

ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

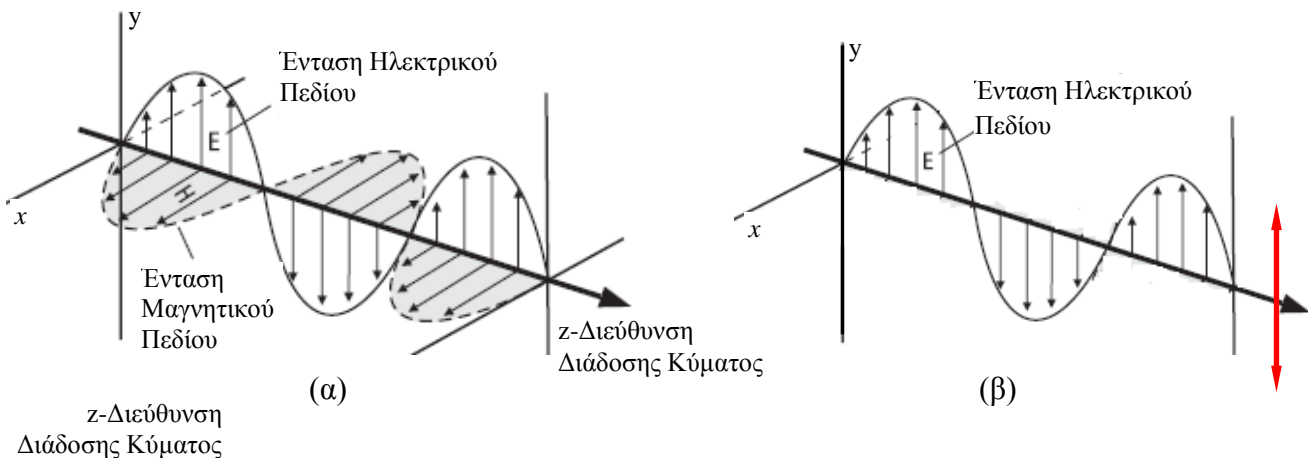
1. ΟΡΙΣΜΟΙ

Το φως είναι ένα σύνθετο κύμα. Με εξαίρεση την ακτινοβολία LASER, τα κύματα φωτός δεν είναι επίπεδα κύματα. Κάθε κύμα φωτός είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο οποίο τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και ταλαντώνονται ημιτονικά. Οι εξισώσεις κύματος για τα μέτρα της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι:

$$E(z, t) = E_0 \sin(kz - \omega t)$$

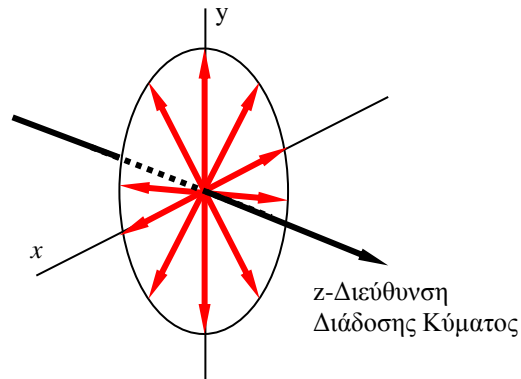
$$H(z, t) = H_0 \sin(kz - \omega t)$$

Η γραφική αναπαράσταση ενός κύματος φωτός δίνεται στο Σχήμα 1(α) που ακολουθεί:



