ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

Συγγραφή – Επιμέλεια: Παναγιώτης Φ. Μοίρας

ΣΟΛΩΜΟΥ 29 - ΑΘΗΝΑ ☎ 6932 946778
www.pmoiras.weebly.com

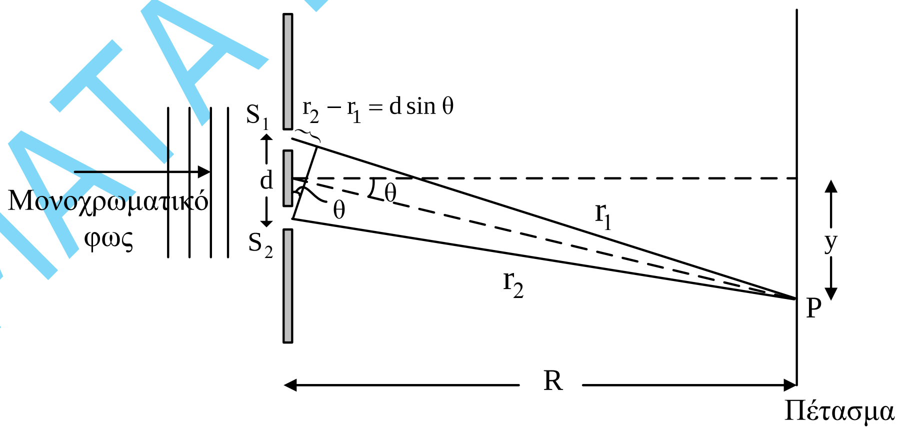
1. Συμβολή – Το Πείραμα του Young

Συμβολή είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δυο σύμφωνα κύματα, δηλαδή δυο κύματα της ίδιας συχνότητας και χρονικά σταθερής διαφοράς φάσης, που διαδίδονται κατά την ίδια περίπου διεύθυνση μπορεί να ενωθούν ώστε η ενέργειά τους να μη μοιράζεται ομοιόμορφα στο χώρο, αλλά να παρουσιάζει μέγιστο σε ορισμένα σημεία και ελάχιστο σε άλλα.

Το φαινόμενο της συμβολής βασίζεται στην αρχή της επαλληλίας και έτσι δυο σύμφωνα κύματα του ίδιου μήκους κύματος καθώς συμβάλλουν μπορεί να ενισχύει το ένα το άλλο και να παράγεται ένα κύμα μεγαλύτερου πλάτους **(ενισχυτική συμβολή)** ή να αλληλοαναιρούνται **(αναιρετική συμβολή)**.

Η συμβολή δεν παρατηρείται μόνο στο φως, αλλά είναι χαρακτηριστικό όλων των κυμάτων. Έτσι τα δυο σύμφωνα κύματα μπορεί να δημιουργούνται από δυο αναδευτήρες σε δοχείο με υγρό (μηχανικά κύματα), δυο ηχεία που τροφοδοτούνται από τον ίδιο ενισχυτή (ηχητικά κύματα), δύο κεραίες που τροφοδοτούνται από τον ίδιο πομπό (ραδιοφωνικά κύματα) ή δυο σχισμές σε αδιαφανές πέτασμα που φωτίζονται από την ίδια μονοχρωματική πηγή φωτός (φωτεινά κύματα).

Το πρώτο πείραμα συμβολής φωτός έγινε από τον Thomas Young το 1800, όπου ως δυο σύμφωνες πηγές χρησιμοποίησε τις δυο λεπτές σχισμές ενός πετάσματος στις οποίες προσπίπτει μονοχρωματικό φως. Δηλαδή επειδή τα μέτωπα κύματος διανύουν ίσες αποστάσεις μέχρι να φτάσουν στις σχισμές S_1 και S_2 θα έχουν την ίδια φάση και κατά συνέπεια τα κύματα που αναδύονται από τις σχισμές θα είναι σε φάση και συνεπώς οι σχισμές είναι σύμφωνες πηγές.



Σχήμα 1

Έστω οι δυο λεπτές σχισμές που βρίσκονται σε απόσταση d μεταξύ τους και σε απόσταση R>>d από τις σχισμές τοποθετείται ένα πέτασμα και έστω P ένα τυχαίο σημείο πάνω στο πέτασμα που απέχει αποστάσεις r_1 και r_2 από τις σχισμές S_1 και S_2 αντίστοιχα. Επομένως δυο κύματα που φτάνουν στο P από τις S_1 και S_2 είναι κατά το ξεκίνημά τους από τις σχισμές σε φάση (γιατί και τα δυο προέρχονται από την ίδια ισοφασική επιφάνεια του επίπεδου κύματος που πέφτει πάνω σε αυτές), ενώ λόγω του διαφορετικών οπτικών δρόμων φτάνουν στο P με διαφορά φάσης. Επειδή όμως R>>d οι γραμμές από τις S_1 και S_2 προς το P θα είναι σχεδόν παράλληλες και η διαφορά του οπτικού δρόμου θα είναι:

$$r_2 - r_1 = d\sin\theta \qquad \textbf{(1)}$$

Η φύση της συμβολής στο P καθορίζεται από το αν τα κύματα φτάνουν στο P με την ίδια φάση ή με διαφορά φάσης, δηλαδή από τον αριθμό των μηκών κύματος που περιέχονται στη διαφορά δρόμου $r_2 - r_1$.
Συνεπώς στο σημείο P παρουσιάζεται **ενισχυτική συμβολή (μέγιστο)**, δηλαδή μια έντονα φωτισμένη περιοχή του πετάσματος, όταν η διαφορά δρόμου είναι ένας ακέραιος αριθμός μηκών κύματος. Δηλαδή όταν:

$$\boxed{d\sin\theta = m\lambda} \qquad m=0,1,2,\ldots.. \qquad \textbf{(2)}$$

Αντίστοιχα στο σημείο P παρουσιάζεται **αναιρετική συμβολή (ελάχιστο)**, δηλαδή μια σκοτεινή περιοχή στο πέτασμα, όταν η διαφορά δρόμου είναι ένας ημιακέραιος αριθμός μηκών κύματος. Δηλαδή όταν:

$$\boxed{d\sin\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda} \qquad m=0,1,2,\ldots \qquad \textbf{(3)}$$

Άρα η εικόνα στο πέτασμα θα είναι μία διαδοχή φωτεινών και σκοτεινών λωρίδων που ονομάζονται **κροσσοί συμβολής**.
Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί μια έκφραση για τις θέσεις των κέντρων των φωτεινών κροσσών συμβολής από το κεντρικό μέγιστο (m=0).
Έστω ότι y είναι η απόσταση από το κέντρο του πετάσματος (θ=0) έως το κέντρο του m-οστού φωτεινού κροσσού συμβολής. Από το **Σχήμα 1** φαίνεται ότι:

$$y = R\tan\theta \qquad \textbf{(4)}$$

Επειδή όμως R>>d η γωνία θ θα είναι πολύ μικρή, οπότε ισχύει η προσέγγιση $\tan\theta \cong \sin\theta$ κι επομένως η **(4-4)** γίνεται:

$$y = R\sin\theta \qquad \textbf{(5)}$$

Άρα συνδυάζοντας τις **(4-5)** και **(4-2)** τελικά προκύπτει:

$$\boxed{y = R\frac{m\lambda}{d}} \qquad \textbf{(6)}$$

Άρα η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών φωτεινών κροσσών (m και m+1) στο πέτασμα είναι $\Delta y = R\lambda/d$, δηλαδή είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ των σχισμών.
Συνεπώς όσο πιο κοντά είναι οι σχισμές, τόσο εξαπλώνεται η εικόνα των φωτεινών κροσσών, ενώ όταν οι σχισμές είναι μακριά, οι φωτεινοί κροσσοί είναι πλησιέστερα ο ένας στον άλλο.
Επίσης από την **(6)** μπορεί να υπολογιστεί το μήκος κύματος με απλή μέτρηση των αποστάσεων y, R και d. Με τη μέθοδο αυτή ο Young πέτυχε την πρώτη απ΄ ευθείας μέτρηση οπτικού μήκους κύματος με μεγάλη ακρίβεια.

