

Άσκηση 13

Ανάκλαση, διάθλαση και πόλωση του φωτός

13.1. Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι οι σπουδαστές να γνωρίσουν έμπρακτα ορισμένες βασικές έννοιες της γεωμετρικής και φυσικής οπτικής. Θα ασχοληθούν με την ανάκλαση, τη διάθλαση και την πόλωση του φωτός και θα προσδιορίσουν με δύο μεθόδους τον δείκτη διάθλασης ενός γυαλιού.

13.2. Γενικά

13.2.1 Εισαγωγή

Το φως είναι ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρικό (\mathbf{E}) και το μαγνητικό (\mathbf{B}) πεδίο αυτού του κύματος είναι συμφασικά οδεύοντα κύματα, κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης (\mathbf{k}), όπου k είναι ο λεγόμενος κυματικός αριθμός ($k = 2\pi/\lambda$) και λ το μήκος κύματος του φωτός. Τα τρία αυτά διανύσματα αποτελούν ένα τρισσορθογώνιο σύστημα με την παραπάνω σειρά διαδοχής.

Η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αναφέρεται, κατά σύμβαση, ως **διεύθυνση πόλωσης** του κύματος. Η σύμβαση αυτή δεν είναι αυθαίρετη, αλλά σχετίζεται με το γεγονός ότι η αλληλεπίδραση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος με τα οπτικά μέσα γίνεται μέσω της ηλεκτρικής μάλλον παρά μέσω της μαγνητικής συνιστώσας του.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ταξιδεύει στο κενό με ταχύτητα $c \approx 3 \times 10^8$ m/s, ανεξάρτητα από τη συχνότητά του, ενώ στα διάφορα οπτικά υλικά ταξιδεύει με μικρότερη ταχύτητα, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το υλικό και από τη συχνότητα του κύματος. Ορίζουμε ως **δείκτη διάθλασης** του υλικού, για κάθε συχνότητα ν , το πηλίκο

$$n_m(\nu) = \frac{c_0}{c_m(\nu)} \quad (13.1)$$

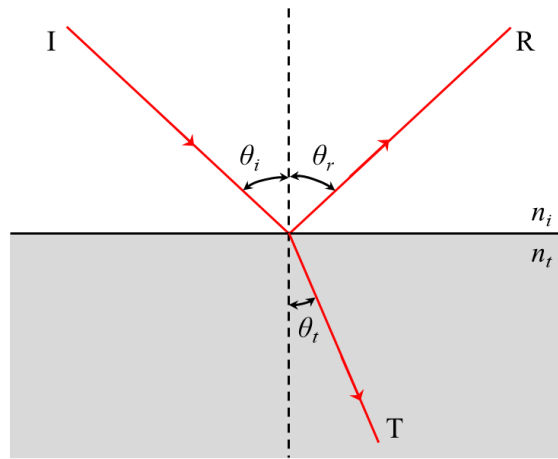
όπου c_0 η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό και $c_m(\nu)$ η ταχύτητα διάδοσης στο συγκεκριμένο μέσο (m).

Επειδή στον αέρα η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων που αντιστοιχούν στο ορατό μέρος του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος, δηλαδή στο φως, διαφέρει ελάχιστα από την ταχύτητα διάδοσης στο κενό, θεωρούμε, με καλή προσέγγιση, ότι $n_{\text{αέρα}} \approx 1$.

13.2.2. Ανάκλαση και διάθλαση φωτός

Θεωρούμε ότι μια λεπτή, παράλληλη, μονοχρωματική δέσμη φωτός προσπίπτει υπό γωνία θ_i σε μια επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια που αποτελεί το σύνορο μεταξύ δύο διαφορετικών οπτικών μέσων με δείκτες διάθλασης n_i και n_t , αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχ. 13.1. Από την αρχική προσπίπτουσα δέσμη I θα παραχθούν δύο νέες δέσμες: η ανακλώμενη R, υπό γωνία θ_r , και η διαθλώμενη (ή διερχόμενη) T, υπό γωνία θ_t . Όλες οι γωνίες μετριοούνται ως προς την κάθετο στην επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας ανάκλασης-διάθλασης αποτελούν γενικά κινηματικά χαρακτηριστικά που ισχύουν για όλα τα κύματα (μηχανικά, ηχητικά, ηλεκτρομαγνητικά), ανεξάρτητα από την φύση του κύματος.



Σχήμα 13.1. Προσπίπτουσα (I), ανακλώμενη (R) και διαθλώμενη (T) δέσμη από οπτικά αραιότερο μέσο (δείκτης διάθλασης n_i) σε οπτικά πυκνότερο μέσο (δείκτης διάθλασης $n_t > n_i$).

Αποδεικνύονται οι ακόλουθοι τρεις βασικοί νόμοι:

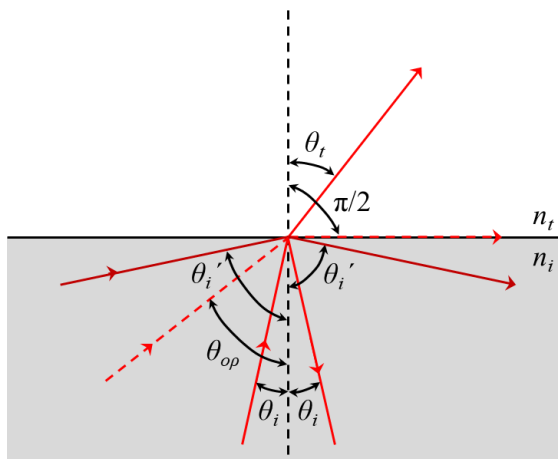
α) Τα διανύσματα διάδοσης της προσπίπτουσας (\mathbf{k}_i), της ανακλώμενης (\mathbf{k}_r) και της διερχόμενης (\mathbf{k}_t) δέσμης βρίσκονται πάνω στο ίδιο επίπεδο (δηλαδή το επίπεδο της σελίδας), το οποίο είναι κάθετο στην ανακλώσα επιφάνεια και το ονομάζουμε **επίπεδο ανάκλασης**.

