Άσκηση 13

Ανάκλαση-Διάθλαση - Πόλωση του φωτός

13.1. Σκοπός

Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη των νόμων της λεγόμενης «γεωμετρικής οπτικής» καθώς και η μελέτη του γραμμικά πολωμένου φωτός

13.2. Γενικά

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

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

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ταξιδεύει στο κενό με ταχύτητα $c=3\times10^{8} m/s$, ανεξάρτητα από τη συχνότητά του, ενώ στα διάφορα οπτικά υλικά ταξιδεύει με μικρότερη ταχύτητα, η τιμή της οποίας εξαρτάται από το υλικό αλλά και από τη συχνότητα του κύματος. Με βάση τα παραπάνω, ***ορίζουμε ως δείκτη διάθλασης του υλικού***, για κάθε συχνότητα, ***το πηλίκο*** της ταχύτητας διάδοσης του φωτός στο κενό c_0, προς την ταχύτητα διάδοσης $c_m\left(\nu\right)$ στο συγκεκριμένο μέσο $\left(m\right)$,

$$n_m\left(\nu\right)=\frac{c_0}{c_m\left(\nu\right)}$$

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 ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα για το φως είναι, με καλή προσέγγιση, περίπου ίσος με τη μονάδα

$$\left(n_{\alpha\varepsilon\rho\alpha}\approx1\right)$$

Όταν μια φωτεινή δέσμη, που οδεύει σε κάποιο οπτικό μέσο 1 (Σχ. 13.1), συναντά μια διαχωριστική επιφάνεια πέρα από την οποία υπάρχει ένα διαφορετικό οπτικό μέσο 2, τότε ένα μέρος του κύματος ανακλάται πάλι στο αρχικό οπτικό μέσο 1 και ένα μέρος διέρχεται στο οπτικό μέσο 2.

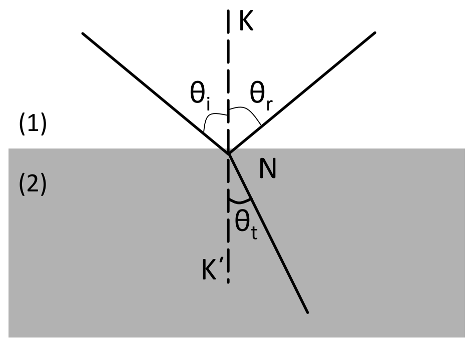
Αποδεικνύεται ότι η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διερχόμενη ακτίνα, ή, αντίστοιχα, τα κυματανύσματα πρόσπτωσης $\left(\vec{k}_i\right)$, ανάκλασης $\left(\vec{k}_r\right)$ και διέλευσης $\left(\vec{k}_t\right)$, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, το οποίο μπορούμε να λέμε «επίπεδο ανάκλασης»

Αυτή η διαδικασία ανάκλασης- διάθλασης διέπεται από κάποιες σχέσεις που αφορούν, αφ' ενός στην γεωμετρία ανάκλασης-διάθλασης, αφ' ετέρου στα ποσοστά ανάκλασης και διάθλασης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεν εξαρτώνται από την διεύθυνση πόλωσης του φωτός, αποτελώντας γενικά κινηματικά χαρακτηριστικά που ισχύουν, μάλιστα, για όλα τα κύματα (μηχανικά, ηχητικά, ηλεκτρομαγνητικά), ανεξάρτητα από την φύση του κύματος. Αντίθετα, τα ποσοστά ανάκλασης-διάθλασης εξαρτώνται από την φύση του κύματος, από τη γεωμετρία ανάκλασης, και (στην περίπτωση των εγκάρσιων κυμάτων) από τον προσανατολισμό της διεύθυνσης πόλωσης ως προς το επίπεδο ανάκλασης.

Στο πλαίσιο αυτής της άσκησης θα μελετήσουμε την αλληλοσυσχέτιση των γωνιών πρόσπτωσης-ανάκλασης-διάθλασης του φωτός από μία και δύο επίπεδες διαχωριστικές επιφάνειες. Η μελέτη των ποσοστών ανάκλασης-διέλευσης γίνεται λεπτομερέστερα στο μάθημα της Οπτικής και σε αυτή εδώ την εργαστηριακή άσκηση θα μας απασχολήσει μόνο σε σχέση με το φαινόμενο της γωνίας Brewster. Η άσκηση θα ολοκληρωθεί με την μελέτη του πολωμένου φωτός κατά την διέλευσή του από ανισότροπα οπτικά υλικά, γνωστά ως πολωτές.