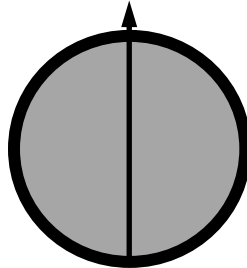
ΣΧΗΜΑ 1

Η μελέτη των κυμάτων φωτός γίνεται χρησιμοποιώντας συνήθως τη συνιστώσα του ηλεκτρικού κύματος, όπως δείχνει το παραπάνω Σχήμα 1(β). Τα κύματα φωτός είναι εγκάρσια κύματα επειδή η διεύθυνση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα κύματα φωτός, όπως και τα μηχανικά κύματα (εγκάρσια και διαμήκη) ανακλώνται, διαθλώνται, υπερτίθενται, περιθλώνται και συμβάλλουν μεταξύ τους. Επί πλέον, τα κύματα φωτός, ως εγκάρσια κύματα, **πολώνονται**. Η **πόλωση** είναι μια ιδιότητα την οποία έχουν μόνο τα εγκάρσια κύματα. Μια δέσμη πολλών εγκάρσιων κυμάτων λέμε ότι είναι πολωμένη όταν η διεύθυνση του μεγέθους που ταλαντώνεται είναι η ίδια για όλα τα κύματα της δέσμης. Στην περίπτωση του φωτός, λέμε ότι αυτό είναι **γραμμικά πολωμένο** όταν σε όλα τα επί μέρους κύματα φωτός που το συνιστούν τα διανύσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλα μεταξύ τους. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή οι διευθύνσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κάθε επί μέρους κύματος φωτός είναι τυχαίες, τότε λέμε ότι το φως είναι **μη πολωμένο ή φυσικό**. Οι περισσότερες φωτεινές πηγές (π.χ. ο ήλιος και οι λαμπτήρες φωτισμού) δημιουργούν μη πολωμένο φως. Οι δίοδοι LASER παράγουν συνήθως πολωμένο φως. Το Σχήμα 2 αναπαριστά γραφικά ένα μη πολωμένο φως. Στα 6 κύματα που συνιστούν το κύμα, οι διευθύνσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι τυχαίες.



ΣΧΗΜΑ 2 Μη πολωμένο φως (φυσικό φως)

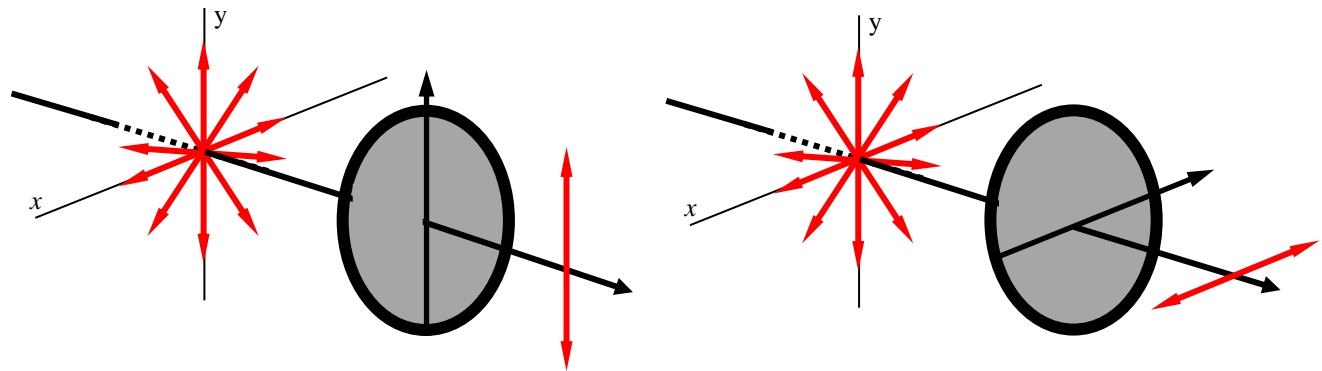
Υπάρχουν διαφανή υλικά τα οποία επιτρέπουν να περάσουν μέσα από αυτά μόνο τα κύματα φωτός στα οποία το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλο προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση. Τα υλικά αυτά λέγονται **πολωτές** και η επιλεκτική διεύθυνση για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται **χαρακτηριστική διεύθυνση του πολωτή** ή απλά **διεύθυνση του πολωτή**. Στο Σχήμα 3 που ακολουθεί δίνεται συμβολικά ένας πολωτής. Το βέλος καθορίζει τη χαρακτηριστική διεύθυνση του πολωτή. Σε κάθε πολωτή υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της διεύθυνσης πόλωσης.



ΣΧΗΜΑ 3 Συμβολική αναπαράσταση ενός πολωτή

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΩΤΩΝ – ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ MALUS

Στο Σχήμα 4α μη πολωμένο φως (φυσικό φως) διέρχεται από πολωτή του οποίου η χαρακτηριστική διεύθυνση είναι κατακόρυφη. Στην περίπτωση αυτή, το φως που εξέρχεται από τον πολωτή είναι πολωμένο κατακόρυφα (η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει κατακόρυφη διεύθυνση). Στο Σχήμα 4β, μη πολωμένο φως διέρχεται από πολωτή του οποίου η χαρακτηριστική διεύθυνση είναι οριζόντια. Στην περίπτωση αυτή, το φως που εξέρχεται από τον πολωτή είναι πολωμένο οριζόντια (η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχει οριζόντια διεύθυνση).