β) $\theta_i = \theta_r$ (νόμος ανάκλασης) (13.2)

γ) $n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t$ (νόμος του Snell ή νόμος διάθλασης) (13.3)

Αν $n_i < n_t$, δηλαδή η διάθλαση γίνεται από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο (π.χ. από τον αέρα σε γυαλί), όπως προκύπτει από την Εξ. (13.3), θα ισχύει πάντα $\theta_t < \theta_i$, όπως φαίνεται στο Σχ. 13.1.

Μπορεί όμως να ισχύει $n_i > n_t$, δηλαδή η διάθλαση να γίνεται από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο μέσο (π.χ. από γυαλί προς τον αέρα), όπως φαίνεται στο Σχ. 13.2. Σε αυτή την περίπτωση θα ισχύει $\theta_t > \theta_i$ και μάλιστα η γωνία διάθλασης θα αυξάνεται όσο αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 13.2. Πρόσπτωση, ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά πυκνότερο μέσο (n_i) σε οπτικά αραιότερο μέσο ($n_t < n_i$). Για $\theta_i > \theta_{op}$ έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση.

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η θ_t είναι $\theta_t = \pi/2$, δηλαδή τότε το φως που εξέρχεται προς το οπτικά αραιότερο μέσο θα ταξιδεύει παράλληλα στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο

μέσων, και αυτό θα συμβεί για μια γωνία πρόσπτωσης θ_{op} που ονομάζεται **κρίσιμη ή ορική γωνία**. Αν το διαθλαστικό μέσο είναι ο αέρας ($n_t \approx 1$), τότε η Εξ. (13.3) δίνει

$$\sin \theta_{op} = \frac{1}{n_i} \quad (13.4)$$

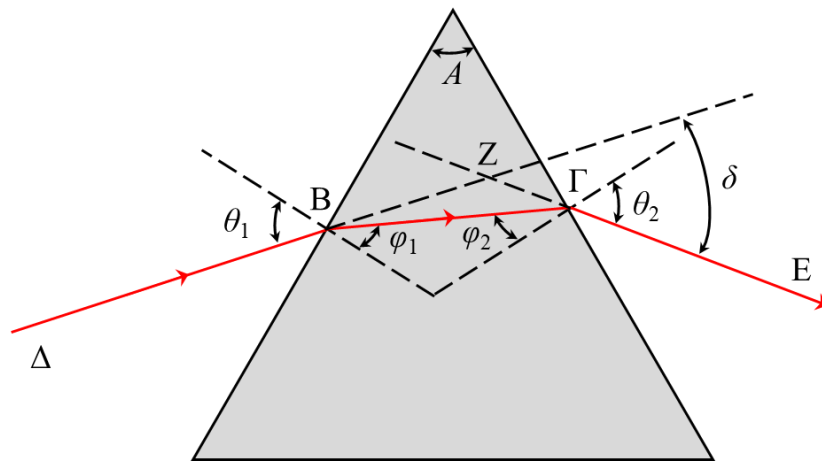
Για γωνίες $\theta_i < \theta_{op}$ έχουμε και ανακλώμενη (προς το οπτικά πυκνότερο μέσο) και διαθλώμενη δέσμη (προς το οπτικά αραιότερο μέσο), οπότε το άθροισμα των εντάσεων των δύο αυτών δεσμών είναι ίσο με την ένταση της προσπίπτουσας δέσμης.

Για γωνίες $\theta_i > \theta_{op}$ η διαθλώμενη δέσμη παύει να υπάρχει και η ανακλώμενη δέσμη λαμβάνει το σύνολο της έντασης της προσπίπτουσας δέσμης. Τότε λέμε ότι έχουμε το φαινόμενο της **ολικής εσωτερικής ανάκλασης**, που αποτελεί και την αρχή στην οποία βασίζεται η χρήση των οπτικών ινών ως μέσων διάδοσης οπτικών σημάτων.

13.2.3. Διάθλαση από δύο επίπεδες διαχωριστικές επιφάνειες υπό γωνία – Πρίσμα

Παρουσιάζει ενδιαφέρον η ανάλυση της διαδοχικής διάθλασης από δύο επίπεδες διαχωριστικές επιφάνειες που σχηματίζουν μια διέδρη γωνία. Αυτό συμβαίνει σε ένα πρίσμα αποτελούμενο από ένα διηλεκτρικό υλικό, λόγου χάρη από γυαλί, που καταλαμβάνει το εσωτερικό της διέδρης γωνίας.