13.3. Νόμοι ανάκλασης-διάθλασης

13.3.1. Ανάκλαση - Διάθλαση από μια επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια



Σχ.13.1 Ανάκλαση-πρόσπτωση-διάθλαση στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων (1) και (2)

Θεωρούμε μία ακτίνα φωτός που προσπίπτει, υπό γωνία, σε επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια που αποτελεί το σύνορο ανάμεσα σε δύο διαφορετικά οπτικά μέσα 1 και 2, με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2, αντίστοιχα. Αν είναι Ν το σημείο πρόσπτωσης, φέρνουμε την κάθετο ΚΝΚ΄, ως προς την επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια, στο σημείο πρόσπτωσης, και ορίζουμε ως γωνία πρόσπτωσης (θ_i), γωνία ανάκλασης (θ_r), και γωνία διάθλασης (θ_t), τις γωνίες που σχηματίζουν η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διερχόμενη (ή, διαθλώμενη) ακτίνα, αντίστοιχα, με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια και την προέκτασή της.

Για τις γωνίες πρόσπτωσης (θ_i), ανάκλασης (θ_r), και διάθλασης (θ_t), ισχύουν οι νόμοι:

(α) ***Νόμος ανάκλασης***: $$\theta_i = \theta_r \tag{13.1}$$

(β) ***Νόμος του Snell***: $$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t \tag{13.2}$$

Αν λάβουμε υπόψη μας την Εξ. (13.2) και το γεγονός ότι $n_{αερα} \approx 1$, διαπιστώνουμε ότι αν είμαστε σε θέση να μετρήσουμε τις γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης, στη διαχωριστική επιφάνεια του αέρα με κάποιο άλλο οπτικό υλικό, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε τον δείκτη διάθλασης του υλικού αυτού. Μεταξύ δύο υλικών με δείκτες διάθλασης, π.χ., $n_2 > n_1$, ***ονομάζουμε οπτικώς πυκνότερο*** το υλικό 2 σε σχέση με το υλικό 1.

Σε μία διαδικασία ανάκλασης-διάθλασης, θεωρούμε συνήθως ότι το φως διαδίδεται από τον αέρα προς κάποιο οπτικώς πυκνότερο υλικό. ***Σε μία τέτοια διαδρομή***, όπως προκύπτει από τη Εξ. (13.2), ***η γωνία διάθλασης θα είναι πάντα μικρότερη*** από τη γωνία πρόσπτωσης. Αυξάνοντας σταδιακά την γωνία πρόσπτωσης, όταν πλησιάζουμε την τιμή $\theta_i \approx 90^0$, (οπότε $\sin\theta_i \approx 1$), από το Νόμο του Snell προκύπτει ότι

$$\sin\theta_t = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_i \Rightarrow \sin\theta_t \approx \frac{1}{n_2}$$

η αντίστοιχη γωνία διάθλασης ***ονομάζεται οριακή γωνία,***

$$\theta_{o\rho} = \arcsin\left(\frac{1}{n_2}\right) \tag{13.3}$$

Αν είχαμε την αντίστροφη πορεία του φωτός, από το οπτικώς πυκνότερο προς το οπτικώς αραιότερο μέσο (π.χ., από το γυαλί προς τον αέρα), τότε η οριακή γωνία θα ήταν εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία το φως που εξέρχεται προς το οπτικώς αραιότερο οπτικό μέσο ταξιδεύει σχεδόν παράλληλα στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων. Σε μια τέτοια περίπτωση, για γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες της οριακής γωνίας έχουμε και ανακλώμενη (προς το οπτικώς πυκνότερο μέσο) και διαθλώμενη δέσμη (προς το οπτικώς αραιότερο μέσο), οπότε το άθροισμα των εντάσεων των δύο αυτών δεσμών είναι ίσο με την ένταση της προσπίπτουσας δέσμης.

