

# Άσκηση 24

## Μικροκύματα

### 24.1. Σκοπός

Σκοπός της άσκησης αυτής είναι η πειραματική μελέτη ορισμένων κυματικών φαινομένων και ιδιοτήτων με τη βοήθεια των μικροκυμάτων. Συγκεκριμένα θα μελετηθούν τα φαινόμενα της πόλωσης, καθώς και της συμβολής και περίθλασης από μία και δύο σχισμές πεπερασμένου εύρους. Θα προσδιοριστεί επίσης το μήκος κύματος των μικροκυμάτων με την τεχνική του συμβολομέτρου Michelson.

### 24.2. Γενικά

Τα μικροκύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος από 0,1 έως 12 cm περίπου. Τα φαινόμενα και οι ιδιότητες που θα μελετηθούν εδώ δεν χαρακτηρίζουν μόνο τα μικροκύματα, αλλά όλους τους τύπους κυμάτων (φως, ήχος, υδάτινα κύματα κ.λπ.), επομένως μπορούν να παρατηρηθούν και με κύματα διαφορετικής φύσης, αρκεί να χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλες διατάξεις παραγωγής και ανίχνευσής τους.

Οι γενικές έννοιες από τη θεωρία της Γεωμετρικής και Φυσικής Οπτικής σχετικά με την ανάκλαση, διάθλαση και πόλωση των κυμάτων περιλαμβάνονται στην Άσκηση 13, «Ανάκλαση, διάθλαση και πόλωση του φωτός», ενώ η βασική θεωρία του φαινομένου της συμβολής αναπτύσσεται στην Άσκηση 25, «Συμβολή και περίθλαση του φωτός». Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να μην επαναληφθεί εδώ η θεωρία των φαινομένων πόλωσης και συμβολής των κυμάτων και οι σπουδαστές παραπέμπονται στις παραπάνω ασκήσεις για τη σχετική μελέτη τους.

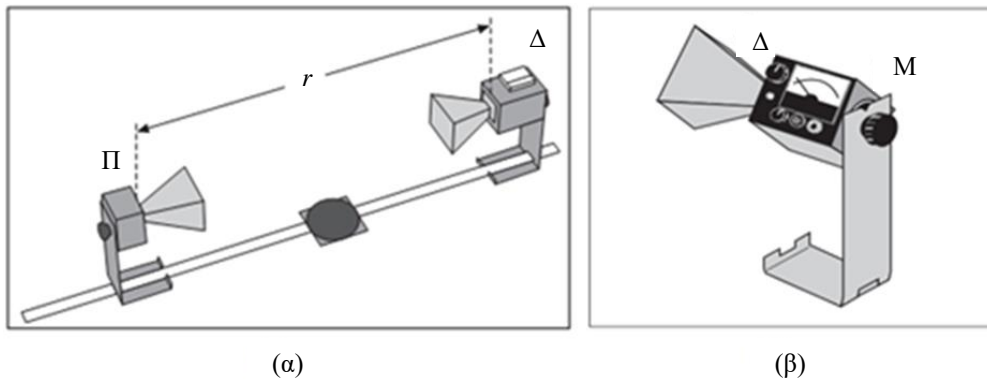
### 24.3. Μέθοδος

#### 24.3.1 Πόλωση των κυμάτων

Για τη μελέτη του φαινομένου της πόλωσης θα χρησιμοποιηθεί η δέσμη των μικροκυμάτων που παράγονται από έναν πομπό μικροκυμάτων (Σχ. 24.1), ενώ ως ανιχνευτής χρησιμοποιείται ένας δέκτης μικροκυμάτων συντονισμένος στη συχνότητα του παραγόμενου κύματος. Από τον τρόπο παραγωγής τους, τα μικροκύματα που εκπέμπονται από τον πομπό αποτελούν μονοχρωματική ακτινοβολία, σύμφωνη και γραμμικά πολωμένη, με χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης κάθετο στον μεγάλο άξονα της χοάνης (κατά μήκος του άξονα της διόδου του πομπού).