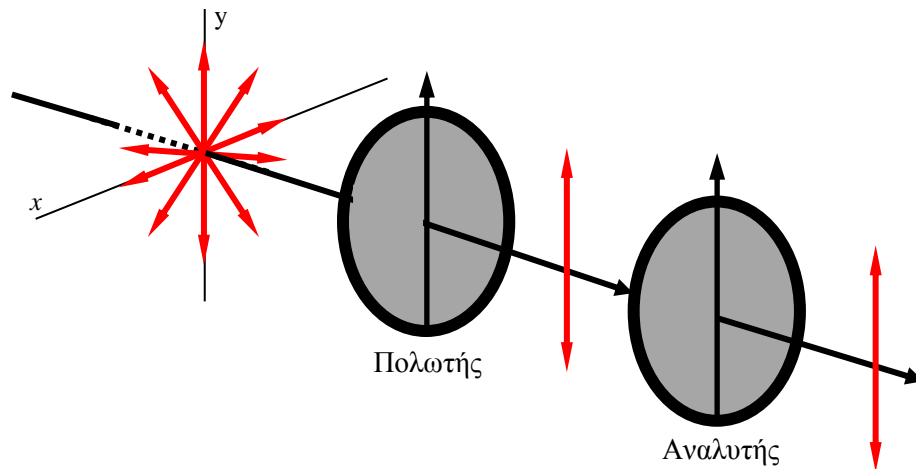


α) Πόλωση στην κατακόρυφη διεύθυνση

(β) Πόλωση στην οριζόντια διεύθυνση

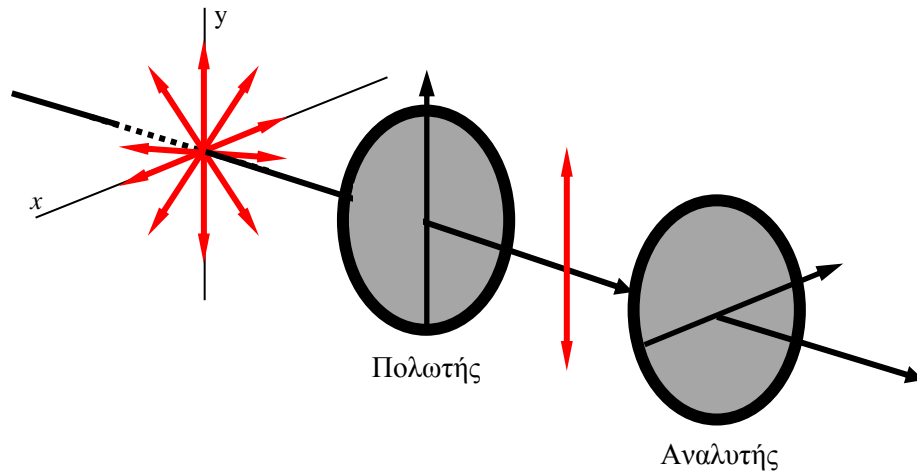
ΣΧΗΜΑ 4

Αν στην πορεία δέσμης μη πολωμένου φωτός (φυσικού φωτός) παρεμβληθούν δυο πολωτές, ο πολωτής στον οποίο προσπίπτει το μη πολωμένο φως ονομάζεται απλά πολωτής. Στην περίπτωση αυτή, ο δεύτερος πολωτής ονομάζεται **αναλυτής**. Όταν οι χαρακτηριστικές διευθύνσεις του πολωτή και του αναλυτή είναι παράλληλες μεταξύ τους, τότε το φως που εξέρχεται από τον αναλυτή είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό που εξέρχεται από τον πολωτή (βλέπε Σχήμα 5):