Στο Σχ. 13.3 απεικονίζεται η διαδρομή μιας φωτεινής δέσμης κατά τη διέλευσή της μέσα από ένα πρίσμα με δείκτη διάθλασης n και γωνία κορυφής A . Η δέσμη διαδίδεται κατά μήκος της πορείας ΔB και προσπίπτει στο σημείο B υπό γωνία θ_1 . Μετά την διάθλασή της, υπό γωνία φ_1 , η δέσμη διαδίδεται στο εσωτερικό του πρίσματος κατά μήκος της πορείας $B\Gamma$. Η δέσμη προσπίπτει στο σημείο Γ υπό γωνία φ_2 και διαθλάται υπό γωνία θ_2 , εξερχόμενη κατά μήκος της διαδρομής ΓE . Η γωνία δ που σχηματίζεται από τις διευθύνσεις της προσπίπτουσας και της εξερχόμενης δέσμης ονομάζεται **γωνία εκτροπής**.



Σχήμα 13.3. Η γωνία εκτροπής δ σε ένα πρίσμα με γωνία κορυφής A . Δεν απεικονίζονται οι ανακλώμενες δέσμες για λόγους απλότητας.

Λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της διάταξης, υποθέτοντας ότι το πρίσμα βρίσκεται στον αέρα ($n_{αέρα} \approx 1$) και εφαρμόζοντας δύο φορές τον νόμο του Snell στα σημεία πρόσπτωσης B και Γ , διαπιστώνουμε ότι η γωνία εκτροπής είναι

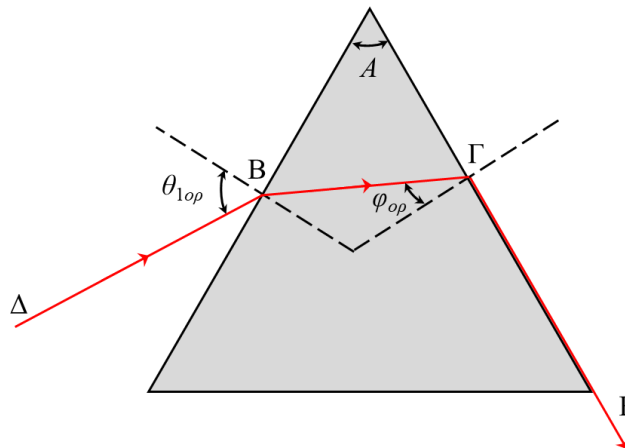
$$\delta = \theta_1 + \sin^{-1}[(\sin A)(n^2 - \sin^2 \theta_1)^{1/2} - \sin \theta_1 \cos A] - A \quad (13.5)$$

Για μονοχρωματική δέσμη και δεδομένο πρίσμα (δηλαδή δεδομένα n και A), η γωνία εκτροπής εξαρτάται μόνο από την αρχική γωνία πρόσπτωσης θ_1 . Με την αύξηση της θ_1 , η δ αρχικά μειώνεται, μέχρι μιας τιμής, και ακολούθως αυξάνεται. Η ελάχιστη δυνατή τιμή της γωνιακής εκτροπής, δ_m , ονομάζεται **γωνία ελάχιστης εκτροπής** και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αποδεικνύεται ότι η γωνία εκτροπής δ ελαχιστοποιείται όταν η πορεία $\Delta B \Gamma E$ της δέσμης είναι συμμετρική ως προς τη διχοτόμο της γωνίας A , με άλλα λόγια όταν η πορεία της δέσμης μέσα στο πρίσμα ($B\Gamma$) είναι παράλληλη προς τη βάση του. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της γωνίας ελάχιστης εκτροπής, δ_m , ικανοποιεί τη σχέση

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + \delta_m}{2}\right)}{\sin\frac{A}{2}} \quad (13.6)$$

Επομένως, αν έχουμε ένα πρίσμα με γνωστή γωνία κορυφής A και, με διαδοχική μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης, προσδιορίσουμε την κατάσταση ελάχιστης εκτροπής, μετρώντας την αντίστοιχη γωνία δ_m , μπορούμε από την Εξ. (13.6) να υπολογίσουμε τον δείκτη διάθλασης n του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πρίσμα. Αυτή είναι η πρώτη μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα άσκηση για τον προσδιορισμό του δείκτη διάθλασης ενός γυάλινου πρίσματος.

Με τη βοήθεια του ίδιου πρίσματος μπορεί να μελετηθεί το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης (Σχ. 13.4). Μεταβάλλοντας την αρχική γωνία πρόσπτωσης θ_1 , μπορούμε να επιτύχουμε μια τέτοια πορεία $B\Gamma$ της δέσμης ώστε η εσωτερική γωνία πρόσπτωσης φ_2 να λάβει την τιμή της ορικής γωνίας που δίνεται από την Εξ. (13.4). Σε αυτή την περίπτωση, η πορεία ΓE της εξερχόμενης δέσμης γίνεται εφαπτομενική στην αντίστοιχη πλευρά του πρίσματος. Για ελαφρώς μεγαλύτερη γωνία φ_2 θα έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση, ενώ για ελαφρώς μικρότερη θα εμφανιστεί και εξερχόμενη δέσμη.



Σχήμα 13.4. Ορική γωνία σε ένα πρίσμα με γωνία κορυφής A .

Όταν $\varphi_2 = \varphi_{op}$ ακριβώς, με τη βοήθεια του νόμου του Snell και της γεωμετρίας της διάταξης, μπορούμε να δείξουμε ότι για την αντίστοιχη ορική αρχική γωνία πρόσπτωσης, θ_{1op} , ισχύει η σχέση

$$\sin(\theta_{1op}) = n \sin(A - \varphi_{op}) \quad (13.7)$$

Επομένως, μετρώντας την θ_{1op} , μπορούμε να υπολογίσουμε την ορική γωνία φ_{op} του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πρίσμα, εφόσον έχουμε υπολογίσει πρώτα τον δείκτη

διάθλασης n του πρίσματος, για παράδειγμα μέσω της προηγούμενης μεθόδου της ελάχιστης εκτροπής. Επιπλέον, από την Εξ. (13.4) μπορούμε να υπολογίσουμε απευθείας την αναμενόμενη τιμή της φ_{op} , ώστε να συγκριθεί με την αντίστοιχη πειραματική τιμή.