Σημείωση

Η ένταση της ακτινοβολίας του συνισταμένου κύματος στο σημείο P του πετάσματος αποδεικνύεται ότι είναι:

$$I = I_m \cos^2\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right) \qquad \textbf{(7)}$$

όπου I_m είναι η μέγιστη ένταση του συνισταμένου κύματος που αντιστοιχεί σε γωνία θ=0, δηλαδή στον κεντρικό φωτεινό κροσσό.

Εφαρμογή

Σε διάταξη διπλής σχισμής, η διαχωριστική απόσταση των σχισμών ισούται με το 100πλάσιο του μήκους κύματος του φωτός το οποίο διέρχεται από τις σχισμές.

α) Ποια είναι η γωνιακή απόσταση ανάμεσα στο πρώτο και στο δεύτερο μέγιστο;

β) Ποια είναι η γραμμική απόσταση ανάμεσα στο πρώτο και στο δεύτερο μέγιστο αν η οθόνη βρίσκεται σε απόσταση 50 cm από τις σχισμές;

Λύση

α) Η γωνιακή απόσταση σύμφωνα με την **(4)** είναι:

$$\tan\theta = \frac{\Delta y}{R}$$

Αλλά η απόσταση Δy των δυο πρώτων μέγιστων σύμφωνα με την **(6)** είναι:

$$\Delta y = \frac{R\lambda}{d}$$

Άρα είναι:

$$\tan\theta = \frac{\Delta y}{R} = \frac{R\lambda}{Rd} = \frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{100\lambda} = \frac{1}{100} = 0{,}01 \Rightarrow$$

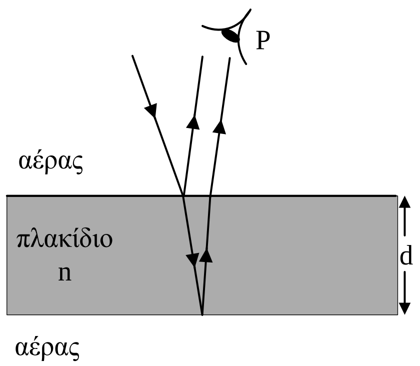
$$\Rightarrow \theta = \tan^{-1} 0{,}01 \Rightarrow \theta = 0{,}57^\circ$$

β) Η γραμμική απόσταση των δυο πρώτων μέγιστων, σύμφωνα με την **(6)** είναι:

$$\Delta y = R\frac{\lambda}{d} = 50\text{cm}\frac{\lambda}{100\lambda} = \frac{50\text{cm}}{100} \Rightarrow \Delta y = 0{,}5\text{cm}$$

2. Συμβολή σε Λεπτά Πλακίδια

Η ανάκλαση του φωτός από μια σαπουνόφουσκα ή από ένα λεπτό στρώμα λαδιού που επιπλέει σε νερό και η δημιουργία χρωματιστών λωρίδων είναι αποτέλεσμα φαινομένων συμβολής. Δηλαδή φωτεινά κύματα ανακλώνται από τις απέναντι επιφάνειες των λεπτών υμενίων, ενώ συμβαίνει ενισχυτική συμβολή μεταξύ των ανακλώμενων κυμάτων σε διάφορα σημεία για διαφορετικά μήκη κύματος.



Σχήμα 2

Έστω το πλακίδιο του σχήματος , με ομοιόμορφο πάχος d και δείκτη διάθλασης n. Μονοχρωματικό φως προσπίπτει στην πάνω επιφάνεια του λεπτού πλακιδίου και ανακλάται μερικώς από αυτή, ενώ το φως που διαπερνά την πάνω επιφάνεια ανακλάται μερικώς στην κάτω επιφάνεια. Τα δυο αυτά ανακλώμενα κύματα συναντώνται σε ένα σημείο P (μάτι παρατηρητή) και μπορεί να συμβάλλουν ενισχυτικά ή αναιρετικά ανάλογα με τη σχέση των φάσεών τους.

Για περίπου κάθετη πρόσπτωση του φωτός στην πάνω επιφάνεια του πλακιδίου η γεωμετρική διαφορά δρόμου των δυο ακτινών στο P είναι 2d.

Σημειώνεται ότι όταν το φως διαδίδεται σε ένα μέσο δείκτη διάθλασης n_1 και ανακλάται από ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n_2 τότε αυτό υφίσταται μια μετατόπιση φάσης 180^o (π rad) αν $n_2 > n_1$, ενώ δεν υφίσταται καμία μετατόπιση φάσης αν $n_1 > n_2$. Επίσης όταν φως μήκους κύματος λ διαδίδεται σε ένα μέσο δείκτη διάθλασης n, τότε το μήκος κύματός του γίνεται:

$$\lambda_n = \frac{\upsilon}{v} = \frac{c}{nv} \Rightarrow \lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

Επομένως σύμφωνα με τα παραπάνω το ανακλώμενο κύμα στην κάτω επιφάνεια του πλακιδίου δεν υφίσταται μετατόπιση φάσης λόγω ανάκλασης, αλλά λόγω της διαφοράς δρόμου 2d (που διανύει επιπλέον σε σχέση με το ανακλώμενο κύμα της πάνω επιφάνειας) προκαλείται μια μετατόπιση φάσεως:

$$2\pi\left(\frac{2d}{\lambda_n}\right) = \frac{4n\pi d}{\lambda}\ \text{rad} \qquad \textbf{(8)}$$

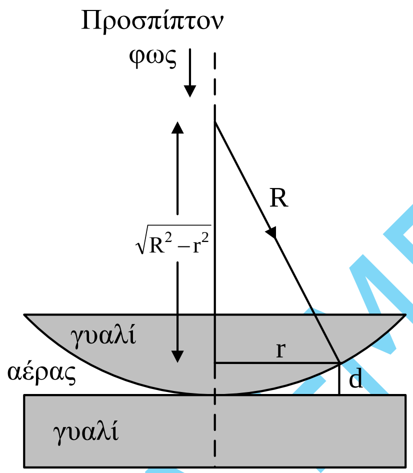
Άρα επειδή το ανακλώμενο κύμα στην πάνω επιφάνεια έχει υποστεί λόγω ανάκλασης μετατόπιση φάσης 180^o, αν η μετατόπιση φάσης του ανακλώμενου κύματος από την κάτω επιφάνεια **(8)** είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π rad τότε τα δυο ανακλώμενα κύματα θα συμβάλλουν ενισχυτικά και θα παρατηρείται έντονο φως. Δηλαδή η **συνθήκη ενισχυτικής συμβολής** είναι:

$$\frac{4n\pi d}{\lambda} = m\pi \Rightarrow 2nd = \frac{m}{2}\lambda \quad \text{ή} \quad \boxed{2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda} \qquad m=0,1,2,\ldots \qquad \textbf{(9)}$$

Αντίστοιχα αν η μετατόπιση φάσης **(4-8)** είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π rad τότε τα κύματα θα συμβάλουν αναιρετικά και θα αλληλοαναιρούνται. Δηλαδή η **συνθήκη αναιρετικής συμβολής** είναι :

$$\frac{4n\pi d}{\lambda} = m2\pi \Rightarrow \boxed{2nd = m\lambda} \qquad m=0,1,2,\ldots \qquad \textbf{(10)}$$

✍ Εφαρμογή : Δακτύλιοι Newton



Σχήμα 3

Το **Σχήμα 3** δείχνει ένα φακό ακτίνας καμπυλότητας R τοποθετημένο σε απόλυτα επίπεδη γυάλινη πλάκα και φωτίζεται από πάνω με φως μήκους κύματος λ.
Παρατηρείται ότι εμφανίζονται κυκλικοί κροσσοί συμβολής (δακτύλιοι Newton) που οφείλονται στο μεταβλητού πάχους στρώμα αέρα μεταξύ του φακού και της πλάκας.
Η ακτίνα που προέρχεται από τη βάση του στρώματος του αέρα είναι εκείνη που ανακλάται σε μέσο μεγαλύτερου δείκτη διάθλασης και θα υποστεί μετατόπιση φάσης 180^o.