ΣΧΗΜΑ 5

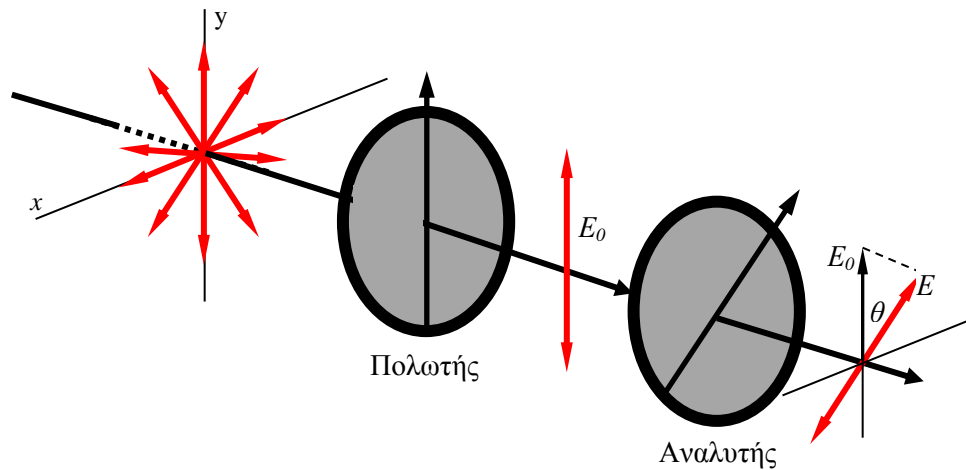
Όταν η χαρακτηριστική διεύθυνση του αναλυτή είναι κάθετη στη χαρακτηριστική διεύθυνση του πολωτή, τότε από τον αναλυτή δεν εξέρχεται φως (βλέπε Σχήμα 6):



ΣΧΗΜΑ 6

ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ MALUS

Το Σχήμα 7 δείχνει την περίπτωση που οι χαρακτηριστικές διευθύνσεις αναλυτή και πολωτή δεν είναι κάθετες μεταξύ τους αλλά σχηματίζουν γωνία $\theta < 90^\circ$.



ΣΧΗΜΑ 7

Αν E_0 είναι το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του πολωμένου κύματος φωτός που προσπίπτει στον αναλυτή, τότε το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που εξέρχεται από τον αναλυτή θα είναι ίσο με την προβολή του E_0 πάνω στη χαρακτηριστική διεύθυνση του αναλυτή (βλέπε Σχήμα 7):

$$E = E_0 \cos\theta \quad (1)$$

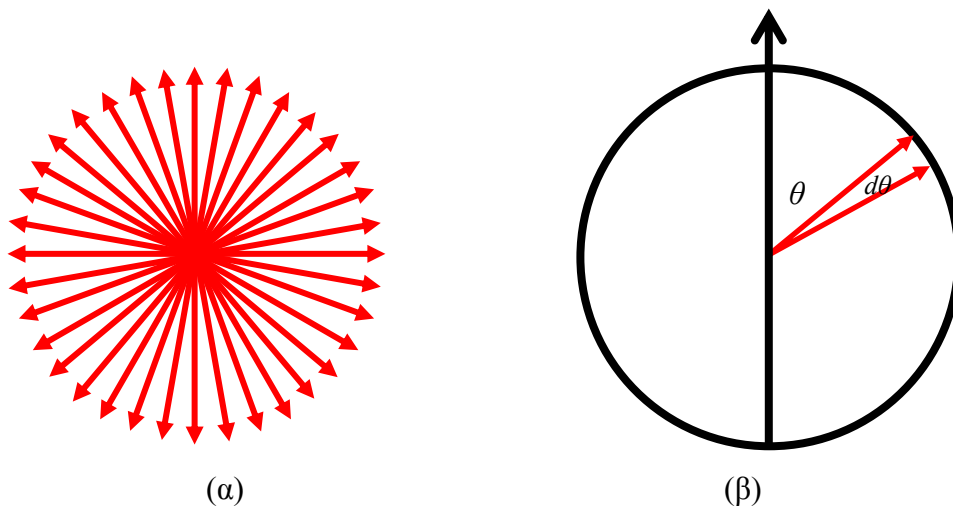
Δεδομένου τώρα ότι η ένταση ενός κύματος είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους του κύματος, στη δεδομένη περίπτωση με το τετράγωνο του πλάτους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η ένταση