Το φαινόμενο της πόλωσης μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια της σχάρας πόλωσης, δηλαδή μιας μεταλλικής πλάκας με παράλληλες σχισμές. Τοποθετώντας πομπό και δέκτη με τα χαρακτηριστικά τους επίπεδα κατακόρυφα και παράλληλα μεταξύ τους, έτσι ώστε να έχουμε μέγιστο σήμα εξόδου, παρεμβάλλουμε τη σχάρα πόλωσης μεταξύ πομπού και δέκτη, όπως φαίνεται στο Σχ. 24.2. Αν οι σχισμές είναι κατακόρυφες, επομένως παράλληλες στο διαδιδόμενο ηλεκτρικό πεδίο, το σήμα εξόδου ελαττώνεται σχεδόν στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει διότι το ηλεκτρικό πεδίο εξαναγκάζει σε ταλάντωση κατά μήκος των μεταλλικών λωρίδων τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, τα οποία αφενός μεταβιβάζουν μέρος της ενέργειάς τους στο πλέγμα του μετάλλου λόγω κρούσεων, αφετέρου ακτινοβολούν αναιρετικά προς την

προσπίπτουσα ακτινοβολία. Αν όμως οι μεταλλικές λωρίδες μεταξύ των σχισμών είναι οριζόντιες, σχηματίζουν δηλαδή γωνία  $90^\circ$  με το ηλεκτρικό πεδίο, τότε το σήμα εξόδου παραμένει σχεδόν αμετάβλητο, εφόσον τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να κινηθούν κατά το πλάτος των μεταλλικών λωρίδων, επομένως ούτε απορροφούν ούτε ακτινοβολούν ενέργεια. Έτσι προσδιορίζεται η χαρακτηριστική διεύθυνση πόλωσης (άξονας του πολωτή) της σχάρας, που θα είναι η διεύθυνση η κάθετη στις σχισμές.

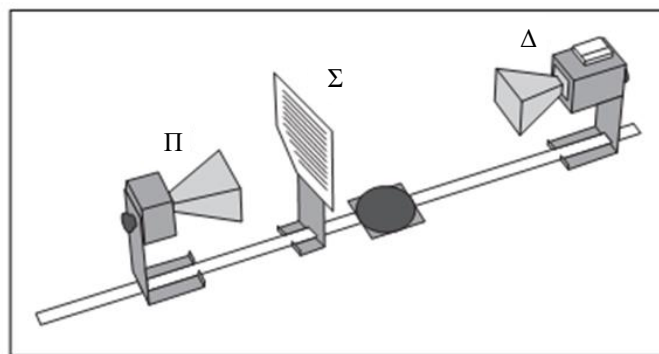


**Σχήμα 24.1.** (α) Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της πόλωσης των μικροκυμάτων (Π: πομπός, Δ: δέκτης,  $r$ : η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη), (β) Λεπτομερέστερη απεικόνιση του δέκτη (M: μοιρογνωμόνιο).

Για να διαπιστώσουμε και πειραματικά ποια είναι η κατάσταση πόλωσης των μικροκυμάτων, στρέφουμε αργά τον δέκτη και παρατηρούμε τη μεταβολή του σήματος εξόδου ως συνάρτηση της γωνίας στροφής του (Σχ. 24.1.β). Αν η δέσμη είναι πράγματι γραμμικά πολωμένη, τότε η ένταση  $I$  του σήματος εξόδου του δέκτη μεταβάλλεται συναρτήσει αυτής της γωνίας στροφής  $\theta$  σύμφωνα με τον **νόμο του Malus**:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (24.1)$$

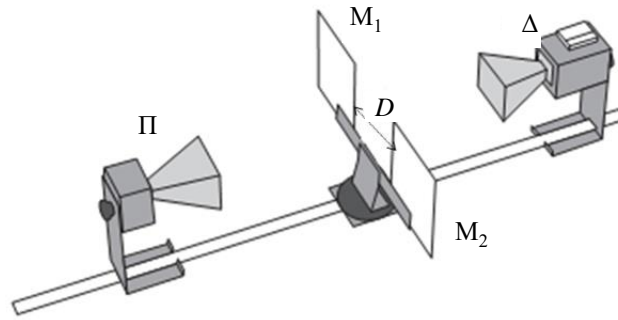
Πιο συγκεκριμένα,  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέδων πόλωσης του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα.