Η συνθήκη ενισχυτικής συμβολής είναι η **(9)** και επειδή ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι n=1 δίνει:

$$2d = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad m=0,1,2,\ldots \qquad \textbf{(11)}$$

Από το σχήμα εύκολα φαίνεται ότι:

$$d = R - \sqrt{R^2 - r^2} \Rightarrow d = R - R\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}}$$

Αν $r \ll R$ ή $r/R \ll 1$ ισχύει η προσέγγιση $\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}} \cong 1 - \frac{r^2}{2R^2}$

Επομένως :

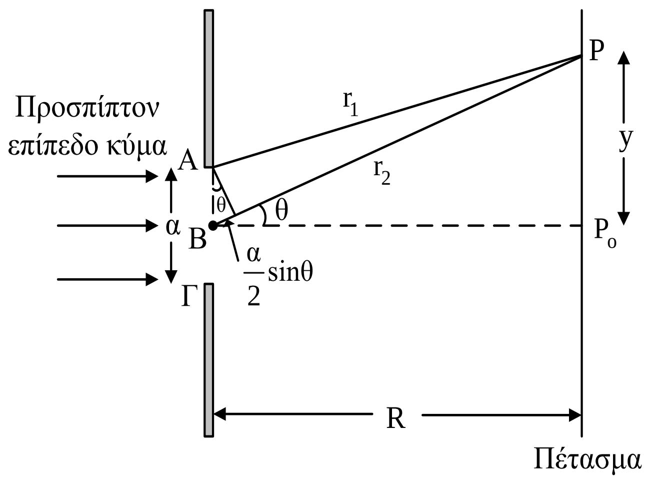
$$d = R - R\left(1 - \frac{r^2}{2R^2}\right) \Rightarrow d = \frac{r^2}{2R} \qquad \textbf{(12)}$$

Άρα συνδυάζοντας τις **(11)** και **(12)** προκύπτουν οι ακτίνες των κυκλικών φωτεινών δακτυλίων:

$$2\frac{r^2}{2R}=\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda \Rightarrow r=\sqrt{\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda R} \qquad m=0,1,2,\ldots \qquad \textbf{(13)}$$

3. Περίθλαση

Περίθλαση είναι το φαινόμενο της εκτροπής του φωτός από την ευθύγραμμη διάδοση όταν συναντήσει ένα εμπόδιο, όπως είναι το άκρο μιας σχισμής. Αυτό γίνεται αντιληπτό καθώς παρατηρείται ότι το φως θα περάσει στο χώρο της γεωμετρικής σκιάς πίσω από το εμπόδιο σχηματίζοντας στην περιοχή αυτή μια εικόνα κροσσών συμβολής. Η περίθλαση είναι φαινόμενο καθαρά κυματικό και δεν μπορεί να εξηγηθεί με τη Γεωμετρική Οπτική.
Τα φαινόμενα της συμβολής και της περίθλασης είναι αποτέλεσμα της επαλληλίας των κυμάτων και το όριο που καθορίζει την ονομασία ενός φαινομένου, αν αυτό θα χαρακτηριστεί σαν συμβολή ή σαν περίθλαση, δεν είναι ποιοτικό αλλά ποσοτικό. Δηλαδή η επαλληλία δυο μόνο κυμάτων είναι η συμβολή, ενώ η επαλληλία πολλών κυμάτων είναι η περίθλαση.
Η μαθηματική δυσκολία του φαινομένου έχει οριοθετήσει δυο τύπους περίθλασης. Ο πρώτος ονομάζεται **περίθλαση Fraunhofer ή περίθλαση μακρινού πεδίου** και αναφέρεται στην περίπτωση που η πηγή, το εμπόδιο και το πέτασμα στο οποίο σχηματίζονται τα φαινόμενα περιθλάσεως είναι απομακρυσμένα μεταξύ τους, έτσι ώστε τα κύματα να θεωρούνται επίπεδα, δηλαδή οι αντίστοιχες ακτίνες να είναι παράλληλες.
Ο δεύτερος τύπος περίθλασης είναι η **περίθλαση Fresnel ή περίθλαση κοντινού πεδίου**, στην οποία τόσο η πηγή όσο και το πέτασμα έχουν πεπερασμένες αποστάσεις από το εμπόδιο που σχηματίζει την εικόνα περίθλασης, δηλαδή διαπραγματεύεται τη γενικότερη περίπτωση των σφαιρικών κυμάτων. Στη συνέχεια θα μελετηθεί η απλούστερη περίπτωση, της περίθλασης από μια σχισμή επίπεδου μονοχρωματικού φωτός(περίθλαση Fraunhofer).



Σχήμα 4

Στο **Σχήμα 4** φαίνεται ένα επίπεδο κύμα που προσπίπτει κάθετα πάνω σε μακριά λεπτή σχισμή πλάτους α.
Παρατηρείται ότι όλες οι ακτίνες από τη σχισμή προς το κεντρικό σημείο P_o του πετάσματος έχουν το ίδιο οπτικό δρόμο (αφού θεωρείται πάρα πολύ μεγάλη η απόσταση πετάσματος – σχισμής).
Επομένως οι ακτίνες στο P_o θα είναι σε φάση και στο κεντρικό σημείο P_o του σχηματισμού που εμφανίζεται πάνω στο πέτασμα από περίθλαση παρουσιάζεται πάντα μέγιστο. Δηλαδή στο κέντρο του πετάσματος εμφανίζεται πάντα ένας φωτεινός κροσσός.
Για να υπολογιστεί η θέση P του πρώτου ελαχίστου, η σχισμή διαιρείται σε δυο ίσα τμήματα ΑΒ και ΒΓ. Έτσι σε κάθε ακτίνα που φεύγει από το τμήμα ΑΒ αντιστοιχεί και μια ακτίνα του τμήματος ΒΓ. Στο σχήμα φαίνονται δυο τέτοιες ακτίνες που ξεκινούν από τα σημεία Α και Β και η διαφορά δρόμου τους ως το σημείο P είναι (α/2)sinθ.
Αν η διαφορά δρόμου των ακτινών αυτών είναι λ/2 τότε αυτές θα συμβάλλουν αναιρετικά στο πέτασμα. Αντίστοιχα οποιαδήποτε άλλη ακτίνα από το τμήμα ΑΒ θα εξουδετερώνεται από μια αντίστοιχη ακτίνα του τμήματος ΒΓ.
Επομένως στο πέτασμα θα εμφανίζεται σκοτεινός κροσσός όταν:

$$\frac{\alpha}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \alpha\sin\theta = \lambda$$

Με τον ίδιο τρόπο διαιρώντας τη σχισμή σε τέταρτα, έκτα, όγδοα κ.ο.κ. και χρησιμοποιώντας την παραπάνω διαδικασία αποδεικνύεται ότι σκοτεινοί κροσσοί εμφανίζονται όταν $\alpha\sin\theta = 2\lambda, 3\lambda, 4\lambda, \ldots$
Άρα η συνθήκη για τα ελάχιστα της περιθλάσεως πάνω στο πέτασμα (σκοτεινοί κροσσοί) είναι:

$$\boxed{\alpha\sin\theta = m\lambda} \qquad m=1,2,3,\ldots \qquad \textbf{(14)}$$

Αν η απόσταση σχισμής πετάσματος είναι R και η κάθετη απόσταση της m-οστής σκοτεινής λωρίδας από το κέντρο του διαμορφώματος είναι y_m, τότε:

$$\tan\theta = y_m/R$$

Για μικρές γωνίες θ ισχύει η προσέγγιση $\tan\theta \cong \sin\theta$ οπότε με τη βοήθεια της **(14)** προκύπτει:

$$\sin\theta = \frac{y_m}{R} \Rightarrow \frac{m\lambda}{\alpha} = \frac{y_m}{R} \Rightarrow \boxed{y_m = R\frac{m\lambda}{\alpha}} \qquad m=1,2,\ldots. \qquad \textbf{(15)}$$

Παρατηρείται ότι η εξίσωση αυτή έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση της εικόνας συμβολής των δυο σχισμών **(6)**, με τη διαφορά ότι η **(15)** δίνει τις θέσεις των σκοτεινών κροσσών στην εικόνα περίθλασης μιας απλής σχισμής αντί των θέσεων των φωτεινών κροσσών στην εικόνα συμβολής δυο σχισμών που δίνει η **(6)**.