13.2.4. Πόλωση του φωτός – Νόμος του Malus

Σημειώθηκε παραπάνω ότι η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου E του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που συνιστά το φως αναφέρεται ως διεύθυνση πόλωσης του κύματος. Ανάλογα με το πώς μεταβάλλεται αυτή με τον χρόνο, αλλά και στον χώρο, αποδίδουμε στο φως την αντίστοιχη κατάσταση πόλωσης. Όταν η διεύθυνση πόλωσης διατηρεί συνεχώς σταθερό προσανατολισμό, καθώς περνάει ο χρόνος, ή καθώς διαδίδεται η δέσμη στον χώρο, τότε λέμε ότι το φως είναι **γραμμικά πολωμένο**. Οι πιο σύνθετες μορφές πόλωσης του φωτός, όπως το κυκλικά ή το ελλειπτικά πολωμένο φως, δεν θα μας απασχολήσουν στην παρούσα άσκηση. Στην περίπτωση που η διεύθυνση πόλωσης μεταβάλλεται πολύ γρήγορα και με τυχαίο τρόπο στον χώρο και τον χρόνο, τότε λέμε ότι έχουμε **τυχαία πολωμένο ή φυσικό φως**.

Ένας τρόπος δημιουργίας γραμμικά πολωμένου φωτός από φυσικό φως είναι μέσω κάποιων υλικών που είναι γνωστά ως γραμμικοί πολωτές, τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση μόνο μίας συγκεκριμένης διεύθυνσης πόλωσης από το σύνολο των διευθύνσεων πόλωσης του φυσικού φωτός. Ο συνηθέστερος τύπος γραμμικού πολωτή είναι ένα πλαστικό φύλλο από κατάλληλα επεξεργασμένο υλικό, που είναι γνωστό ως polaroid, και έχει σημειωμένο πάνω του, συχνά με τις ενδείξεις 0-180, τον άξονα πόλωσής του, δηλαδή τη χαρακτηριστική διεύθυνση πόλωσης που παράγει (Σχ. 13.5). Όταν στον γραμμικό πολωτή προσπίπτει φυσικό φως, το διερχόμενο φως πολώνεται κατά τη χαρακτηριστική διεύθυνση του πολωτή.

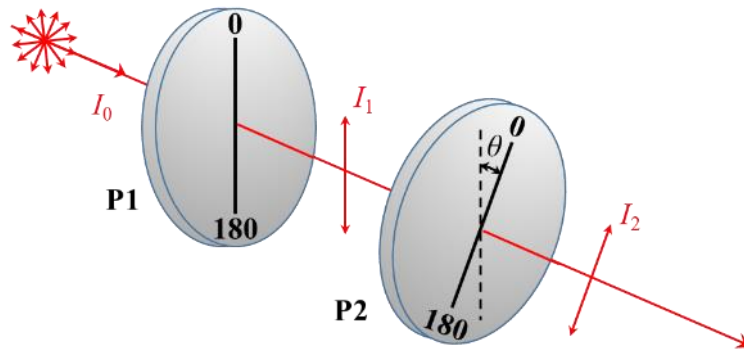


Σχήμα 13.5. Γραμμικοί πολωτές (polaroid). Αριστερά, ο άξονας πόλωσης σημειώνεται με τις ενδείξεις 0-180. Δεξιά, ο άξονας πόλωσης ταυτίζεται με τον (περιστρεφόμενο) βραχίονα. Παρατηρήστε το χρώμα των πλαστικών φύλλων.

Στο Σχ. 13.6 απεικονίζεται μια δέσμη φυσικού φωτός έντασης I_0 που περνά από τον γραμμικό πολωτή P1. Η δέσμη αποκτά τη διεύθυνση πόλωσης του πολωτή και, στην περίπτωση ιδανικού πολωτή, έχει ένταση $I_1 = I_0 / 2$, ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό του πολωτή. Η διερχόμενη δέσμη περνά από έναν δεύτερο γραμμικό πολωτή P2 (ή αναλυτή), ο άξονας του οποίου σχηματίζει γωνία θ με τον άξονα του P1. Η διερχόμενη από τον P2 ένταση I_2 αποδεικνύεται ότι ακολουθεί τη σχέση

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta \quad (13.8)$$

η οποία είναι γνωστή ως **νόμος του Malus**



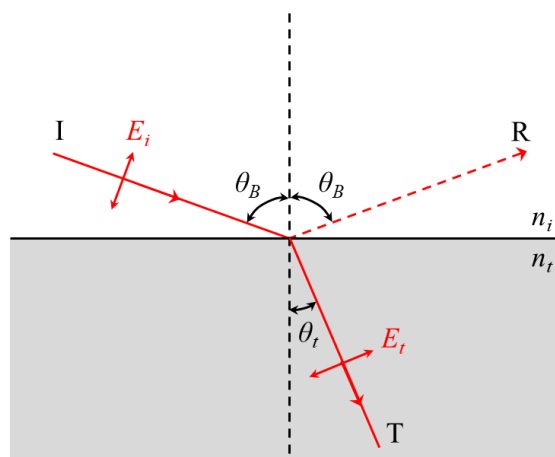
Σχήμα 13.6. Πόλωση φυσικού φωτός και ο νόμος του Malus..