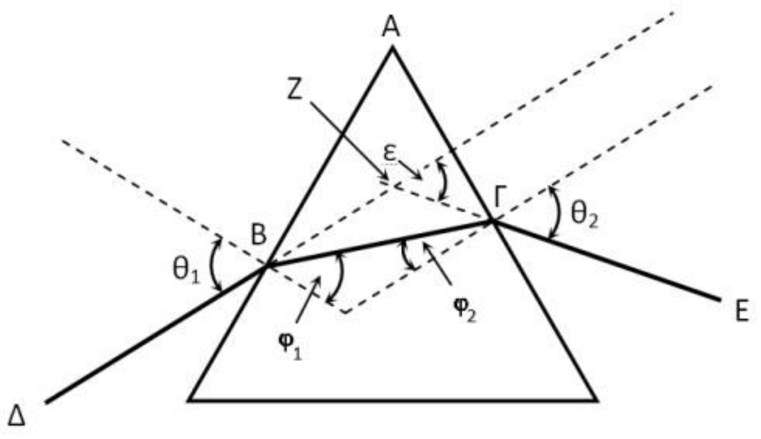
Για την ίδια περίπτωση (από οπτικώς πυκνότερο προς οπτικώς αραιότερο μέσο), όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνει μεγαλύτερη από την οριακή γωνία, τότε η διαθλώμενη δέσμη παύει να υπάρχει και η ανακλώμενη δέσμη παίρνει όλη την ένταση της προσπίπτουσας δέσμης. Τότε λέμε ότι έχουμε το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης, το οποίο αποτελεί και την αρχή στην οποία βασίζεται η χρήση των οπτικών ινών ως μέσων διάδοσης οπτικών σημάτων. Σημειώνουμε ότι το ίδιο φαινόμενο, αν περιγραφεί με όρους κυματικής, αναφέρεται ως κυματοδήγηση και οι αντίστοιχες οπτικές ίνες αναφέρονται ως κυματοδηγοί.

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

Είναι χρήσιμη η ανάλυση της διαδοχικής διάθλασης από δύο επίπεδες διαχωριστικές επιφάνειες που σχηματίζουν μία δίεδρη γωνία. Το αντίστοιχο οπτικό στοιχείο, το οποίο αποτελείται από ένα διηλεκτρικό υλικό, π.χ., γυαλί, που καταλαμβάνει το εσωτερικό της δίεδρης γωνίας, λέγεται πρίσμα. Βάση του πρίσματος ονομάζεται μία τρίτη επίπεδη επιφάνεια, παράλληλη στη ακμή της δίεδρης γωνίας, ενώ το πρίσμα τερματίζεται με δύο επίπεδες πλευρές κάθετες στην ακμή της δίεδρης γωνίας. Στην γενικότερη περίπτωση, μία φωτεινή δέσμη μπορεί να προσπίπτει με εντελώς τυχαία προσανατολισμό σε μία από τις δύο πλευρές της δίεδρης γωνίας. Αυτό που ενδιαφέρει, στις περισσότερες εφαρμογές των πρισμάτων, είναι η μελέτη της πορείας μίας δέσμης, η οποία βρίσκεται σε ένα επίπεδο κάθετο στην ακμή του πρίσματος, προσπίπτοντας υπό γωνία στην μία έδρα του.

Μία τέτοια περίπτωση αναλύεται στο Σχ. 13.2, το οποίο περιγράφει την πορεία της δέσμης σε αυτό το επίπεδο το κάθετο στην ακμή του πρίσματος. Ονομάζουμε A τη γωνία κορυφής του πρίσματος (είναι η επίπεδη γωνία που προκύπτει από την τομή της δίεδρης γωνίας με το επίπεδο το κάθετο στην ακμή του πρίσματος) και θεωρούμε, επίσης, ότι ο δείκτης διάθλασης n του υλικού, από το οποίο αποτελείται το πρίσμα, είναι γνωστός.

Έστω ότι η δέσμη προσπίπτει στο σημείο Β, υπό γωνία θ_1, κατά μήκος της πορείας ΔΒ. Μετά την διάθλασή της, υπό γωνία φ_1, η δέσμη ταξιδεύει στο εσωτερικό του πρίσματος κατά μήκος της πορείας ΒΓ.



Σχήμα 13.2

Στο σημείο Γ, η δέσμη προσπίπτει υπό γωνία φ_2 και διαθλάται υπό γωνία θ_2, εξερχόμενη κατά μήκος της διαδρομής ΓΕ.