Παρατηρήσεις

1) Στο μισό περίπου της απόστασης μεταξύ δυο διαδοχικών ελαχίστων υπάρχει ένα μέγιστο, δηλαδή μεταξύ των σκοτεινών κροσσών εμφανίζονται οι φωτεινοί κροσσοί.

2) Η τιμή m=0 δεν υπάρχει στις **(14)**, **(15)** γιατί αντιστοιχεί στον φωτεινό κεντρικό κροσσό όπως αναφέρθηκε προηγούμενα.

3) Αν το πλάτος της σχισμής είναι ίσο με ένα μήκος κύματος, δηλαδή $\alpha = \lambda$, τότε σύμφωνα με την **(14)** ο πρώτος σκοτεινός κροσσός παρατηρείται για $\theta = 90^{o}$, που σημαίνει ότι ο κεντρικός φωτεινός κροσσός καλύπτει ολόκληρο το μπροστινό ημισφαίριο. Δηλαδή το κεντρικό μέγιστο γίνεται πλατύτερο , όσο η σχισμή γίνεται στενότερη.

4) Στην περίπτωση που το εμπόδιο είναι οπή (αντί για σχισμή) στο πέτασμα θα εμφανίζεται μια φωτεινή κεντρική κηλίδα, που περιβάλλεται από δακτυλίους εναλλάξ φωτεινούς και σκοτεινούς (αντί να είναι λωρίδες). Αν η διάμετρος της οπής είναι D και το μήκος κύματος λ αποδεικνύεται ότι το γωνιακό μέγεθος θ του πρώτου σκοτεινού δακτυλίου δίνεται από τη σχέση:

$$\sin\theta = 1{,}22\frac{\lambda}{D} \qquad \textbf{(16)}$$

Παράδειγμα

Σχισμή πλάτους α φωτίζεται με λευκό φως. Για ποια τιμή του α το δεύτερο ελάχιστο του ερυθρού φωτός (λ = 700nm) θα σχηματιστεί σε γωνία θ =30°;

Λύση

Το δεύτερο ελάχιστο, δηλαδή ο δεύτερος σκοτεινός κροσσός αντιστοιχεί στην τιμή m = 2 της σχέσης **(14)**. Οπότε αυτή δίνει:

$$\alpha\sin\theta = m\lambda \Rightarrow \alpha = \frac{m\lambda}{\sin\theta} = \frac{2\cdot 700\text{nm}}{\sin 30^{\circ}} = 4\cdot 700\text{nm} \Rightarrow \alpha = 4\lambda = 2800\text{nm}$$

Άρα το πλάτος της σχισμής πρέπει να είναι τετραπλάσιο του μήκους κύματος.

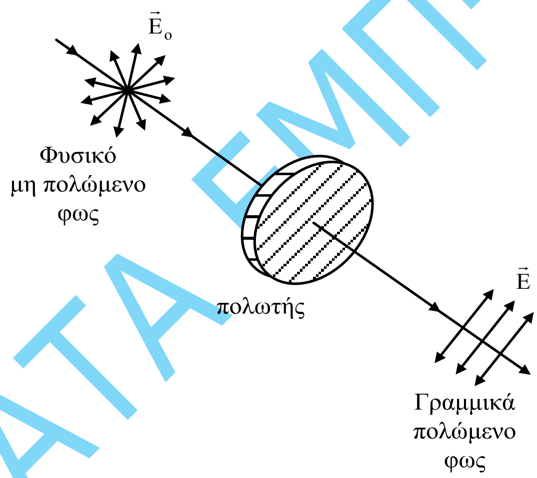
4. Πόλωση

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell προβλέπει ότι το φως, όπως ολόκληρη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, είναι **εγκάρσιο κύμα**, αφού οι διευθύνσεις των ταλαντούμενων διανυσμάτων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Τα εγκάρσια κύματα έχουν το επιπρόσθετο χαρακτηριστικό ότι είναι **γραμμικά πολωμένα**, που σημαίνει ότι τα διανύσματα του ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}$ είναι παράλληλα μεταξύ τους σε όλα τα σημεία του κύματος. Το ταλαντούμενο διάνυσμα $\vec{E}$ και η διεύθυνση διάδοσης σχηματίζουν ένα επίπεδο που ονομάζεται **επίπεδο ταλάντωσης** και σε ένα γραμμικά πολωμένο κύμα όλα αυτά τα επίπεδα είναι παράλληλα.

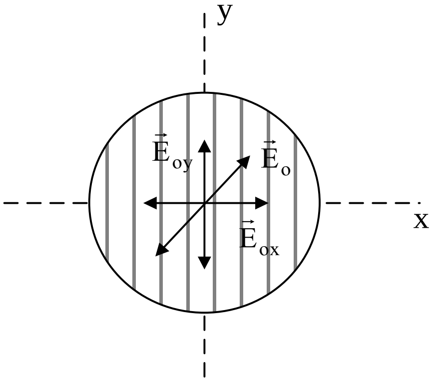
Το φως που παράγεται από πολλές πηγές, όπως από ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως ή από τον ήλιο, ονομάζεται **φυσικό φως** και είναι μη πολωμένο. Αυτό οφείλεται στο ότι κάθε ακτίνα φυσικού φωτός αποτελείται από μεγάλο αριθμό στοιχειωδών κυμάτων, καθένα από τα οποία έχει τυχαία προσανατολισμένο επίπεδο ταλάντωσης.

Το φυσικό φως (μη πολωμένο κύμα) μπορεί να πολωθεί με τη βοήθεια διαφορών μεθόδων, όπως με τα πολωτικά φίλτρα ή με ανάκλαση, που θα εξεταστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 5

Το **Σχήμα 5** δείχνει φυσικό (μη πολωμένο) φως που προσπίπτει σε φύλλο πολωτικού υλικού **(πολωτής)**, που στο εμπόριο λέγεται **Polaroid**. Στον πολωτή υπάρχει μια ορισμένη χαρακτηριστική διεύθυνση πολώσεως, που δείχνεται με τις παράλληλες γραμμές και καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Ο πολωτής θα επιτρέψει τη διέλευση μόνο εκείνων των κυματοσυρμών που τα ηλεκτρικά τους διανύσματα ταλαντώνονται παράλληλα προς αυτή τη διεύθυνση και θα απορροφήσει εκείνους που τα διανύσματά τους ταλαντώνονται κάθετα προς αυτή τη διεύθυνση. Έτσι το εξερχόμενο φως θα είναι γραμμικά πολωμένο.



