

Διάθλαση μέσω πρίσματος – Φασματοσκοπικά χαρακτηριστικά πρίσματος



**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα**

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας



---

## Επιστημονική Φωτογραφία (Ε)

**Ενότητα 4:** Πόλωση από γραμμικό, πολωτικό φίλτρο - Νόμος Malus

Αθανάσιος Αραβαντινός

Τμήμα Φωτογραφίας & Οπτικοακουστικών Τεχνών

---



Το περιεχόμενο του μαθήματος διατίθεται με άδεια Creative Commons εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά



Ευρωπαϊκή Ένωση

Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



## 1. Σκοπός

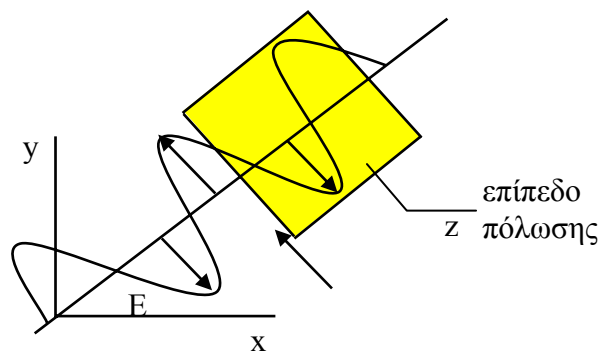
Στην άσκηση αυτή θα επιβεβαιώσουμε πειραματικά την προβλεπόμενη σχέση ανάμεσα στη διεύθυνση πόλωσης του φωτός και της έντασής του, καθώς αυτό διέρχεται από ένα δεύτερο πολωτή.

## 2. Θεωρία

### 2.1 Γενικά

Η κλασική κυματική θεωρία του φωτός μοντελοποιεί το φως ως ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που σημαίνει ότι η διεύθυνση ταλάντωσής του είναι πάντα κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος του φωτός. Πιο αναλυτικά, κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, το ηλεκτρικό και μαγνητικό του πεδίο είναι κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Αν θεωρήσουμε τον άξονα  $z$  ως άξονα κατά τη διεύθυνση του οποίου διαδίδεται το κύμα, τότε το ηλεκτρικό του πεδίο μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε διεύθυνση επάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο προς τον άξονα  $z$ .

Ο όρος **πόλωση** ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος περιγράφει τη συμπεριφορά του ανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος, καθώς αυτό διαδίδεται σ' ένα μέσο. Αν η ταλάντωση του ηλεκτρικού πεδίου διαμορφώνεται προς μια αυστηρά ορισμένη



Σχήμα 1. Σε ένα γραμμικά πολωμένο κύμα οι ταλαντώσεις του ηλεκτρικού του πεδίου ορίζονται κατά μήκος μιας γραμμής κάθετης προς τη διεύθυνση διάδοσης  $z$ .

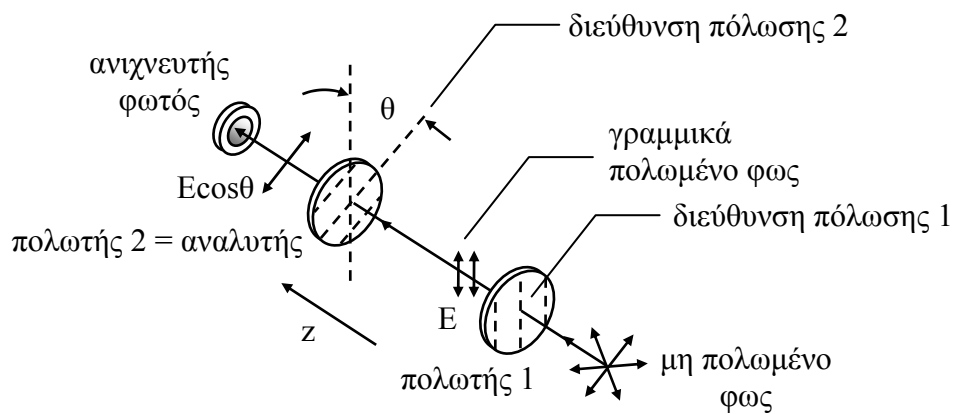
διεύθυνση, τότε θεωρούμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι **γραμμικά πολωμένο** (Σχήμα 1). Οι ταλαντώσεις του πεδίου και η διεύθυνση διάδοσης  $z$ , ορίζουν το επίπεδο πόλωσης, έτσι που ένα γραμμικά πολωμένο κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδα πολωμένο. Αντίθετα, αν τα ηλεκτρικά πεδία των κυμάτων μιας δέσμης φωτός ακολουθούν τυχαίες διευθύνσεις, πάντα όμως κάθετες προς τον άξονα  $z$ , τότε η δέσμη φωτός θεωρείται μη πολωμένη.