Αν γνωρίζουμε τις τιμές των γωνιών Α και θ_1, και την τιμή του δείκτη διάθλασης n, εφαρμόζοντας δύο φορές τον Νόμο του Snell στα σημεία πρόσπτωσης Β και Γ, και λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$\mathrm{A} + \left(90^o - \varphi_1\right) + \left(90^o - \varphi_2\right) = 180^o \Rightarrow \mathrm{A} = \varphi_1 + \varphi_2$$

μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία εκτροπής ε

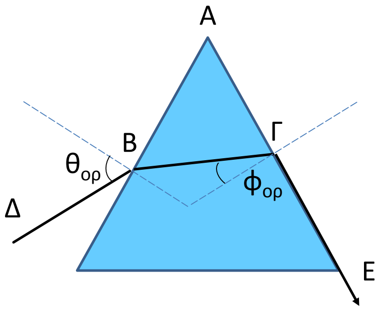
$$\varepsilon = \left(\theta_1 - \varphi_1\right) + \left(\theta_2 - \varphi_2\right) \Rightarrow \varepsilon = \left(\theta_1 + \theta_2\right) - \left(\varphi_1 + \varphi_2\right)$$

ανάμεσα στην αρχική πορεία ΔΒ και στην τελική πορεία ΓΕ της δέσμης.

Είναι φανερό ότι, για πρίσμα με γνωστά στοιχεία (A, n), η γωνία εκτροπής ε είναι συνάρτηση της αρχικής γωνίας πρόσπτωσης θ_1. Αποδεικνύεται ότι η γωνία εκτροπής ε ελαχιστοποιείται όταν η πορεία ΔΒΓΕ της δέσμης είναι συμμετρική ως προς τη διχοτόμο της γωνίας Α και, σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της ελάχιστης γωνίας εκτροπής ε_m ικανοποιεί τη σχέση

$$n \cdot \sin\left(\frac{\mathrm{A}}{2}\right) = \sin\left(\frac{\mathrm{A} + \varepsilon_m}{2}\right) \tag{13.4}$$

Επομένως, αν έχουμε ένα πρίσμα με γνωστή γωνία κορυφής, *A*, και, με διαδοχική μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης, προσδιορίσουμε την κατάσταση ελάχιστης εκτροπής και μετρήσουμε την αντίστοιχη γωνία ε_m, μπορούμε να υπολογίσουμε τον δείκτη διάθλασης n του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένο το πρίσμα, επιλύοντας την τελευταία σχέση ως προς n.



Σχ.13.3 Οριακές γωνίες σε πρίσμα

Μπορούμε, επίσης, χρησιμοποιώντας ένα πρίσμα και μεταβάλλοντας την αρχική γωνία πρόσπτωσης θ_1, να επιτύχουμε μια τέτοια πορεία ΒΓ της δέσμης ώστε η εσωτερική γωνία πρόσπτωσης φ_2 να πάρει την τιμή της οριακής γωνία που δίνεται από την Εξ. (13.3). Σε αυτή την περίπτωση η πορεία ΓΕ της εξερχόμενης δέσμης γίνεται εφαπτομενική στην αντίστοιχη πλευρά του πρίσματος και, για ελαφρώς μεγαλύτερη γωνία φ_2, έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση. Όταν έχουμε ακριβώς $\varphi_2 = \varphi_{o\rho}$, αναλύοντας την γεωμετρία του Σχήματος 3, μπορούμε να δείξουμε ότι, για την αντίστοιχη οριακή γωνία αρχικής πρόσπτωσης $\theta_{1,o\rho}$ ισχύει η σχέση

$$n \cdot \sin\left(\mathrm{A} - \varphi_{o\rho}\right) = \sin\left(\theta_{1,o\rho}\right) \tag{13.5}$$

Συνδυάζοντας την τελευταία σχέση με την Εξ. (13.3), $\varphi_{o\rho} = \arcsin\left(1/n\right)$, μπορούμε να υπολογίσουμε την αναμενόμενη $\theta_{1,o\rho}$ (προς σύγκριση με την αντίστοιχη πειραματική τιμή που είναι άμεσα μετρήσιμη), αν έχουμε υπολογίσει το δείκτη διάθλασης n του πρίσματος, π.χ., με την προηγούμενη μέθοδο της ελάχιστης εκτροπής.