**Σχήμα 24.2.** Πειραματική διάταξη για την επίδειξη της πόλωσης των μικροκυμάτων με τη βοήθεια της σχάρας πόλωσης (Σ).

### 24.3.2 Περίθλαση από μία σχισμή

Για τη μελέτη του φαινομένου της περίθλασης θα χρησιμοποιηθεί η διάταξη που απεικονίζεται στο Σχ. 24.3. Η δέσμη των μικροκυμάτων, μήκους κύματος  $\lambda$ , που εκπέμπεται από τον πομπό, προσπίπτει πάνω στη σχισμή που σχηματίζεται με δύο μεταλλικές πλάκες  $M_1$  και  $M_2$ , έτσι ώστε η σχισμή να έχει ένα εύρος  $D$ , που να αντιστοιχεί σε 2-3 μήκη κύματος της δέσμης.

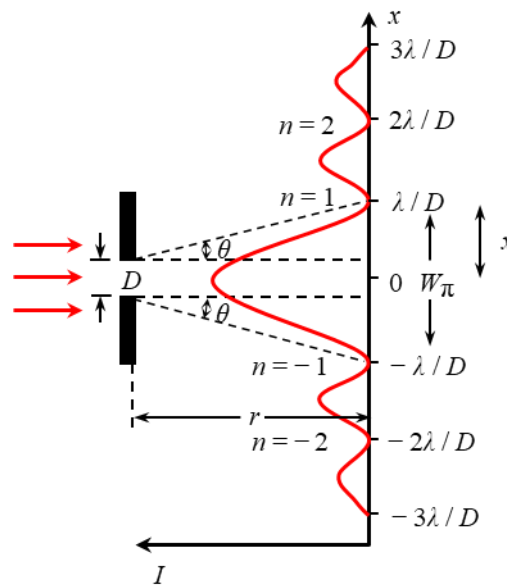


**Σχήμα 24.3** Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της περίθλασης μικροκυμάτων από μία σχισμή (Π: πομπός, Δ: δέκτης,  $M_1$ ,  $M_2$ : μεταλλικές ανακλαστικές πλάκες για τη δημιουργία σχισμής με εύρος  $D$ ).

Όπως αναπτύσσεται αναλυτικά στην Άσκηση 25 (ιδιαίτερα στο εδάφιο Π27.6), το αποτέλεσμα της περίθλασης του κύματος από τη σχισμή είναι η διαμόρφωση της έντασής του σε κροσσούς ως συνάρτηση της γωνίας  $\theta$ , σύμφωνα με την εξίσωση

$$I(\theta) = I_{\max} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad \text{και} \quad \beta = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} \quad (24.2)$$

όπου  $I_{\max}$  η ένταση στο μέγιστο του κεντρικού κροσσού ( $\theta = 0$ ), και απεικονίζεται σχηματικά στο Σχ. 24.4.



**Σχήμα 24.4.** Κατανομή της φωτεινής έντασης  $I$  ύστερα από περίθλαση από μία σχισμή, εύρους  $D$ , πάνω σε οθόνη που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση  $r$  από τη σχισμή. Η θέση  $x = \lambda/D$  αντιστοιχεί στον πρώτο σκοτεινό κροσσό ( $n = 1$ ) κ.ο.κ., ενώ  $W_\pi$  είναι το γραμμικό εύρος του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης.