Η Εξ. (13.8) ισχύει για ιδανικούς πολωτές και δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες λόγω ανακλάσεων και απορροφήσεων από το υλικό του πολωτή, οι οποίες οδηγούν σε μικρότερες διερχόμενες εντάσεις.

13.2.5. Ανάκλαση πολωμένου φωτός – Γωνία Brewster

Όταν η δέσμη φωτός του Σχ. 13.1 προσπέσει υπό γωνία σε επίπεδη επιφάνεια που διαχωρίζει δύο οπτικά μέσα, για παράδειγμα αέρα και γυαλί, τότε η κατανομή της αρχικής έντασης του φωτός στην ανακλώμενη και τη διαθλώμενη δέσμη εξαρτάται από τους δείκτες διάθλασης n_i και n_t , τη γωνία πρόσπτωσης θ_i , και την κατάσταση πόλωσης της προσπίπτουσας δέσμης.

Όταν η διεύθυνση πόλωσης της προσπίπτουσας δέσμης είναι παράλληλη στο επίπεδο ανάκλασης, τότε μιλάμε για p-πόλωση, ενώ όταν είναι κάθετη για s-πόλωση. Αν η διεύθυνση πόλωσης δεν είναι ούτε παράλληλη ούτε κάθετη στο επίπεδο ανάκλασης, τότε η πόλωση είναι μικτή, δηλαδή περιέχει συνιστώσες p και s συγχρόνως. Δεν θα ασχοληθούμε εδώ με το πολύπλοκο πρόβλημα των ποσοστών ανάκλασης και διέλευσης σε κάθε περίπτωση (εξισώσεις Fresnel), αλλά θα περιοριστούμε σε μία ειδική περίπτωση της p-πόλωσης.



Σχήμα 13.7. Πρόσπτωση υπό γωνία Brewster, θ_B , στην περίπτωση p-πόλωσης. Το διερχόμενο ηλεκτρικό πεδίο, E_t , είναι παράλληλο στην αναμενόμενη διεύθυνση ανάκλασης.

Για p-πόλωση, υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ένταση της ανακλώμενης δέσμης μηδενίζεται και όλο το φως ακολουθεί την πορεία της διαθλώμενης

δέσμης. Η γωνία αυτή ονομάζεται **γωνία Brewster**, θ_B , ή γωνία πόλωσης, και αποδεικνύεται ότι είναι εκείνη για την οποία ισχύει

$$\theta_B + \theta_t = 90^\circ \quad (13.9)$$

δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη δέσμη αναμένεται σε μία διεύθυνση κάθετη στη διαθλώμενη δέσμη, όπως φαίνεται στο Σχ. 13.7. Ο μηδενισμός της ανακλώμενης έντασης έχει βαθύτερη φυσική ερμηνεία που σχετίζεται με τον μηχανισμό επανεκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα στοιχειώδη ταλαντούμενα δίπολα του οπτικού μέσου.

Από την Εξ. (13.9) και τον νόμο του Snell προκύπτει τελικά ότι

$$\tan \theta_B = \frac{n_t}{n_i} \quad (13.10)$$

Αν το ένα μέσο είναι αέρας ($n_i \approx 1$) και το άλλο γυαλί με δείκτη διάθλασης n , τότε η προηγούμενη σχέση δίνει

$$n = \tan \theta_B \quad (13.11)$$

Επομένως, η μέτρηση της γωνίας Brewster, δηλαδή της γωνίας πρόσπτωσης για την οποία μηδενίζεται η ανακλώμενη ένταση μιας δέσμης φωτός πολωμένης παράλληλα στο επίπεδο ανάκλασης, επιτρέπει τον υπολογισμό του δείκτη διάθλασης, και αυτή είναι η δεύτερη μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην άσκηση για τον προσδιορισμό του δείκτη διάθλασης ενός γυάλινου πρίσματος.

Τέλος, αν η προσπίπτουσα δέσμη αποτελείται από φυσικό φως, τότε το ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E} αυτής μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: μία παράλληλη στο επίπεδο ανάκλασης (p) και μία άλλη κάθετη τόσο στο επίπεδο ανάκλασης όσο και στην πρώτη συνιστώσα (s). Σύμφωνα με τα παραπάνω, όταν η δέσμη προσπέσει υπό γωνία Brewster σε μια επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια, τότε θα ανακλαστεί μόνο η s συνιστώσα, συνεπώς η ανακλώμενη δέσμη θα είναι γραμμικά πολωμένη κάθετα στο επίπεδο ανάκλασης. Αυτός είναι άλλος ένας τρόπος δημιουργίας γραμμικά πολωμένου φωτός, ο οποίος εξηγεί, λόγω χάρη, την ευρύτατη χρήση φίλτρων polaroid στα γυαλιά ηλίου.