$I(\theta)$ του κύματος που εξέρχεται από τον αναλυτή συναρτήσει της γωνίας που σχηματίζουν οι χαρακτηριστικές διευθύνσεις πολωτή-αναλυτή θα δίνεται από τη σχέση:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

Η Σχέση (2) αποτελεί το **νόμο του Malus**. Πράγματι, όταν η γωνία που σχηματίζει ο αναλυτής με τον πολωτή είναι $\theta = 0^\circ$, τότε $\cos \theta = 1$ και η ένταση I του φωτός που εξέρχεται από το αναλυτή είναι ίση με την ένταση I_0 του πολωμένου φωτός που προσπίπτει σε αυτόν ($I = I_0$). Αντίθετα, όταν οι χαρακτηριστικές διευθύνσεις του πολωτή και του αναλυτή είναι κάθετες μεταξύ τους, δηλαδή $\theta = 90^\circ$, τότε $\cos \theta = 0$ και η ένταση του φωτός που εξέρχεται από τον αναλυτή θα είναι μηδέν. Στην περίπτωση αυτή δεν εξέρχεται φως από τον αναλυτή.

Εφαρμόζοντας το νόμο του Malus μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση I του φωτός που εξέρχεται από ένα πολωτή στην περίπτωση που στον πολωτή προσπίπτει φυσικό φως (μη πολωμένο φως) έντασης I_0 . Στο Σχήμα 8α έχουμε την αναπαράσταση του μη πολωμένου φωτός που προσπίπτει στον πολωτή. Η συνολική ένταση I_0 του φυσικού φωτός που προσπίπτει στον πολωτή είναι ίση με το άθροισμα των εντάσεων όλων των επί μέρους κυμάτων, που συνιστούν το φως αυτό, οι χαρακτηριστικές διευθύνσεις των οποίων κατανέμονται ομοιόμορφα σε ένα πλήρη κύκλο, δηλαδή σε γωνία ίση με 2π ακτίνια (rad).



ΣΧΗΜΑ 8

Το Σχήμα 8β δείχνει τον πολωτή πάνω στον οποίο προσπίπτει το φυσικό φως καθώς και ένα στοιχειώδες τμήμα των επιμέρους κυμάτων, των οποίων οι χαρακτηριστικές διευθύνσεις κατανέμονται μέσα σε μια στοιχειώδη γωνία $d\theta$. Στο στοιχειώδες αυτό τμήμα των επιμέρους κυμάτων ακτινοβολεί φως με στοιχειώδη ένταση dI' . Με την απλή μέθοδο των τριών παίρνουμε την αναλογία:

$$\frac{I_0}{2\pi} = \frac{dI'}{d\theta} \quad \Rightarrow \quad dI' = \frac{I_0}{2\pi} d\theta \quad (3)$$

Αν το εν λόγω στοιχειώδες τμήμα των επί μέρους κυμάτων σχηματίζει γωνία θ με τη χαρακτηριστική διεύθυνση του πολωτή, τότε, σύμφωνα με το νόμο του Malus, η στοιχειώδης ένταση dI' θα συνεισφέρει στην έξοδο του πολωτή φως με στοιχειώδη ένταση dI η οποία θα είναι ίση με:

$$dI = dI' \cos^2 \theta \quad (4)$$

Από τις Σχέσεις (3) και (4) παίρνουμε:

$$dI = \frac{I_0}{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \quad (5)$$

Η ολική φωτεινή ένταση που θα εξέλθει από τον πολωτή θα είναι ίση με το ολοκλήρωμα της Εξίσωσης 5 από $\theta = 0 \text{ rad}$ έως $\theta = 2\pi \text{ rad}$:

$$I = \int_0^{2\pi} \frac{I_0}{2\pi} \cos^2 \theta d\theta = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta \quad (6)$$