Σχήμα 6

Το φυσικό φως όταν διέρχεται μέσα από ένα Polaroid, χάνει ένα σημαντικό ποσοστό από την έντασή του.
Στο **Σχήμα 6** ο πολωτής βρίσκεται στο επίπεδο της σελίδας και η διεύθυνση διαδόσεως του φυσικού φωτός είναι προς τη σελίδα. Το διάνυσμα $\vec{E}_o$ παριστά το επίπεδο ταλάντωσης ενός τυχαίου κυματοσυρμού που προσπίπτει πάνω στον πολωτή. Το κύμα αυτό μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώντα κύματα, ένα κάθετο προς το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης με πλάτος $E_{ox} = E_o \sin\theta$ και σε ένα παράλληλο προς αυτό με πλάτος $E_{oy} = E_o \cos\theta$. Από τον πολωτή θα διέλθει μόνο η παράλληλη συνιστώσα E_{oy} στο χαρακτηριστικό του επίπεδο , ενώ η άλλη θα απορροφηθεί μέσα στον πολωτή. Το αποτέλεσμα είναι το εξερχόμενο φως να είναι γραμμικά πολωμένο.
Η ένταση της ακτινοβολίας της δέσμης του φυσικού φωτός είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του κύματος και συγκεκριμένα είναι:

$$I_o = \frac{c}{4\pi} E_o^2 \qquad \textbf{(17)}$$

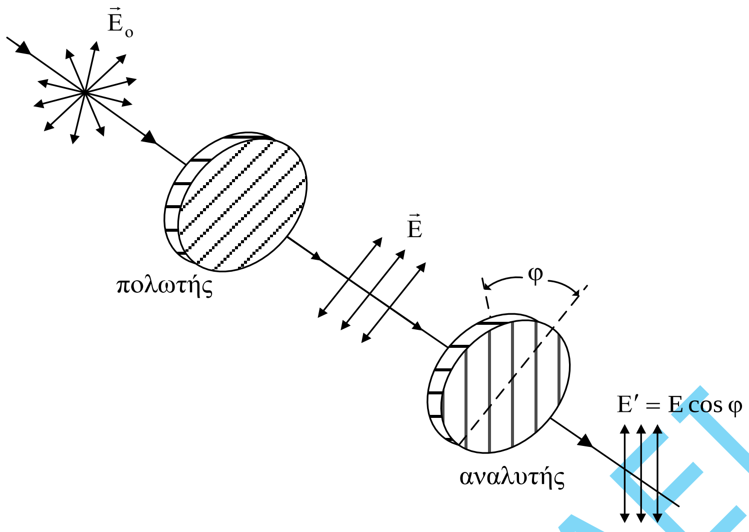
Στην αρχική δέσμη του φυσικού φωτός, λόγω της τυχαίας κατανομής των διευθύνσεων του $\vec{E}_o$, κατά μέσο όρο οι δυο συνιστώσες E_{ox} και E_{oy} θα είναι ίσες, άρα και οι εντάσεις ακτινοβολίας των δυο αυτών κυμάτων θα είναι ίσες. Δηλαδή:

$$I_{ox} = I_{oy} \qquad \textbf{(18)}$$

Συνεπώς κατά τη δίοδο του φωτός από τον πολωτή, διέρχονται μόνο οι παράλληλες συνιστώσες E_{oy} με αποτέλεσμα το εξερχόμενο φως να είναι γραμμικά πολωμένο και η έντασή του I να είναι ίση με το μισό της έντασης I_o της προσπίπτουσας δέσμης. Δηλαδή:

$$I = \frac{1}{2} I_o \qquad \textbf{(19)}$$

Από τη σχέση **(19)** προκύπτει ότι η ένταση I του εξερχόμενου φωτός είναι σταθερή και ανεξάρτητη της γωνίας θ. Δηλαδή κατά την πρόσπωση φυσικού φωτός σε πολωτή, δεν παρουσιάζονται μεταβολές στην ένταση του εξερχόμενου φωτός όταν στρέφεται ο πολωτής.
Έστω τώρα ότι το γραμμικά πολωμένο φως που εξέρχεται από τον πολωτή διέρχεται μέσω ενός δεύτερου πολωτή, που στην περίπτωση αυτή ονομάζεται **αναλυτής**.



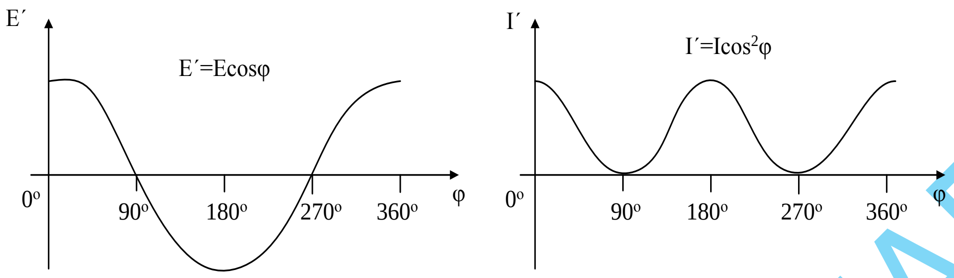
Σχήμα 7

Η γωνία μεταξύ των αξόνων πόλωσης του πολωτή και του αναλυτή είναι φ.
Είναι προφανές ότι αν Ε είναι το πλάτος του προσπίπτοντος γραμμικά πολωμένου φωτός πάνω στον αναλυτή τότε το πλάτος του εξερχόμενου φωτός από τον αναλυτή είναι Ecosφ. Δηλαδή από τον αναλυτή διέρχεται πάλι μόνο η παράλληλη συνιστώσα προς τον άξονα πόλωσής του, ενώ η κάθετη συνιστώσα απορροφάται.
Επειδή σύμφωνα με την **(17)** η ένταση ακτινοβολίας είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτους του κύματος ($I \sim E^2$), αν Ι είναι η ένταση της ακτινοβολίας της αρχικά πολωμένης δέσμης τότε η ένταση της ακτινοβολίας Ι΄ μετά τη διέλευση από τον αναλυτή είναι:

$$E' = E\cos\varphi \Rightarrow E'^2 = E^2\cos^2\varphi \Rightarrow \frac{c}{4\pi}E'^2 = \frac{c}{4\pi}E^2\cos^2\varphi \Rightarrow$$

$$\boxed{\Rightarrow I' = I\cos^2\varphi} \qquad \textbf{(20)}$$

Η σχέση **(20)** ονομάζεται **νόμος του Malus**.
Παρατηρείται ότι όταν οι διευθύνσεις πολώσεως πολωτή και αναλυτή είναι παράλληλες, δηλαδή όταν $\varphi = 0$ ή 180^o, η διερχόμενη ένταση Ι΄ είναι μέγιστη ($I'_{max} = I$), ενώ όταν οι διευθύνσεις πόλωσης είναι κάθετες , δηλαδή όταν $\varphi = 90^o$ ή 270^o, η διερχόμενη ένταση Ι΄ είναι ελάχιστη ($I'_{min} = 0$).
Επομένως στρέφοντας τον αναλυτή, η διερχόμενη ένταση Ι΄ μεταβάλλεται περιοδικά με τη γωνία φ και μηδενίζεται δυο φορές ανά κάθε περιστροφή. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται τα γραφήματα της μεταβολής του πλάτους Ε΄ και της έντασης ακτινοβολίας Ι΄ της εξερχόμενης δέσμης κατά τη στροφή του αναλυτή κατά μια πλήρη περιστροφή.



Σχήμα 8

Παράδειγμα

Δυο πολωτικά φύλλα τοποθετούνται έτσι ώστε η γωνία μεταξύ των αξόνων πόλωσής τους να είναι 30^o. Το προσπίπτον σε αυτά φυσικό μη πολωμένο φως έχει ένταση I_o.

α) Να υπολογιστεί η ένταση του φωτός που διέρχεται από των πρώτο πολωτή καθώς και η ένταση του φωτός από το δεύτερο πολωτή.