13.3. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχ. 13.8 και περιλαμβάνει τα ακόλουθα εξαρτήματα:

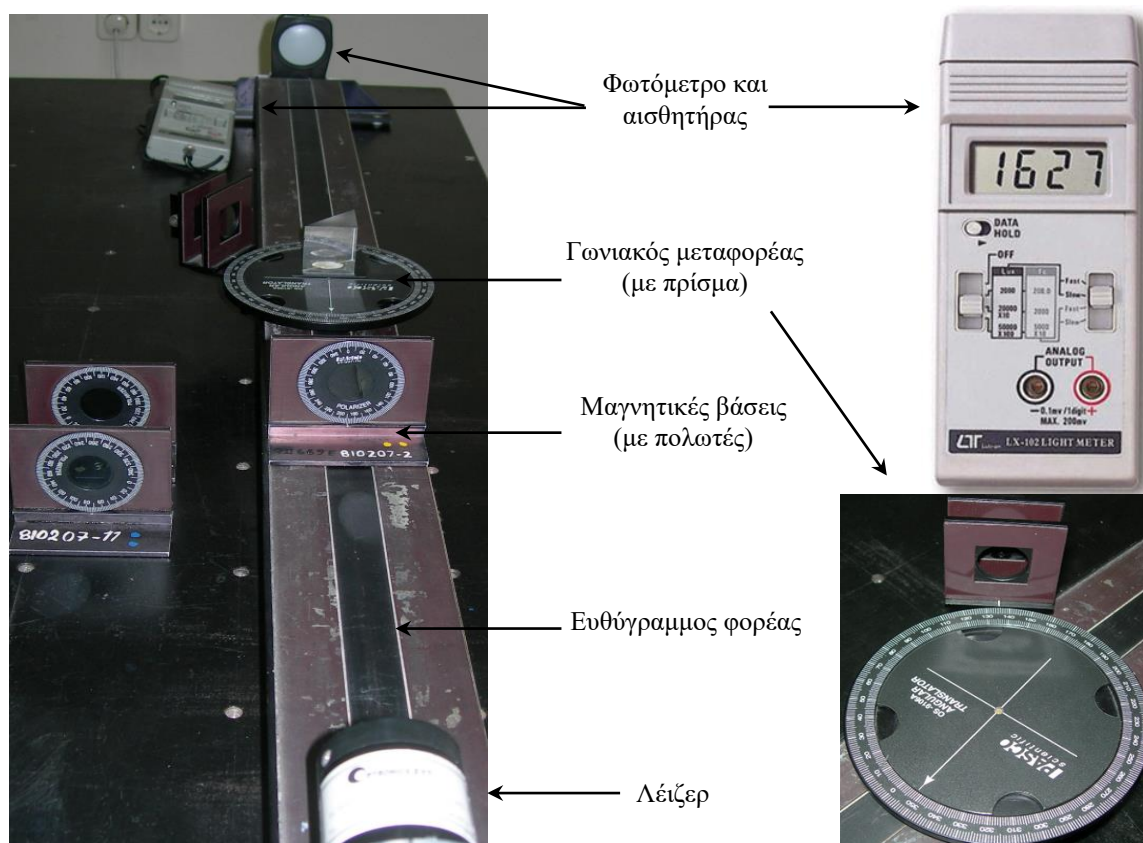
Λείζερ

Πρόκειται για λείζερ He-Ne που παράγει μια λεπτή, παράλληλη, μονοχρωματική δέσμη με μήκος κύματος $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ και ισχύ της τάξης του mW.

Προσοχή! Παρότι η ισχύς του laser είναι αρκετά ασθενής ώστε να μην προκαλεί καψίματα ή εγκαύματα, εντούτοις εξακολουθεί να είναι επικίνδυνη για τα μάτια όταν εισχωρήσει σε αυτά κατευθείαν ή εξ ανακλάσεως, γι' αυτό ο χειρισμός του θα πρέπει να γίνεται ιδιαίτερα προσεκτικά!

Ευθύγραμμος φορέας και μαγνητικές βάσεις

Ένας ευθύγραμμος φορέας για τη στήριξη μεταλλικών και οπτικών εξαρτημάτων. Επιπλέον, τρεις μαγνητικές βάσεις, όπου μπορούν να τοποθετηθούν οι γραμμικοί πολωτές. Όλες οι στηρίξεις γίνονται μαγνητικά.



Σχήμα 13.8. Η πειραματική διάταξη της άσκησης (αριστερά), το φωτόμετρο (δεξιά πάνω) και ο γωνιακός μεταφορέας (δεξιά κάτω).

Γωνιακός μεταφορέας με κυκλική βαθμονομημένη βάση

Ένας γωνιακός μεταφορέας με κυκλική βαθμονομημένη βάση (0° - 360°) και ανεξάρτητη περιστρεφόμενη βάση για την ελεγχόμενη περιστροφή οπτικών στοιχείων (π.χ. πρίσμα) και τη μέτρηση γωνιών περιστροφής. Περιλαμβάνει επίσης έναν ανεξάρτητο περιστρεφόμενο βραχίονα για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης διέλευσης μιας φωτεινής δέσμης.

Φωτόμετρο

Η φωτεινή δέσμη κατευθύνεται σε έναν αισθητήρα, ο οποίος μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό ρεύμα με ένταση ανάλογη του φωτισμού που δέχεται. Στην οθόνη του φωτομέτρου εμφανίζεται απευθείας η τιμή του φωτισμού σε μονάδες lux.

Το φωτόμετρο διαθέτει τρεις κλίμακες (2000, 20000 και 50000) που επιλέγονται με έναν μεταγωγό. Σε καθεμία από αυτές, η ένδειξη που εμφανίζεται στην οθόνη πολλαπλασιάζεται με 1, 10 και 100, αντίστοιχα. Η ακρίβεια του οργάνου είναι $\pm 5\%$ σε όλες τις κλίμακες.

Οπτικά εξαρτήματα:

Ένα γυάλινο πρίσμα ορθή γωνίας (45 – 90 – 45).
Τρεις γραμμικοί πολωτές (polaroid).