Μια δέσμη φωτός μπορεί να πολωθεί γραμμικά, αν περάσει δια μέσου ενός πολωτή, όπως είναι για παράδειγμα ένα φύλλο πολαροϊντ. Αυτό είναι μια διάταξη που επιτρέπει τη διέλευση εκείνων των ταλαντώσεων του ηλεκτρικού πεδίου που βρίσκονται επάνω σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση διάδοσης.

## 2.2 Ο νόμος του Malus

Υπάρχουν αρκετές οπτικές διατάξεις που λειτουργούν ανάλογα με την κατάσταση πόλωσης του οπτικού κύματος που διέρχεται δια μέσω αυτών διατάξεων. Ένας γραμμικός πολωτής θα επιτρέψει τη διέλευση των ταλαντώσεων του ηλεκτρικού πεδίου προς συγκεκριμένη μόνο διεύθυνση που καλείται διεύθυνση πόλωσης (Σχήμα 2). Η



Σχήμα 2. Τυχαία πολωμένο φως προσπίπτει στον πολωτή 1 που έχει διεύθυνση πόλωσης 1. Το φως που εξέρχεται από τον πολωτή 1 είναι γραμμικά πολωμένο, με το άνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  παράλληλο προς τη διεύθυνση πόλωσης 1. Στη συνέχεια προσπίπτει στον πολωτή 2 (καλείται αναλυτής) του οποίου η διεύθυνση πόλωσης (διεύθυνση πόλωσης 2) σχηματίζει γωνία  $\theta$  με τη διεύθυνση πόλωσης 1. Ένας φωτοανιχνευτής μετρά την ένταση του φωτός που εξέρχεται από τη διάταξη.

εξερχόμενη δέσμη από τον πολωτή έχει το ηλεκτρικό πεδίο να ταλαντώνεται παράλληλα προς τη διεύθυνση πόλωσης του πολωτή και επομένως είναι γραμμικά πολωμένη.

Αν θεωρήσουμε ότι το γραμμικά πολωμένο φως από τον πολωτή προσπίπτει σ' ένα δεύτερο, ίδιο με τον πρώτο, πολωτή τότε στρέφοντας τη διεύθυνση πόλωσης του δεύτερου πολωτή μπορούμε να αναλύσουμε την κατάσταση πόλωσης της προσπίπτουσας δέσμης. Για το λόγο αυτό ο δεύτερος πολωτής καλείται αναλυτής.

Αν η διεύθυνση πόλωσης του αναλυτή σχηματίζει γωνία  $\theta$  με το άνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου της προσπίπτουσας δέσμης (δηλαδή με τη διεύθυνση πόλωσης του πολωτή) τότε μόνο η ποσότητα  $E \cos \theta$  του πεδίου θα διέλθει από τον αναλυτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Η ένταση του φωτός που θα περάσει από τον αναλυτή είναι ανά-