Η ένταση της περιθλώμενης δέσμης μηδενίζεται στις γωνίες  $\theta$  για τις οποίες μηδενίζεται το  $\sin \theta$ , επομένως ικανοποιούν τη συνθήκη

$$n \lambda = D \sin \theta \quad (n = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (24.3)$$

Αυτή είναι η συνθήκη για την εμφάνιση σκοτεινών κροσσών τάξης  $n$  στη θέση που αντιστοιχεί σε γωνία  $\theta$ . Για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη ( $r \gg x$ ), μπορούμε να θεωρήσουμε ότι  $\sin \theta \approx x/r$ , οπότε η Εξ. (24.3) γίνεται

$$Dx = n\lambda r \quad (24.4)$$

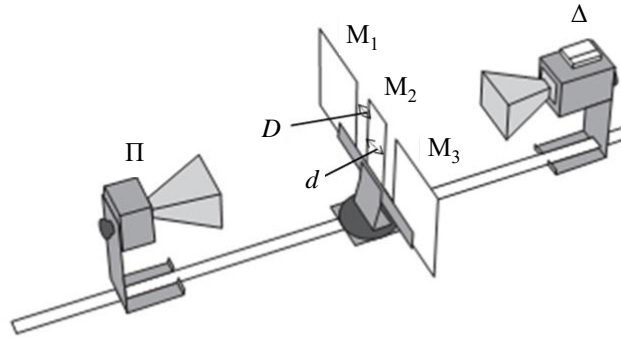
όπου  $x$  η απόσταση ενός σκοτεινού κροσσού από το κέντρο της εικόνας και  $r$  η απόσταση μεταξύ σχισμών και δέκτη. Από την Εξ. (24.4) προκύπτει εξάλλου ότι το γραμμικό εύρος,  $W_\pi$ , του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης είναι

$$W_\pi \approx \frac{2\lambda r}{D} \quad (24.5)$$

Μετρώντας την ένταση  $I(\theta)$  που φθάνει στον ανιχνευτή, για διάφορες τιμές του εύρους της σχισμής  $D$ , ως συνάρτηση της γωνίας περίθλασης  $\theta$ , συγκρίνουμε τα πειραματικά μας αποτελέσματα με τα προβλεπόμενα από τη θεωρία [Σχ. 24.4, Εξ. (24.2) και (24.5)].

### 24.3.3 Συμβολή από δύο πλατιές σχισμές

Για τη μελέτη του φαινομένου της συμβολής από δύο σχισμές θα χρησιμοποιηθεί η διάταξη που απεικονίζεται στο Σχ. 24.5.



**Σχήμα 24.5.** Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της συμβολής από δύο πλατιές σχισμές (Π: πομπός, Δ: δέκτης,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ : μεταλλικές ανακλαστικές πλάκες, μεταξύ των οποίων σχηματίζονται δύο σχισμές εύρους  $D$ ). Η απόσταση  $d$  μεταξύ των δύο σχισμών είναι ίση με το πλάτος της μεταλλικής πλάκας  $M_2$ .

Η δέσμη μικροκυμάτων, μήκους κύματος  $\lambda$ , προσπίπτει στις σχισμές εύρους  $D$ , ίσου περίπου με ένα μήκος κύματος. Η απόσταση  $d$  μεταξύ των σχισμών, που αντιστοιχεί στο πλάτος της μεταλλικής πλάκας  $M_2$ , είναι περίπου ίση με 2 μήκη κύματος. Δημιουργούνται έτσι κροσσοί συμβολής από τις δύο σχισμές, των οποίων όμως η ένταση είναι διαμορφωμένη από το φαινόμενο της περίθλασης, λόγω του πεπερασμένου εύρους της κάθε σχισμής. Η ένταση της περιθλώμενης δέσμης, για την περίπτωση όπου το εύρος  $D$  της σχισμής είναι συγκρίσιμο με την απόσταση  $d$  μεταξύ των σχισμών (όπως στην περίπτωση μας) δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{\max} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \alpha \quad (24.6)$$

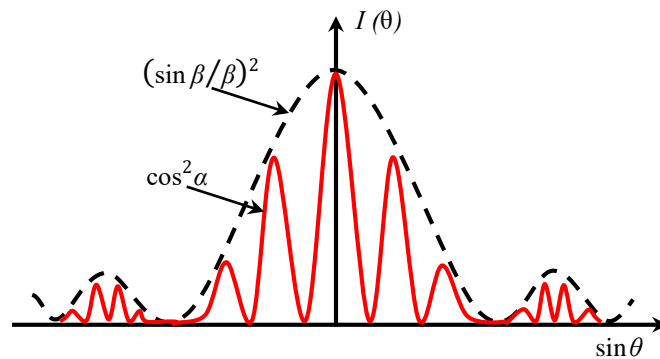
όπου

$$\alpha = \frac{\pi (d + D) \sin \theta}{\lambda} \quad \text{και} \quad \beta = \frac{\pi D \sin \theta}{\lambda} \quad (24.7)$$

και απεικονίζεται σχηματικά στο Σχ. 24.6.