Προσοχή! Μην αγγίζετε τα οπτικά εξαρτήματα (πρίσμα, πολωτές) από τις οπτικές επιφάνειες, αλλά να τα πιάνετε από τα περιμετρικά τους σημεία. Αν κάτι χρειάζεται καθαρισμό, συμβουλευτείτε τον επιβλέποντα.

Βιβλιογραφία

1. R. A. Serway, J. W. Jewett, *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς: Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Φως και οπτική – Σύγχρονη φυσική* (Αθήνα, 2013), Η12.3, Ο1.3-Ο1.5, Ο1.8, Ο4.6.
2. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική, Τόμος Β΄: Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική*. (Αθήνα, 2022), 32.2, 32.3, 33.2, 33.3, 33.5,
3. E. Hecht, *Οπτική (Schaum's Outline Series)* (Αθήνα, 1979), 2.1, 2.2, 3.2, 3.5, 5.2, 5.5-5.7.
4. E. Hecht, *Οπτική: Βασικές αρχές και εφαρμογές* (Αθήνα, 2018), 3.2, 3.5, 4.2-4.4, 4.7, 5.5, 8.1, 8.2, 8.6.
5. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι* (Αθήνα, 2010), σ. 185-198.

13.4. Εκτέλεση

1. Ανάψτε το λέιζερ και φροντίστε η φωτεινή δέσμη να κατευθύνεται στο κέντρο του αισθητήρα του φωτομέτρου.
2. Ευθυγραμμίστε τη διεύθυνση 0° - 180° του γωνιακού μεταφορέα με την προσπίπτουσα δέσμη και φέρτε το βέλος της ανεξάρτητης περιστρεφόμενης βάσης (ΑΠΒ) στη θέση 0° .

13.4.1. Γωνία ολικής εσωτερικής ανάκλασης

1. Τοποθετήστε το τριγωνικό πρίσμα πάνω στην ΑΠΒ, έτσι ώστε η μία κάθετη πλευρά του να είναι ευθυγραμμισμένη με τον άξονα που σημειώνεται πάνω στην ΑΠΒ και η φωτεινή δέσμη να προσπίπτει στο κέντρο αυτής της πλευράς. Στρέψτε πολύ λίγο το πρίσμα ώστε η δέσμη να είναι κάθετη σε αυτή την πλευρά του πρίσματος και σκεφτείτε πώς μπορεί να ελεγχθεί αυτό.
Κάθε νέα μέτρηση θα πρέπει να ξεκινά από αυτή τη θέση του πρίσματος (θέση αναφοράς).
2. Εντοπίστε τις δέσμες που βγαίνουν από το πρίσμα στη θέση αναφοράς και προσπαθήστε να κατανοήσετε την πορεία τους. Τι παρατηρείτε;
3. Αρχίστε να στρέφετε την ΑΠΒ (μαζί με το πρίσμα) προς τη φορά που φέρνει την ορθή γωνία του πρίσματος πιο κοντά στην προσπίπτουσα και παρατηρήστε ξανά όλες τις δέσμες.
4. Προσδιορίστε όσο το δυνατόν ακριβέστερα την οριακή κατάσταση που φαίνεται στο Σχ. 13.4, δηλαδή τη θέση όπου η πορεία της αντίστοιχης δέσμης γίνεται εφαπτομενική στην υποτείνουσα του πρίσματος. Σημειώστε την αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης θ_{1op} και εκτιμήστε το σφάλμα της.

13.4.2. Γωνία ελάχιστης εκτροπής

1. Επιστρέψτε στη θέση αναφοράς. Αρχίστε να στρέφετε την ΑΠΒ προς τη φορά που φέρνει την ορθή γωνία του πρίσματος πιο κοντά στην προσπίπτουσα και παρακολουθήστε την κίνηση της διαθλώμενης δέσμης στην υποτείνουσα του πρίσματος (Σχ. 13.3). Πρέπει να διαπιστώσετε ότι σε κάποια στιγμή σταματά και αντιστρέφει φορά.

2. Προσδιορίστε όσο το δυνατόν ακριβέστερα αυτό το σημείο αναστροφής. Με τη βοήθεια του περιστρεφόμενου βραχίονα του γωνιακού μεταφορέα, μετρήστε τη γωνία ελάχιστης εκτροπής δ_m και εκτιμήστε το σφάλμα της.

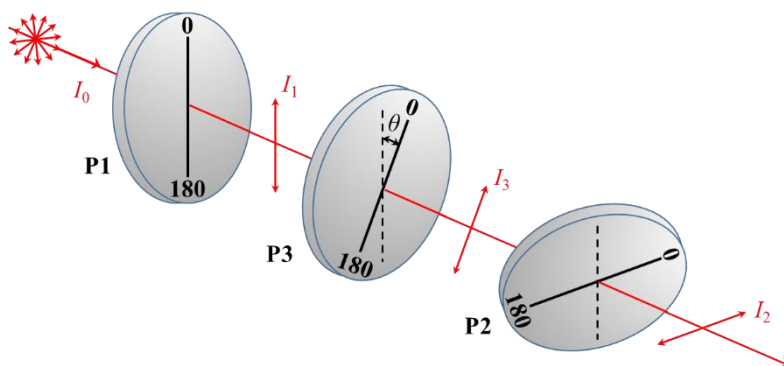
13.4.3. Πόλωση του φωτός – Νόμος του Malus

1. Αφαιρέστε το πρίσμα και θέστε το φωτόμετρο σε λειτουργία.
2. Τοποθετήστε στον ευθύγραμμο φορέα δύο μαγνητικές βάσεις με δύο πολωτές, P_1 και P_2 , με τους άξονές τους σε κατακόρυφη θέση (Σχ. 13.6). Στρέψτε λίγο τον P_2 , αριστερά ή δεξιά, και μείνετε στη θέση που μεγιστοποιεί την ένταση της δέσμης που καταγράφει το φωτόμετρο. Σε αυτή τη θέση η γωνία θ που σχηματίζουν οι άξονες των δύο πολωτών είναι μηδέν. Καταχωρήστε τις τιμές θ , I_2 (ένδειξη φωτομέτρου) και δI_2 στον Πίνακα I.
3. Στρέψτε τον P_2 σε άλλες 12 γωνίες θ ως προς την κατακόρυφο, με βήμα 15° , και μετρήστε την I_2 . Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στις τρεις πρώτες στήλες του Πίνακα I.

