (σε $\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$) και το αντίστοιχο πειραματικό σφάλμα.

Βιβλιογραφία

- *Αλεξόπουλου, Γενική Φυσική, Τόμος 5^{ος}, Οπτική, παρ. 138, 139, 140, 141*

Σημειώματα

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Π. Ρακιτζής, 2014. «Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