13.4. Πόλωση του φωτός - Νόμος του Malus - Γωνία Brewster

13.4.1. Πόλωση του φωτός - Νόμος του Malus

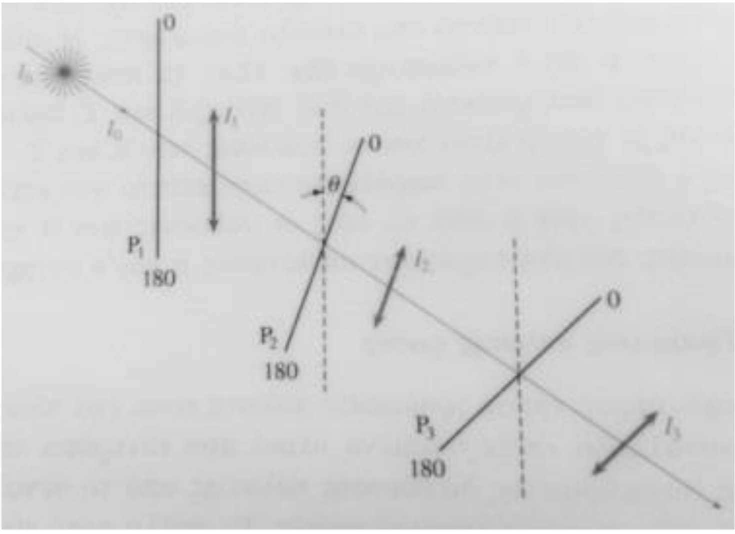
Αναφέραμε και στην εισαγωγή ότι η διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αναφέρεται, κατά σύμβαση, ως η διεύθυνση «πόλωσης» του κύματος. Ανάλογα με το πώς μεταβάλλεται με το χρόνο (αλλά και στο χώρο) η διεύθυνση πόλωσης μιας δέσμης φωτός, αποδίδουμε στο φως αντίστοιχα χαρακτηριστικά πόλωσης. Όταν η διεύθυνση πόλωσης έχει σταθερό προσανατολισμό (καθώς περνάει ο χρόνος ή καθώς διαδίδεται η δέσμη στο χώρο), τότε λέμε ότι το φως είναι γραμμικά πολωμένο. Μία άλλη κατηγορία φωτός, ως προς τα χαρακτηριστικά πόλωσης, είναι το λεγόμενο κυκλικά πολωμένο φως, για το οποίο το αντίστοιχο ηλεκτρικό πεδίο διατηρεί το μέτρο του αλλά, σε ένα σταθερό σημείο της δέσμης, περιστρέφεται, συναρτήσει του χρόνου, με τη συχνότητα του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού κύματος, διαγράφοντας ένα κύκλο. Η απεικόνιση του αντίστοιχου ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο, για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, έχει τη μορφή έλικας, με κυκλική διατομή, και με βήμα όσο και το μήκος κύματος του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Μία πιο σύνθετη μορφή πόλωσης του φωτός είναι η λεγόμενη ελλειπτική πόλωση, κατά την οποία το ηλεκτρικό πεδίο περιστρέφεται, αλλά μεταβάλλει και το μέτρο του ανάμεσα σε μια μέγιστη και σε μια ελάχιστη τιμή. Η μεταβολή αυτή γίνεται με την συχνότητα του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού κύματος και η απεικόνισή του στο χώρο, κάποια χρονική στιγμή, έχει τη μορφή έλικας με ελλειπτική διατομή και αντίστοιχο, πάλι, μήκος κύματος. Στην περίπτωση που η διεύθυνση πόλωσης μιας δέσμης φωτός μεταβάλλεται με τυχαίο τρόπο στο χώρο και στο χρόνο, τότε λέμε ότι έχουμε μη-πολωμένο ή φυσικό φως.

Στην συγκεκριμένη άσκηση θα περιοριστούμε στη μελέτη του γραμμικά πολωμένου φωτός. Συγκεκριμένα θα μελετήσουμε την διέλευση του γραμμικά πολωμένου φωτός από κάποια υλικά που είναι γνωστά ως πολωτές. Οι πολωτές είναι μη-ισότροπα υλικά τα οποία έχουν την εξής ιδιότητα: Όταν μία δέσμη πολωμένου φωτός, έντασης I_0, περάσει μέσα από έναν πολωτή, τότε η ένταση I της δέσμης που εξέρχεται τελικά από τον πολωτή εξαρτάται από την γωνία θ ανάμεσα στην διεύθυνσης πόλωσης της δέσμης και σε μία χαρακτηριστική διεύθυνση που ονομάζεται διεύθυνση πόλωσης του πολωτή. Η εξάρτηση της διερχόμενης έντασης από αυτή τη γωνία, για ιδανικούς πολωτές, είναι σύμφωνη με τη σχέση

$$I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta) \tag{13.6}$$

που είναι γνωστή ως **Νόμος του Malus**.

Όταν προσπέσει φυσικό (μη-πολωμένο) φως σε έναν ιδανικό πολωτή, τότε η δέσμη που εξέρχεται από τον πολωτή έχει ένταση ανεξάρτητη από τον προσανατολισμό του πολωτή και ίση με $I_0/2$, ενώ αποκτά την διεύθυνση πόλωσης του πολωτή. Αυτός είναι ένας από τους τρόπους σχηματισμού δέσμης πολωμένου φωτός από φυσικό (μη-πολωμένο) φως.