Πίνακας I

$\theta \pm \delta\theta$	I_2 (lux)	δI_2 (lux)	$I_{2\theta_{\text{εωρ}}}$ (lux)

4. Στρέψτε τον P_2 ώστε η ένταση I_2 να ελαχιστοποιηθεί. Τοποθετήστε έναν τρίτο πολωτή P_3 μεταξύ των P_1 και P_2 , με τυχαίο προσανατολισμό του άξονά του (Σχ. 13.9). Τι παρατηρείτε;



Σχήμα 13.9. Μελέτη της πόλωσης φυσικού φωτός κατά τη διέλευσή του από τρεις γραμμικούς πολωτές.

5. Στρέψτε τον ενδιάμεσο πολωτή P_3 και σημειώστε τις γωνίες θ όπου μεγιστοποιείται και ελαχιστοποιείται η ένδειξη του φωτομέτρου.
6. Κλείστε το φωτόμετρο

13.4.4. Γωνία Brewster

1. Τοποθετήστε το πρίσμα στην ΑΠΒ και επανέλθετε στη θέση αναφοράς.
2. Τοποθετήστε στη διαδρομή της προσπίπτουσας δέσμης έναν πολωτή με τον άξονά του οριζόντιο (p-πόλωση).

3. Στρέψτε την ΑΠΒ και παρακολουθήστε την ανακλώμενη δέσμη στην κάθετη πλευρά του πρίσματος. Πρέπει να διαπιστώσετε μεταβολή στην έντασή της, αλλά και ελαχιστοποίησή της σε κάποια γωνία (που αντιστοιχεί στη γωνία Brewster) (Σχ. 13.7).
4. Μετρήστε όσο το δυνατόν ακριβέστερα τη γωνία Brewster, θ_B , και εκτιμήστε το σφάλμα της.
5. Επαναλάβετε αυτή την παρατήρηση με τον άξονα του πολωτή κατακόρυφο. Μηδενίζεται τώρα η ένταση;
6. Επιστρέψτε στη γωνία Brewster και αφαιρέστε τον πολωτή. Ελέγξτε την πόλωση της ανακλώμενης δέσμης.

13.5. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Υπολογίστε τον δείκτη διάθλαση του πρίσματος ($n \pm \delta n$) χρησιμοποιώντας τη μέτρηση της γωνίας ελάχιστης εκτροπής δ_m και την Εξ. (13.6).

Προσοχή! Κατά τον υπολογισμό του σφάλματος πρέπει να λάβετε υπόψη ότι η φυσική μονάδα μέτρησης των γωνιών είναι το ακτίνιο (rad). (Η παρατήρηση αυτή ισχύει και για τα βήματα 2, 3 και 6.)

2. Υπολογίστε την εσωτερική ορική γωνία φ_{op} , καθώς και το σφάλμα της, χρησιμοποιώντας την τιμή του δείκτη διάθλαση του πρίσματος που υπολογίσατε στο προηγούμενο βήμα, την Εξ. (13.7) και την αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης θ_{1op} .
3. Υπολογίστε την αναμενόμενη φ_{op} και το σφάλμα της απευθείας από την Εξ. (13.4), χρησιμοποιώντας ξανά την τιμή του δείκτη διάθλαση του πρίσματος που υπολογίσατε στο βήμα 1. Συγκρίνετε το αποτέλεσμα με εκείνο του προηγούμενου βήματος.
4. Υπολογίστε τις θεωρητικές τιμές $I_{2\theta_{εωρ}}$ σύμφωνα με τον νόμο του Malus (Εξ. 13.8), όπου στη θέση του I_1 τοποθετήστε την τιμή I_{2max} που μετρήσατε (γιατί;). Καταχωρήστε τα αποτελέσματα στον Πίνακα I και σχεδιάστε στο ίδιο διάγραμμα τη θεωρητική και την πειραματική καμπύλη $I(\theta)$. Σχολιάστε την ισχύ του νόμου του Malus.
5. Υπολογίστε τις γωνίες θ για τις οποίες μεγιστοποιείται και ελαχιστοποιείται η I_2 στο Σχ. 13.9. Συμφωνούν αυτές οι τιμές με τις μετρήσεις σας;
6. Υπολογίστε τον δείκτη διάθλαση του πρίσματος ($n \pm \delta n$), χρησιμοποιώντας τη μέτρηση της γωνίας Brewster, θ_B , και την Εξ. (13.11). Συγκρίνετε με το αποτέλεσμα του βήματος 1.
7. Τι παρατηρήσατε όταν τοποθετήσατε τον πολωτή με τον άξονα κατακόρυφο και όταν τον αφαιρέσατε; Πώς ερμηνεύετε αυτά τα αποτελέσματα;