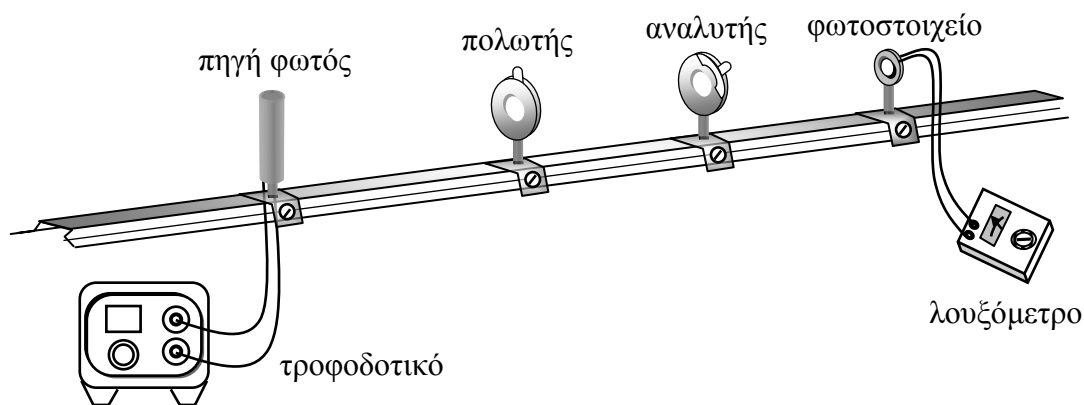
λογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου, πράγμα που σημαίνει ότι η ένταση που καταγράφεται στον φωτοανιχνευτή μεταβάλλεται ως  $(E \cos\theta)^2$ . Η μέγιστη ένταση  $I_{\max}$  θα καταγραφεί στην περίπτωση που η γωνία  $\theta = 0$  ( $E //$  προς τη διεύθυνση πόλωσης). Για κάθε άλλη γωνία η ένταση δίνεται από το **νόμο του Malus**:

$$I(\theta) = I_{\max} \cos^2\theta \quad (\text{νόμος του Malus}) \quad (1)$$

Επομένως ο νόμος του Malus συνδέει την ένταση του γραμμικά πολωμένου φωτός που περνάει από ένα πολωτή με τη γωνία που σχηματίζεται από τη διεύθυνση πόλωσης και το άνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου.

### 3. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη (Σχήμα 3) αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

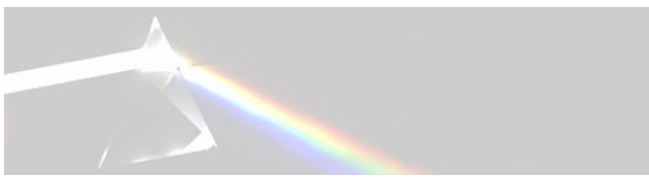


Σχήμα 3. Πειραματική διάταξη

- Λαμπτήρας πυράκτωσης
- Τροφοδοτικό λαμπτήρα (0 – 25 V DC)
- Οπτική τράπεζα
- Πολωτικά φίλτρα
- Λουξόμετρο

Στο πείραμα αυτό θα δούμε πως διαμορφώνεται η ένταση του φωτός σε σχέση με την κατάσταση πόλωσής του. Προς τούτο, στην πορεία μιας φωτεινής δέσμης θα παρεμβάλλουμε δυο πολωτικά φίλτρα (πολωτή – αναλυτή) και μεταβάλλοντας τη γωνία που σχηματίζουν οι διευθύνσεις πόλωσης των δυο πολωτών θα ελέγχουμε μέσω ενός φωτοστοιχείου την ένταση της εξερχόμενης από το σύστημα δέσμης. Παράλληλα θα επιχειρήσουμε την επιβεβαίωση του νόμου του Malus, συγκρίνοντας τις πειραματικές πληροφορίες με τις θεωρητικές τιμές που διαμορφώνονται από τη Σχέση 1.

Κατά τη διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι η εξερχόμενη από το σύστημα δέσμη φωτίζει επαρκώς την επιφάνεια του φωτοστοιχείου. Επίσης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας την ένταση του φωτισμού από τον περιβάλλοντα χώρο και να τον αφαιρέσουμε από τους υπολογισμούς μας.