β) Κατά πόση γωνία πρέπει να είναι στραμμένα τα φύλλα μεταξύ τους ώστε η ένταση που διέρχεται από το δεύτερο πολωτή να είναι το μισό της έντασης που διέρχεται από τον πρώτο πολωτή;

Λύση

α) Όπως εξηγήθηκε στα προηγούμενα η ένταση ακτινοβολίας που διέρχεται από τον πρώτο πολωτή, ανεξάρτητα του προσανατολισμού του είναι το μισό της έντασης I_o του προσπίπτοντος φυσικού φωτός. Δηλαδή:

$$I = \frac{I_o}{2}$$

Σύμφωνα με το νόμο του Malus η ένταση του φωτός που διέρχεται από το δεύτερο πολωτή είναι :

$$I' = I\cos^2\varphi = \frac{I_o}{2}\cos^2 30^o = \frac{I_o}{2}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 = \frac{I_o}{2}\frac{3}{4} \Rightarrow I' = \frac{3}{8}I_o$$

β) Για να είναι η ένταση που διέρχεται από το δεύτερο πολωτή η μισή αυτής που διέρχεται από τον πρώτο πολωτή, δηλαδή για $I' = I/2$ θα πρέπει σύμφωνα με το νόμο του Malus να ισχύει:

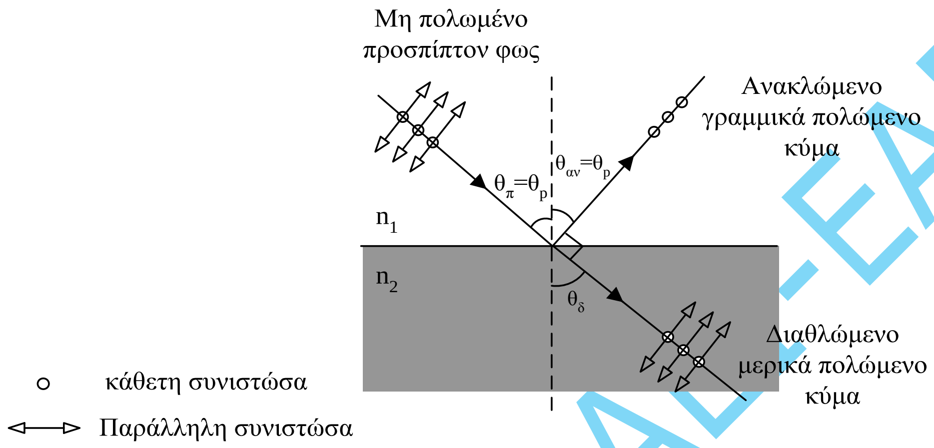
$$I' = I\cos^2\theta \Rightarrow \frac{I}{2} = I\cos^2\theta \Rightarrow \cos^2\theta = \frac{1}{2} \Rightarrow \cos\theta = \pm\frac{1}{\sqrt{2}} = \pm\frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta = \cos^{-1}\left(\pm\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \Rightarrow \theta = \pm 45^o,\ \pm 135^o$$

Σημειώνεται ότι ανεξάρτητα από το ποιος πολωτής στρέφεται ή κατά ποια διεύθυνση λαμβάνεται το ίδιο αποτέλεσμα.

5. Πόλωση από Ανάκλαση

Το φως μπορεί να υποστεί γραμμική πόλωση μέσω της ανάκλασής του.



Σχήμα 9

Το **Σχήμα 9** δείχνει μια μη πολωμένη δέσμη φυσικού φωτός, η οποία προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δυο οπτικών υλικών με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2. Το διάνυσμα $\vec{E}$ του κάθε κυματοσυρμού της δέσμης μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες , μια κάθετη πάνω στο επίπεδο πρόσπτωσης (κάθετη συνιστώσα) και μια κείμενη στο επίπεδο αυτό (παράλληλη συνιστώσα).Σημειώνεται ότι στο φυσικό φως, κατά μέσο όρο, οι δυο αυτές συνιστώσες είναι ίσου πλάτους.

Πειραματικά αποδεικνύεται ότι για μια συγκεκριμένη τιμή της γωνίας πρόσπτωσης, που λέγεται **γωνία πόλωσης θ_p**, η ανακλώμενη δέσμη είναι γραμμικά πολωμένη με το επίπεδο ταλάντωσης της κάθετο στο επίπεδο πρόσπτωσης, ενώ η διαθλώμενη δέσμη είναι μόνο μερικά πολωμένη. Η γραμμική πόλωση της ανακλώμενης δέσμης μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί με ανάλυση αυτής με ένα πολωτικό φύλλο.

Πειραματικά βρίσκεται ότι όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία πόλωσης θ_p τότε η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα. Στην περίπτωση αυτή, όπως προκύπτει εύκολα από το σχήμα, η γωνία διάθλασης θ_δ είναι η συμπληρωματική της γωνίας πόλωσης θ_p και επομένως ισχύει :

$$\theta_p + \theta_\delta = 90^o \Rightarrow \theta_\delta = 90^o - \theta_p \qquad \textbf{(21)}$$

Επίσης από το νόμο της διάθλασης του Snell προκύπτει:

$$n_1 \sin\theta_p = n_2 \sin\theta_\delta$$

Αλλά λόγω της **(21)** είναι: $\sin\theta_\delta = \sin(90^\circ - \theta_p) = \cos\theta_p$

Άρα προκύπτει:

$$n_1 \sin\theta_p = n_2 \cos\theta_p \Rightarrow \frac{\sin\theta_p}{\cos\theta_p} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \boxed{\tan\theta_p = \frac{n_2}{n_1}} \qquad \textbf{(22)}$$

Η σχέση **(22)** αποτελεί το **νόμο του Brewster**.
Παρατηρείται ότι επειδή η γωνία πόλωσης θ_p εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης, ο οποίος μεταβάλλεται με το μήκος κύματος, συνεπάγεται ότι κατά την πρόσπωση λευκού φωτός, η πόλωση πετυχαίνεται κάθε φορά για ένα μόνο μήκος κύματος.

✍ Παράδειγμα

Γυάλινη πλάκα δείκτη διάθλασης n_2 =1,50 χρησιμοποιείται ως πολωτής. Να υπολογιστεί η γωνία πόλωσης και η γωνία διάθλασης αν η πλάκα:
α) βρίσκεται στον αέρα (n_1=1) και **β)** είναι βυθισμένη σε νερό (n_1= 1,33).

Λύση

α) Από το νόμο του Brewster **(22)** είναι:

$$\tan\theta_p = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1{,}50}{1} = 1{,}5 \Rightarrow \theta_p = \tan^{-1}1{,}5 \Rightarrow \theta_p = 56{,}3^o$$

Η γωνία διάθλασης από την **(21)** είναι:

$$\theta_\delta = 90^o - \theta_p = 90^o - 56{,}3^o \Rightarrow \theta_\delta = 33{,}7^o$$

β) Αντίστοιχα με τα προηγούμενα προκύπτουν:

$$\tan\theta_p = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1{,}50}{1{,}33} = 1{,}33 \Rightarrow \theta_p = \tan^{-1}1{,}13 \Rightarrow \theta_p = 48{,}5^o$$

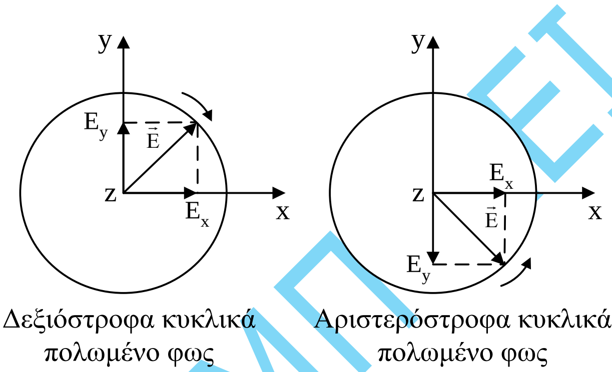
και $$\theta_\delta = 90^o - \theta_p = 90^o - 48{,}5^o \Rightarrow \theta_\delta = 41{,}5^o$$

6. Κυκλική – Ελλειπτική Πόλωση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα το γραμμικά πολωμένο φως έχει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου $\vec{E}$ να κείται σε μια σταθερή διεύθυνση. Έστω τώρα ένα φωτεινό κύμα που αποτελείται από δύο επίπεδα γραμμικά πολωμένα κύματα, έστω κατά μήκος των διευθύνσεων x και y, και διαφέρουν ως προς τη φάση κατά φ. Τα ηλεκτρικά πεδία των δύο αυτών κυμάτων είναι:

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \quad \text{και} \quad E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

όπου A_x, A_y είναι τα πλάτη των ηλεκτρικών πεδίων.