Σχήμα 13.4. Διάταξη για τη μελέτη της πόλωσης φωτός που αρχικά είναι φυσικό.

13.4.2. Ανάκλαση πολωμένου φωτός - Γωνία Brewster

Όταν μία δέσμη γραμμικά πολωμένου φωτός προσπέσει κάθετα σε επίπεδη επιφάνεια που διαχωρίζει δύο ισότροπα οπτικά μέσα, π.χ. αέρα και γυαλί, τότε τα ποσοστά ανάκλασης και διέλευσης δεν εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της διεύθυνση πόλωσης (αφού, λόγω της κάθετης πρόσπτωσης και του ισότροπου χαρακτήρα των υλικών, όλες οι διευθύνσεις είναι ισοδύναμες). Όταν η ίδια δέσμη προσπέσει υπό γωνία στην ίδια διαχωριστική επιφάνεια, είναι φανερό ότι οι διάφορες διευθύνσεις πόλωσης (ακόμη και για σταθερή γωνία πρόσπτωσης) δεν είναι πλέον ισοδύναμες (από γεωμετρική και μόνο άποψη). Αν επαναφέρουμε στην συζήτηση τον ορισμό του επιπέδου ανάκλασης ως το επίπεδο που περιέχει τις ακτίνες πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης, τότε μπορούμε να περιοριστούμε στην μελέτη δύο περιπτώσεων πόλωσης, Η μία περίπτωση αφορά πόλωση κάθετη στο επίπεδο ανάκλασης-διάθλασης και η άλλη περίπτωση αφορά πόλωση παράλληλη σε αυτό το επίπεδο. Στην δεύτερη περίπτωση (όταν, η πόλωση είναι παράλληλη στο επίπεδο ανάκλασης-διάθλασης) αποδεικνύεται ότι υπάρχει μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που είναι γνωστή ως γωνία Brewster(θ_B), για την οποία όλο το φως ακολουθεί την πορεία της διαθλώμενης δέσμης και η ανακλώμενη δέσμη έχει μηδενική ένταση. Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε εκείνη την γεωμετρία κατά την οποία η ανακλώμενη δέσμη αναμένεται (σύμφωνα με τον νόμο του Snell) σε μία διεύθυνση κάθετη στη διαθλώμενη δέσμη. Αυτή η διαπίστωση (η οποία αποδεικνύεται και θεωρητικά, με βάση τις συνοριακές συνθήκες στη διαχωριστική επιφάνεια, αλλά έχει και βαθύτερη φυσική ερμηνεία που σχετίζεται με τον μηχανισμό επανεκπομπής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα στοιχειώδη ταλαντούμενα δίπολα του οπτικού μέσου) μπορεί να συνδυαστεί με τον νόμο του Snell και τον νόμο της ανάκλασης, οπότε καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι

$$\tan\left(\theta_B\right) = n \qquad (13.7)$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού. Επομένως, ο προσδιορισμός της γωνίας πρόσπτωσης, για την οποία μηδενίζεται η ανακλώμενη ένταση μίας δέσμης φωτός πολωμένης παράλληλα στο επίπεδο ανάκλασης-διάθλασης, μπορεί να μας δώσει μια ανεξάρτητη εκτίμηση για τον δείκτη διάθλασης κάποιου υλικού.

13.5. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη περιέχει μία (σύμφωνη) πηγή ερυθρού φωτός, laser He-Ne, με μήκος κύματος λ = 632,8 nm και ισχύ της τάξης του 1 mW.

Προσοχή: *παρότι η ισχύς του laser είναι αρκετά ασθενής ώστε να μην προκαλεί καψίματα ή εγκαύματα, εν τούτοις εξακολουθεί να είναι επικίνδυνη για τα μάτια, σε περίπτωση κατ' ευθείαν ή εξ ανακλάσεως πρόσπτωσης, γι' αυτό και πρέπει οι χειρισμοί της να γίνονται με εξαιρετική προσοχή.*

Η διάταξη περιέχει τα παρακάτω εξαρτήματα:

- Ένα φωτόμετρο, για την μέτρηση σχετικών εντάσεων φωτός, εφοδιασμένο με οπτική ίνα για την καθοδήγηση του φωτός προς τον φωρατή του φωτομέτρου.
- Έναν ευθύγραμμο φορέα με μαγνητική ταινία για την στήριξη μεταλλικών εξαρτημάτων και ενδείξεις αποστάσεων.
- Ένα γωνιακό μεταφορέα με περιστρεφόμενη τράπεζα και γωνιόμετρο, για την ελεγχόμενη περιστροφή οπτικών στοιχείων και την μέτρηση γωνιών περιστροφής.
- Μεταλλικά στηρίγματα για τους πολωτές, που μπορούν να στηρίζονται στον γραμμικό φορέα.
- Ένα γυάλινο πρίσμα με σχήμα ορθογώνιου ισοσκελούς τριγώνου.
- Τρεις γραμμικοί πολωτές.

Προσοχή: *Μην πιάνετε τα οπτικά στοιχεία (πρίσμα, πολωτές) από τις οπτικές επιφάνειες, αλλά από τα περιμετρικά του σημεία. Σε περίπτωση που διαπιστώνετε ότι χρειάζεται καθαρισμός των οπτικών στοιχείων, συμβουλευτείτε τον επιβλέποντα.*

13.6. Εκτέλεση

1. Τοποθετήστε στο ένα άκρο του ευθύγραμμου φορέα το laser.

2. Τοποθετήστε στο άλλο άκρο του ευθύγραμμου φορέα το φωτόμετρο.

3. Φροντίστε να κατευθύνεται η δέσμη του Laser στην είσοδο του φωτόμετρου.

13.6.1. Πόλωση του φωτός - Νόμος του Malus

1. Τοποθετήστε ανάμεσα στο laser και στο φωτόμετρο τρία μεταλλικά στηρίγματα.

2. Στο πρώτο και στο τρίτο μεταλλικό στήριγμα τοποθετήστε από έναν πολωτή.

3. Περιστρέψτε τον έναν από τους δύο πολωτές έτσι ώστε να επιτύχετε την μεγιστοποίηση της έντασης που καταγράφει το φωτόμετρο.

4. Καταχωρήστε την ένδειξη του φωτόμετρου, που αντιστοιχεί στην μέγιστη ένταση, ως ένταση, I_0.

5. Σημειώστε τις γωνιακές θέσεις των δύο πολωτών ως θέσεις αναφοράς.

6. Περιστρέψτε τον ένα πολωτή, με βήμα 15^o και 12 διαδοχικά βήματα, ως προς την αντίστοιχη γωνιακή θέση αναφοράς και σημειώστε την αντίστοιχη ένδειξη της έντασης στον παρακάτω Πίνακα Ι:

Πίνακας Ι

$I_0 =$….

Α/Α	θ	$I(\theta)$	$\delta I(\theta)$

7. Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων του βήματος (6) περιστρέψτε τον ένα πολωτή, έτσι ώστε να καταγράφεται η ελάχιστη ένταση στο φωτόμετρο.

8. Τοποθετήστε στο ενδιάμεσο μεταλλικό στήριγμα τον τρίτο πολωτή.

9. Περιστρέψτε τον ενδιάμεσο πολωτή έτσι ώστε να καταγράφεται η μέγιστη και η ελάχιστη ένταση στο φωτόμετρο και σημειώστε τις δύο αντίστοιχες γωνιακές ενδείξεις του ενδιάμεσου πολωτή.

13.6.2. Γωνία ελάχιστης εκτροπής

1. Τοποθετήστε στον ευθύγραμμο φορέα τον γωνιακό μεταφορέα και περιστρέψτε το γωνιόμετρό του έτσι ώστε ο άξονας 0-180 να συμπίπτει με την πορεία της δέσμης του laser.

2. Τοποθετήστε στην περιστρεφόμενη τράπεζα του γωνιακού μεταφορέα το πρίσμα, έτσι ώστε η μία κάθετη πλευρά του να είναι κάθετη στη δέσμη του laser [Θέση αναφοράς]. Προσπαθήστε να καταλάβετε την πορεία όλων των ακτίνων (διαθλώμενων-ανακλώμενων). Καταγράψτε τα συμπεράσματά σας σχετικά με την εσωτερική ανάκλαση.

3. Περιστρέψτε την τράπεζα του γωνιακού μεταφορέα (μαζί με το πρίσμα) έτσι ώστε η ορθή γωνία του πρίσματος να πλησιάσει την προσπίπτουσα δέσμη και παρακολουθήστε την πορεία της δέσμης που εξέρχεται από την υποτείνουσα του πρίσματος.