#### 4. Εργασίες

1. Αναγνωρίζουμε τα στοιχεία της διάταξης και τα τοποθετούμε στην οπτική τράπεζα με τη σειρά που εμφανίζονται στο Σχήμα 3.
2. Θέτουμε σε λειτουργία το λαμπτήρα και στρέφουμε τον πρώτο πολωτή στην ένδειξη μηδέν. Μετράμε με το λουξόμετρο πίσω από τον πολωτή. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της έντασης του φωτός πριν αυτό προσπέσει στον αναλυτή. Καταχωρούμε την τιμή αυτή στον Πίνακα 1 ως  $I_{\max}$ .
3. Μεταβάλλουμε τη γωνία του αναλυτή (δεύτερος πολωτής) ανά  $10^\circ$  σε διάστημα  $\pm 90^\circ$ , ενώ διατηρούμε τον πολωτή στις  $0^\circ$  και καταγράφουμε κάθε φορά τις ενδείξεις του λουξόμετρου. Καταχωρούμε τις τιμές στον Πίνακα 1 ως  $I_{\text{πειρ}}$ .
4. Υπολογίζουμε για κάθε γωνία  $\theta$  τη θεωρητική τιμή της έντασης  $I_{\text{θεωρ}}$  από τον τύπο του Malus  $I_{\text{θεωρ}} = I_{\max} \cos^2 \theta$  και καταχωρούμε τις τιμές στον Πίνακα 1.
5. Σχεδιάζουμε σε χαρτί μιλιμετρέ το διάγραμμα  $I_{\text{πειρ}} = f(\theta)$ . Στο ίδιο γράφημα σχεδιάζουμε και το  $I_{\text{θεωρ}} = f(\theta)$  φροντίζοντας ώστε τα σημεία των δυο χαρακτηριστικών να σημειώνονται με διαφορετικά σύμβολα.
6. Σχολιάζουμε το αποτέλεσμα. Για ποιες γωνίες  $\theta$  (<5% διαφορά) οι πειραματικές τιμές συμφωνούν με τις θεωρητικές;
7. Σχεδιάζουμε επίσης το διάγραμμα  $I_{\text{πειρ}} = f(\cos^2 \theta)$  και βάσει αυτού χαρακτηρίζουμε το φωτοστοιχείο ως προς τη γραμμικότητά του.



**Πίνακας 1**

$I_{\max} = \dots\dots\dots$					
A/A	$\theta^\circ$	$I_{\text{πειρ}}$	$I_{\text{θεορ}} = I_{\max} \cos^2\theta$	$\cos\theta$	$\cos^2\theta$
1	90				
2	80				
3	70				
4	60				
5	50				
6	40				
7	30				
8	20				
9	10				
10	0				
11	-10				
12	-20				
13	-30				
14	-40				
15	-50				
16	-60				
17	-70				
18	-80				
19	-90				

# Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

## Τέλος Ενότητας

### Χρηματοδότηση

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



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



## Σημειώματα

### Σημείωμα Αναφοράς

Copyright ΤΕΙ Αθήνας, Γεώργιος Μήτσου, 2014. Γεώργιος Μήτσου. «Επιστημονική Φωτογραφία (Ε). Ενότητα 4: Πόλωση από γραμμικό, πολωτικό φίλτρο - Νόμος Malus». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [ocp.teiath.gr](http://ocp.teiath.gr).

### Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό. Οι όροι χρήσης των έργων τρίτων επεξηγούνται στη διαφάνεια «Επεξήγηση όρων χρήσης έργων τρίτων».

Τα έργα για τα οποία έχει ζητηθεί άδεια αναφέρονται στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



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

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

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

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



## Επεξήγηση όρων χρήσης έργων τρίτων

©	Δεν επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου, παρά μόνο εάν ζητηθεί εκ νέου άδεια από το δημιουργό.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου και η δημιουργία παραγώγων αυτού με απλή αναφορά του δημιουργού.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-SA	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού, και διάθεση του έργου ή του παράγωγου αυτού με την ίδια άδεια.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-ND	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού. Δεν επιτρέπεται η δημιουργία παραγώγων του έργου.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-NC	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού. Δεν επιτρέπεται η εμπορική χρήση του έργου.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-NC-SA	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού και διάθεση του έργου ή του παράγωγου αυτού με την ίδια άδεια. Δεν επιτρέπεται η εμπορική χρήση του έργου.
διαθέσιμο με άδεια CC-BY-NC-ND	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου με αναφορά του δημιουργού. Δεν επιτρέπεται η εμπορική χρήση του έργου και η δημιουργία παραγώγων του.
διαθέσιμο με άδεια CC0 Public Domain	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου, η δημιουργία παραγώγων αυτού και η εμπορική του χρήση, χωρίς αναφορά του δημιουργού.
διαθέσιμο ως κοινό κτήμα	Επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου, η δημιουργία παραγώγων αυτού και η εμπορική του χρήση, χωρίς αναφορά του δημιουργού.
χωρίς σήμανση	Συνήθως δεν επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση του έργου.

## Διατήρηση Σημειωμάτων

- Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:
- Το Σημείωμα Αναφοράς
- Το Σημείωμα Αδειοδότησης
- Τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- Το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει) μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.