Σχήμα 10

Γενικά τα δύο αυτά κύματα υπερτίθενται, σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας και αν έχουν ίσα πλάτη $(A_x = A_y)$ και η διαφορά φάσης τους είναι $\varphi = \pm\pi/2$ τότε το αποτέλεσμα είναι ένα **κυκλικά πολωμένο κύμα** γιατί σε κάθε επίπεδο κάθετο άξονα z η άκρη του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει ένα κύκλο σε κάθε περίοδο του κύματος. Συγκεκριμένα αν $\varphi = +\pi/2$ τότε η E_y προηγείται της E_x κατά π/2 ,το διάνυσμα $\vec{E}$ περιστρέφεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού και προκύπτει **δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένο φως**, ενώ αν $\varphi = -\pi/2$ τότε η E_y έπεται της E_x κατά π/2 κι επομένως το $\vec{E}$ διαγράφει κύκλο αντίθετα της φοράς των δεικτών του ρολογιού και προκύπτει **αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένο φως**.

Μελετώντας τη χωρική μεταβολή του πεδίου $\vec{E}$ (για όλα τα z) σε μια ορισμένη χρονική στιγμή t παρατηρείται ότι το ηλεκτρικό πεδίο θα έχει σταθερό μεν πλάτος για κάθε z, αλλά η διεύθυνση του διανύσματος $\vec{E}$ να σχηματίζει μια έλικα, η οποία θα περιστρέφεται δεξιόστροφα από τον άξονα z όταν $\varphi = +\pi/2$ (για δεξιόστροφα κυκλικά πολωμένο φως),ενώ θα περιστρέφεται αριστερόστροφα όταν φ= –π/2 (για αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένο φως).

Στην περίπτωση που η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο προηγούμενων συνιστωσών κυμάτων είναι σταθερή αλλά διαφορετική από $\pm\pi/2$ ή αν τα δύο συνιστώντα κύματα έχουν διαφορετικά πλάτη $(A_x \neq A_y)$ τότε η υπέρθεσή τους δίνει το διάνυσμα $\vec{E}$ να διαγράφει, αντί της περιφέρειας κύκλου, μια έλλειψη και το αποτέλεσμα ονομάζεται **ελλειπτικά πολωμένο φως**.

Παρατηρήσεις

1) Σύμφωνα με τα προηγούμενα η κυκλική ή ελλειπτική πόλωση θα ονομάζεται δεξιόστροφη (ή αριστερόστροφη) όταν ένας παρατηρητής βλέποντας προς τη φωτεινή πηγή διαπιστώνει ότι το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου στρέφεται σύμφωνα (ή αντίθετα) με τη φορά των δεικτών του ρολογιού.

2) Γενικά η επαλληλία δύο κυμάτων κάθετων μεταξύ τους, που έχουν ίδια συχνότητα και διαφορά φάσης φ δίνει:

α) φυσικό φως, αν η φ υφίσταται τυχαίες μεταβολές (ασύμφωνα κύματα)

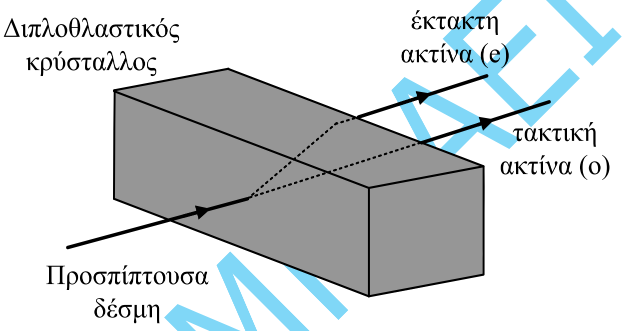
β) γραμμικά πολωμένο φως, αν φ=0 ή φ=π.

γ) κυκλικά πολωμένο φως, αν $\varphi = \pm\pi/2$ και τα πλάτη του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίσα

δ) ελλειπτικά πολωμένο φως, αν η φ είναι σταθερή αλλά με τιμή διαφορετική από $\pm\pi/2$ αν τα πλάτη του ηλεκτρικού πεδίου είναι άνισα.

7. Διπλοθλαστικότητα

Μέχρι τώρα θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα του φωτός, επομένως και ο δείκτης διάθλασης, είναι ανεξάρτητα της διεύθυνσης διάδοσης μέσα στο μέσο και της πόλωσης του φωτός. Τα υγρά, τα άμορφα στερεά (όπως το γυαλί και τα κρυσταλλικά στερεά με κυβική συμμετρία) παρουσιάζουν κανονικά αυτή τη συμπεριφορά και λέγονται **οπτικά ισότροπα**. Υπάρχουν όμως και πολλά άλλα κρυσταλλικά στερεά που είναι **οπτικά ανισότροπα ή διπλοθλαστικά**, πράγμα που σημαίνει ότι ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται με την διεύθυνση ανάμεσα σε δύο ακραίες τιμές.
Στη συνέχεια εξετάζεται η συμπεριφορά ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος όταν διαδίδεται ή διαθλάται σε ένα ανισότροπο μέσο.



Σχήμα 11

Το **Σχήμα 11** δείχνει μια δέσμη μη πολωμένου φωτός που προσπίπτει σε διπλοθλαστικό κρύσταλλο (π.χ. ασβεστίτης $CaCO_3$) κάθετα προς μια από τις έδρες του. Παρατηρείται ότι η προσπίπτουσα δέσμη διαχωρίζεται σε δύο στην επιφάνεια του κρυστάλλου και έτσι η διπλή πορεία της διερχόμενης δέσμης, που φαίνεται στο σχήμα, λέγεται **διπλοθλαστικότητα ή διπλή διάθλαση**. Για το λόγο αυτό τα υλικά που παρουσιάζουν το φαινόμενο αυτό καλούνται διπλοθλαστικά.
Αν οι δύο εξερχόμενες δέσμες εξεταστούν με πολωτικό φύλλο, προκύπτει ότι είναι γραμμικά πολωμένες με τα επίπεδα ταλάντωσής τους κάθετα μεταξύ τους. Αν γίνουν πειράματα για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης βρίσκεται ότι η μια από αυτές τις δέσμες, που λέγεται **τακτική ακτίνα ή ακτίνα ο** (από το ordinary), υπακούει στο νόμο του Snell ακριβώς όπως μια ακτίνα σε ισότροπο μέσο. Η δεύτερη δέσμη, που λέγεται **έκτακτη ακτίνα ή ακτίνα e** (από το extraordinary), δεν υπακούει στο νόμο του Snell.
Για παράδειγμα στο **Σχήμα 11** η γωνία πρόσπτωσης του φωτός είναι μηδέν, αλλά η γωνία διάθλασης της ακτίνας e δεν είναι μηδέν, όπως προβλέπεται από το νόμο του Snell. Μετά την έξοδό τους από τον κρύσταλλο οι δύο ακτίνες είναι παράλληλες. Η μελέτη του φαινομένου δείχνει ότι η ταχύτητα διάδοσης μιας φωτεινής δέσμης μέσα σε διπλοθλαστικό κρύσταλλο, εξαρτάται από την κρυσταλλογραφική του διεύθυνση και από το επίπεδο ταλάντωσης του κύματος.