4. Συνεχίστε να περιστρέφετε μέχρι η εξερχόμενη από την υποτείνουσα δέσμη να αντιστρέψει την πορεία της.

5. Προσδιορίστε, με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια, το σημείο αναστροφής της πορείας και επιβεβαιώστε ότι αντιστοιχεί στην κατάσταση ελάχιστης εκτροπής.

6. Μετρήστε την γωνία ελάχιστης εκτροπής και καταγράψτε την.

7. Προσδιορίστε την αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης και καταγράψτε την.

8. Καταγράψτε τα σφάλματα μέτρησης των γωνιών των βημάτων (6) και (7).

13.6.3. Γωνία ολικής εσωτερικής ανάκλασης

1. Επανέλθετε στη [Θέση αναφοράς] (βλ. βήμα 2 της προηγούμενης μέτρησης).

2. Περιστρέψτε την τράπεζα του γωνιακού μεταφορέα (μαζί με το πρίσμα) έτσι ώστε η ορθή γωνία του πρίσματος να πλησιάσει την προσπίπτουσα δέσμη και παρακολουθήστε την πορεία της δέσμης που εξέρχεται από την υποτείνουσα του πρίσματος.

3. Προσδιορίστε την κατάσταση ολικής εσωτερικής ανάκλασης στην υποτείνουσα του πρίσματος και καταγράψτε την αντίστοιχη οριακή γωνία της αρχικής πρόσπτωσης.

13.6.4. Γωνία Brewster

1. Επανέλθετε στη [Θέση αναφοράς] (βλ. βήμα 1 της προηγούμενης μέτρησης).

2. Τοποθετήστε ένα μεταλλικό στήριγμα ανάμεσα στο laser και στον γωνιακό μεταφορέα.

3. Στο μεταλλικό στήριγμα τοποθετήστε έναν γραμμικό πολωτή με οριζόντιο τον άξονά του 0-180.

4. Περιστρέψτε την τράπεζα του γωνιακού μεταφορέα με το πρίσμα, παρακολουθώντας την ανακλώμενη δέσμη από μία πλευρά του πρίσματος.

5. Προσδιορίστε την κατάλληλη γωνία για την οποία ελαχιστοποιείται η ένταση της ανακλώμενης δέσμης και καταγράψτε την αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης και το σφάλμα της.

13.7. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Υπολογίστε τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές $I(\theta)$ που αντιστοιχούν στις ίδιες γωνίες που έγιναν και οι μετρήσεις πόλωσης, χρησιμοποιώντας ως I_0 το $I_{\max}(\theta)$ (γιατί;). Καταγράψτε τις θεωρητικές και τις πειραματικές τιμές σε ένα διάγραμμα $I-\theta$.

2. Περιγράψτε και ερμηνεύστε τις παρατηρήσεις που αφορούν την τοποθέτηση του ενδιάμεσου πολωτή και τις γωνιακές του θέσεις που αντιστοιχούν σε μέγιστη και ελάχιστη τελικά εξερχόμενη ένταση από την διάταξη των τριών πολωτών.

3. Υπολογίστε τον δείκτη διάθλαση του πρίσματος χρησιμοποιώντας την μέτρηση της γωνίας ελάχιστης εκπομπής καθώς και το αντίστοιχο σφάλμα (*).

4. Υπολογίστε τον δείκτη διάθλαση του πρίσματος χρησιμοποιώντας την μέτρηση της γωνίας Brewster καθώς και το αντίστοιχο σφάλμα (*).

5. Υπολογίστε την εσωτερική οριακή γωνία $\varphi_{o\rho}$, χρησιμοποιώντας τον δείκτη διάθλαση του πρίσματος που υπολογίσατε στο ερώτημα (3), την Εξ. (13.5) και την αντίστοιχη αρχική γωνία πρόσπτωσης $\theta_{1,o\rho}$.

6. Υπολογίστε την αρχική γωνία πρόσπτωσης $\theta_{1,o\rho}$, χρησιμοποιώντας τον δείκτη διάθλαση του πρίσματος που υπολογίσατε στο ερώτημα (3), την Εξ. (13.5) και την Εξ. (13.3), $\varphi_{o\rho} = \arcsin(1/n)$, και συγκρίνετε με την τιμή της, $\theta_{1,o\rho}$, που μετρήσατε.

(*) Κατά τον υπολογισμό των σφαλμάτων να λάβετε υπόψη σας ότι η φυσική μονάδα μέτρησης των γωνιών είναι το ακτίνιο.