Το χαρακτηριστικό της εικόνας αυτής είναι ότι στο εσωτερικό κάθε κροσσού περίθλασης, εμφανίζονται λεπτοί κροσσοί συμβολής σε μεταξύ τους αποστάσεις αντιστρόφως ανάλογες της απόστασης  $d$  μεταξύ των σχισμών. Για την περίπτωση της διάταξης στο εργαστήριο ( $D = \lambda$  και  $d = 2\lambda$ ), ο πρώτος (και μοναδικός) μηδενισμός της περίθλασης θα συμβεί για  $\sin \theta = \pm 1$ ,

σύμφωνα με τις Εξ. (24.6) και (24.7). Μηδενισμός στους κροσσούς συμβολής, εξάλλου, θα εμφανιστεί για τιμές  $\sin\theta = \pm 1/6, \pm 3/6$  και  $\pm 5/6$ , ενώ μέγιστα συμβολής για  $\sin\theta = 0, \pm 1/3$  και  $\pm 2/3$ . Το επόμενο μέγιστο στους κροσσούς συμβολής, για  $\sin\theta = \pm 3/3 = \pm 1$ , συμπίπτει με μηδενισμό της περίθλασης (ελλείπουσα τάξη) και δεν εμφανίζεται. Η εικόνα επομένως που αναμένεται στο πείραμα είναι όμοια με αυτήν του κεντρικού κροσσού στο Σχ. 24.6, δηλαδή πέντε λεπτοί κροσσοί συμβολής μέσα στον κεντρικό κροσσό της περίθλασης. Κροσσοί περίθλασης 2ης τάξης δεν θα εμφανιστούν στο πείραμα αυτό, εφόσον  $D = \lambda$  και  $\sin\theta = \pm 1$  για τον πρώτο μηδενισμό της έντασης λόγω περίθλασης.



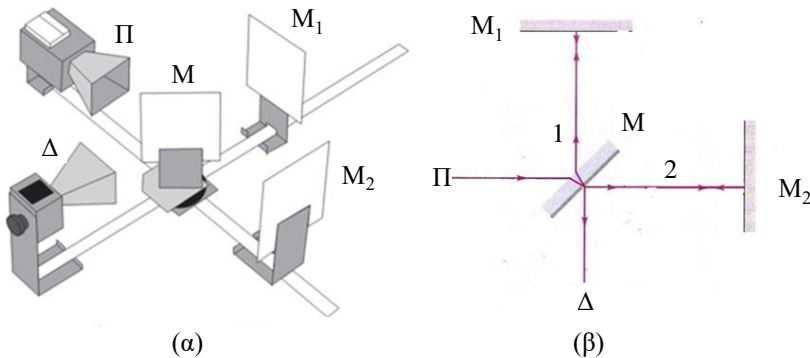
**Σχήμα 24.6** Απεικόνιση της έντασης της περιθλώμενης δέσμης (κροσσοί συμβολής και περίθλασης) των μικροκυμάτων από δύο όμοιες σχισμές εύρους  $D$  με μεταξύ τους απόσταση  $d$  (Εξ. 24.6).

Μετακινώντας τον ανιχνευτή σε περιφέρεια κύκλου με κέντρο το μέσο της πλάκας  $M_2$ , καταγράφουμε τις γωνίες  $\theta$  για τις οποίες παρατηρούμε μέγιστα και ελάχιστα της έντασης και συγκρίνουμε τα πειραματικά μας αποτελέσματα με τα προβλεπόμενα από τη θεωρία [Σχ. 24.6, Εξ. (24.6) και (24.7)].