Από την Τριγωνομετρία δανειζόμαστε την ταυτότητα:

$$\cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$$

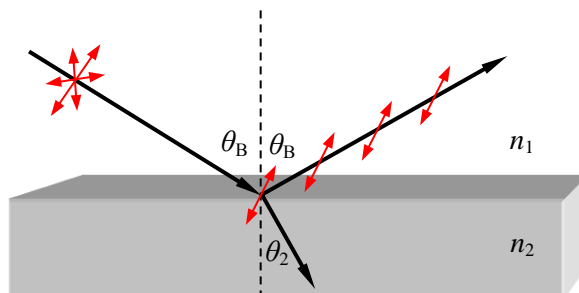
οπότε η Εξίσωση 6 γίνεται:

$$I = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1 + \cos 2\theta}{2} d\theta = \frac{I_0}{4\pi} \left[\int_0^{2\pi} d\theta + \int_0^{2\pi} \cos 2\theta d\theta \right] = \frac{I_0}{4\pi} [2\pi + 0] \Rightarrow$$

$$I = \frac{I_0}{2} \quad (7)$$

3. ΠΟΛΩΣΗ ΑΠΟ ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΓΩΝΙΑ BREWSTER

Αποδεικνύεται θεωρητικά και πειραματικά ότι στην περίπτωση που κύμα φωτός, το οποίο διαδίδεται σε μέσο με δείκτη διάθλασης n_1 , περάσει σε μέσο με δείκτη διάθλασης n_2 και η ανακλώμενη ακτίνα είναι κάθετη στη διαθλώμενη ακτίνα, τότε το ανακλώμενο φως είναι πολωμένο με διεύθυνση πόλωσης που είναι κάθετη στο επίπεδο που ορίζουν οι διευθύνσεις της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης ακτίνας (Σχήμα 8).



ΣΧΗΜΑ 9

Στην περίπτωση αυτή, η γωνία πρόσπτωσης και γωνία ανάκλασης είναι ίσες με $\theta_1 = \theta_B$. Η γωνία διάθλασης είναι θ_2 . Επειδή η ανακλώμενη ακτίνα είναι κάθετη στην διαθλώμενη ακτίνα προκύπτει ότι:

$$\theta_B + \theta_2 = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 = 90^\circ - \theta_B \quad (8)$$

Από το νόμο του Snell έχουμε:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin\theta_B}{\sin(90^\circ - \theta_B)} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin\theta_B}{\cos\theta_B} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow$$

$$\tan\theta_B = \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

Η κρίσιμη γωνία πρόπτωσης θ_B για την οποία το ανακλώμενο φως είναι ολικά πολωμένο ονομάζεται **γωνία Brewster**. Στην περίπτωση που το φως μεταβαίνει από τον αέρα όπου $n_1=1$ σε υλικό με δείκτη διάθλασης n_2 , η γωνία Brewster δίνεται από τη σχέση:

$$\tan\theta_B = n_2 \quad (10)$$

Στην περίπτωση που η γωνία πρόσπτωσης είναι διαφορετική από τη γωνία Brewster, το ανακλώμενο φως είναι μερικά πολωμένο.

ΑΣΚΗΣΗ 1:

Μη πολωμένο φως προσπίπτει σε ένα ζεύγος πολωτών. Να υπολογίσετε την απαιτούμενη γωνία θ που πρέπει να σχηματίζουν οι πολωτικές διευθύνεις των δυο πολωτών ώστε η ένταση του φωτός που εξέρχεται από τον δεύτερο πολωτή να είναι ίση με το 50% της έντασης I_0 που προσπίπτει στον πολωτή αυτό.

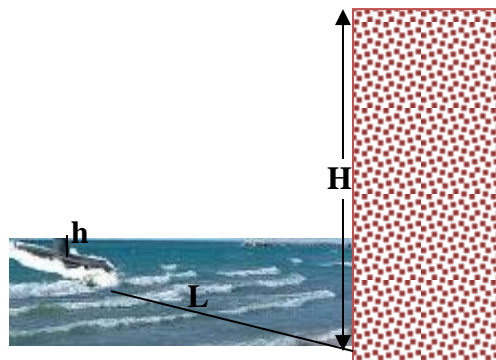
ΛΥΣΗ

Από το νόμο του Malus έχουμε:

$$I(\theta) = I_0 \cos^2\theta \Rightarrow \frac{I(\theta)}{I_0} = \cos^2\theta \Rightarrow \cos^2\theta = 0,50 \Rightarrow \cos\theta = \sqrt{0,50} = 0,707 \Rightarrow$$
$$\theta = 45^\circ$$

ΑΣΚΗΣΗ 2:

Ένα υποβρύχιο πλέει οριακά κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και πλησιάζει μια ακτογραμμή όπου σε ύψος $H=100$ m από αυτή υπάρχει ένα φυλάκιο. Από μια κατακόρυφη κεραία που εξέχει πάνω από την επιφάνεια τη θάλασσας διάστημα $h=5,5$ m εκπέμπεται μη πολωμένο κύμα. Ο παρατηρητής που βρίσκεται στο φυλάκιο στρέφει τον κατευθυντήρα του ανιχνευτή κυμάτων προς τη θάλασσα και διαπιστώνει ότι σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση τα κύματα που ανακλώνται από την επιφάνεια της θάλασσας είναι πλήρως πολωμένα. Τη χρονική στιγμή της διαπίστωσης αυτής, να υπολογίσετε την απόσταση L του υποβρυχίου από την ακτογραμμή.

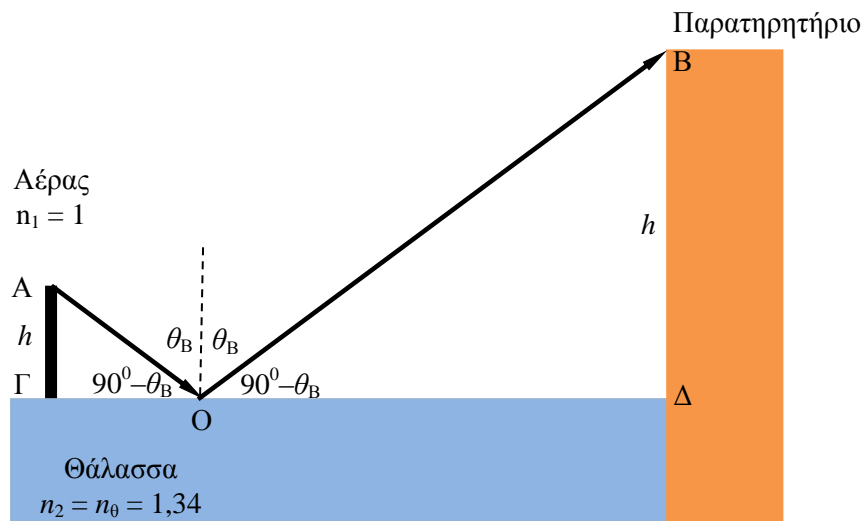


ΛΥΣΗ

Στο σχήμα που ακολουθεί δίνουμε τη γεωμετρία του προβλήματος στο επίπεδο του κειμένου όχι υπό κλίμακα και όχι προοπτικά. Αφού τα ανακλώμενα από την επιφάνεια της θάλασσας ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ανιχνεύει ο παρατηρητής είναι πλήρως πολωμένα, το σημείο πρόσπτωσης των κυμάτων αυτών στην επιφάνεια της θάλασσας πρέπει να είναι σε τέτοιο σημείο ώστε η γωνία πρόσπτωσης θ να είναι ίση με τη γωνία Brewster θ_B η οποία είναι ίση με:

$$\tan\theta_B = n_2 \quad (1)$$

δεδομένου ότι το μέσο στο οποίο διαδίδεται το κύμα είναι ο αέρας του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι ίσος με $n_1=1$.



Από τη Σχέση (1) υπολογίζουμε τη γωνία Brewster:

$$\tan\theta_B = n_2 = 1,34 \Rightarrow \theta_B = 53,3^\circ$$

Από τα ορθογώνια τρίγωνα AOB και BOΔ:

$$(OG) = \frac{(AG)}{\tan(90^\circ - \theta_B)} = \frac{5,5 \text{ m}}{\tan(90^\circ - 53,3^\circ)} \Rightarrow (OG) = 7,38 \text{ m}$$

$$(OD) = \frac{(BD)}{\tan(90^\circ - \theta_B)} = \frac{100 \text{ m}}{\tan(90^\circ - 53,3^\circ)} \Rightarrow (OD) = 134 \text{ m}$$

Η απόσταση του υποβρύχιου από την ακτογραμμή είναι:

$$(\Gamma\Delta) = (OG) + (OD) = 7,38 \text{ m} + 134 \text{ m} \Rightarrow (\Gamma\Delta) = 141 \text{ m}$$