Η τακτική ακτίνα ο έχει σε όλες τις διευθύνσεις μέσα στον κρύσταλλο την ίδια ταχύτητα υ_o.Δηλαδή ο κρύσταλλος έχει, γι' αυτό το κύμα, ένα μόνο δείκτη διάθλασης n_o, όπως ακριβώς σε ένα ισότροπο μέσο.
Η έκτακτη ακτίνα e έχει μέσα στον κρύσταλλο ταχύτητα που μεταβάλλεται από υ_o μέχρι μια μέγιστη τιμή υ_e. Δηλαδή ο δείκτης διάθλασης (που ορίζεται ως c/υ) μεταβάλλεται με τη διεύθυνση από n_o μέχρι μια μικρότερη τιμή n_e. Οι ποσότητες n_o και n_e λέγονται **κύριοι δείκτες διάθλασης** του κρυστάλλου. Σημειώνεται ότι υπάρχει και μια χαρακτηριστική διεύθυνση κατά την οποία η τακτική και η έκτακτη ακτίνα διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα χωρίς να διαχωριστούν και ονομάζεται **οπτικός άξονας**.
Η διπλοθλαστικότητα αποτελεί μια σημαντική μέθοδο έρευνας που εφαρμόζεται στη μελέτη της κρυσταλλικής δομής.

8. Πλακίδια Καθυστέρησης Φάσης

Έστω ένας διπλοθλαστικός κρύσταλλος, που είναι κομμένος έτσι ώστε η επιφάνειά του να περιέχει τον οπτικό άξονα, πάνω στον οποίο προσπίπτει γραμμικά πολωμένο φως. Σύμφωνα με τα προηγούμενα, τα δύο εξερχόμενα κύματα θα είναι γραμμικά πολωμένα με τα επίπεδα ταλάντωσής τους κάθετα μεταξύ τους και η ταχύτητα διάδοσής τους μέσα στον κρύσταλλο θα εξαρτάται από τον προσανατολισμό του επίπεδου ταλάντωσης του κύματος. Αν συγκριθούν οι ακτίνες με επίπεδο ταλάντωσης παράλληλο ή κάθετο στον οπτικό άξονα, οι οπτικοί τους δρόμοι θα διαφέρουν λόγω των διαφορετικών δεικτών διάθλασης n_o και n_e.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι δυο τέτοιες ακτίνες που προσπίπτουν στο πλακίδιο με την ίδια φάση θα εξέρχονται με διαφορά φάσης.

Έτσι επειδή η φάση του ενός κύματος καθυστερεί ως προς τη φάση του άλλου, το πλακίδιο αυτό λέγεται **πλακίδιο καθυστέρησης φάσης**.

Εάν το πάχος του πλακιδίου d εκλεγεί τέτοιο ώστε η διαφορά των οπτικών δρόμων τακτικής και έκτακτης ακτίνας να είναι ίση με λ/4, δηλαδή να ισχύει:

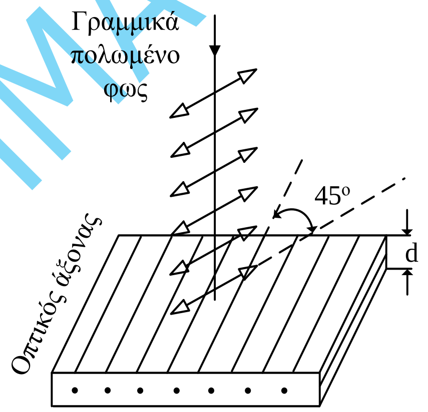
$$(n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4} \qquad \textbf{(23)}$$

τότε η διαφορά φάσης θα είναι 90^o και το πλακίδιο λέγεται **πλακίδιο λ/4**.

Ενώ αν ισχύει η σχέση:

$$(n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{2} \qquad \textbf{(24)}$$

τότε η διαφορά φάσης της τακτικής και έκτακτης ακτίνας θα είναι 180^o και το πλακίδιο λέγεται **πλακίδιο λ/2**.



Σχήμα 12

Η παραγωγή κυκλικά πολωμένου φωτός επιτυγχάνεται με την πρόσπτωση γραμμικά πολωμένου φωτός σε πλακίδιο λ/4 και μάλιστα έτσι ώστε το επίπεδο πόλωσής του να σχηματίζει γωνία 45^o με τον οπτικό άξονα του πλακιδίου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 12**.

Στην έξοδο τότε του πλακιδίου προκύπτουν δύο κύματα κάθετα μεταξύ τους με διαφορά φάσης 90^o και ίσα πλάτη. Επομένως το εξερχόμενο φως θα είναι **κυκλικά πολωμένο φως**.

Παρατηρήσεις

1) Στην περίπτωση που το φως που προσπίπτει πάνω στο πλακίδιο λ/4 δεν είναι γραμμικά πολωμένο αλλά είναι φυσικό, τότε τα δύο εξερχόμενα κάθετα κύματα δεν έχουν σταθερή διαφορά φάσης, δηλαδή είναι ασύμφωνα και δεν μπορούν να συμβάλλουν.

2) Αν κυκλικά πολωμένο φως προσπέσει σε πλακίδιο λ/4 τότε αυτό μετατρέπεται σε γραμμικά πολωμένο, πράγμα που διαπιστώνεται στη συνέχεια με έναν αναλυτή. Η μετατροπή αυτή του κυκλικά πολωμένου φωτός σε γραμμικά πολωμένο εξηγείται ως εξής:
Το κυκλικά πολωμένο φως ως γνωστό, αποτελείται από δυο κάθετες ταλαντώσεις με διαφορά φάσης 90^o. Λόγω του πλακιδίου λ/4 θα παρουσιαστεί μια πρόσθετη διαφορά φάσης $\pm 90^o$, δηλαδή συνολικά η διαφορά φάσης των δύο εξερχόμενων ταλαντώσεων θα είναι 180^o ή 0^o.
Άρα το εξερχόμενο φως θα είναι γραμμικά πολωμένο.

3) Όπως αναφέρθηκε πριν για την παραγωγή κυκλικά πολωμένου φωτός πρέπει το πλακίδιο να είναι λ/4 και η γωνία του επίπεδου ταλάντωσης του γραμμικά πολωμένου προσπίπτοντος φωτός με τον οπτικό άξονα του κρυστάλλου να είναι 45^o.
Αν όμως μια από αυτές τις προϋποθέσεις δεν ισχύει τότε προκύπτει **ελλειπτικά πολωμένο φως**.
Συγκεκριμένα αν αντί για πλακίδιο λ/4 χρησιμοποιηθεί άλλο με τυχαία διαφορά δρόμου, τότε τα δύο κύματα έχουν βέβαια ίσα πλάτη αλλά η διαφορά φάσης δεν είναι 90^o αλλά άλλη τυχαία και επομένως η εξερχόμενη συνισταμένη ταλάντωση είναι έλλειψη. Επίσης αν η γωνία που σχηματίζει το επίπεδο πόλωσης με τον οπτικό άξονα δεν είναι 45^o τότε τα πλάτη είναι άνισα και επειδή η διαφορά φάσης είναι 90^o, η συνισταμένη ταλάντωση είναι έλλειψη.

Εφαρμογή

Υπολογίστε το ελάχιστο πάχος ενός πλακιδίου $\lambda/4$ από ασβεστίτη, αν οι δείκτες διάθλασης του είναι 1,658 και 1,486, ενώ το μήκος κύματος του φωτός για το οποίο σχεδιάζεται το πλακίδιο είναι λ=520nm.

Λύση

Μέσα στο πλακίδιο διαδίδονται δυο κύματα με ταχύτητες που αντιστοιχούν στους δύο κύριους δείκτες διάθλασης $n_o = 1{,}658$ και $n_e = 1{,}486$. Το ελάχιστο πάχος του πλακιδίου d πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να ισχύει η **(23)**. Δηλαδή :

$$(n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4} \Rightarrow d = \frac{\lambda}{4(n_o - n_e)} = \frac{520\text{nm}}{0{,}688} \Rightarrow \delta = 755\text{nm} \quad \text{ή} \quad 0{,}755\,\mu\text{m}$$