#### 24.3.4 Μέτρηση μήκους κύματος μικροκυμάτων με το συμβολόμετρο του Michelson

Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση του μήκους κύματος με το συμβολόμετρο του Michelson απεικονίζεται στο Σχ. 24.7. Μία δέσμη μικροκυμάτων από τον πομπό (Π) προσπίπτει πάνω στη μία όψη επίπεδης ημιπερατής πλάκας (Μ) που τοποθετείται υπό γωνία  $45^\circ$  ως προς το προσπίπτον κύμα. Η πλάκα αυτή επιτρέπει μερική διάδοση και μερική ανάκλαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Έτσι στο Μ τα μικροκύματα χωρίζονται σε δύο κύματα ίσης έντασης, τα οποία, αφού ανακλαστούν στις μεταλλικές πλάκες  $M_1$  και  $M_2$ , αντίστοιχα, ακολουθώντας τις διαδρομές που υποδεικνύονται από τα βέλη στο σχήμα, ανασυντίθενται στην πίσω πλευρά της πλάκας Μ. Το αποτέλεσμα της συμβολής, που ανιχνεύεται με τον δέκτη (Δ), εξαρτάται από τη διαφορά φάσης των δύο κυμάτων στο σημείο ανασύνθεσής τους, δηλαδή από τη διαφορά δρόμου μεταξύ των δύο κυματικών διαδρομών. Είναι προφανές τώρα ότι αν μετακινήσουμε τη μεταλλική πλάκα  $M_1$  ή την  $M_2$  κατά τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και κατά μήκος ίσο προς  $\lambda/2$ , προκαλούμε μια μεταβολή στη διαφορά φάσης κατά  $2\pi$  (αφού η αντίστοιχη διαδρομή του κύματος μεταβάλλεται συνολικά κατά  $\lambda$ ). Μετακινώντας επομένως βαθμιαία, κατά μήκος της διαδρομής των κυμάτων, τη μία από τις δύο μεταλλικές πλάκες, αναζητούμε τις θέσεις εκείνες της πλάκας που αντιστοιχούν σε μέγιστη (ή ελάχιστη) ένδειξη του δέκτη, δηλαδή στην ενισχυτική (ή αναιρετική) συμβολή. Έτσι, μετρώντας την απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές θέσεις

ενισχυτικής (ή αναιρετικής) συμβολής, που αντιστοιχεί σε  $\lambda/2$ , μπορούμε να προσδιορίσουμε το μήκος κύματος των κυμάτων που εκπέμπει ο πομπός.



**Σχήμα 24.7.** (α) Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση του μήκους κύματος των μικροκυμάτων με το συμβολόμετρο του Michelson (Π: πομπός, Δ: δέκτης,  $M_1, M_2$ : μεταλλικές ανακλαστικές πλάκες, M: ημιπερατή πλάκα). (β) Οι διαδρομές (1 και 2) των δύο κυμάτων.

## 24.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη της άσκησης περιλαμβάνει:

- Έναν **πομπό μικροκυμάτων** (Π) του τύπου διόδου του Gunn (Gunn diode). Η διάδος αυτή, σε συνδυασμό με μια κοιλότητα συντονισμού σε συχνότητα 10,525 GHz, παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μήκους κύματος 2,85 cm και ισχύος 15 mW, σύμφωνη και γραμμικά πολωμένη κατά μήκος του άξονα της διόδου. Η διάδος δρα ως μη γραμμικός αντιστάτης, που ταλαντώνεται στη συχνότητα των μικροκυμάτων, η δε τροφοδοσία της γίνεται από το δίκτυο. Διαθέτει μια χοάνη για την κατεύθυνση της δέσμης των μικροκυμάτων και έναν γωνιομετρικό δείκτη για τη μέτρηση της γωνίας πόλωσης.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Παρόλο που ο πομπός πληροί τους κανόνες ασφαλείας, καλό είναι οι χρήστες να μην κοιτούν από κοντά μέσα στη χοάνη εκπομπής των μικροκυμάτων.

- Έναν **δέκτη μικροκυμάτων** (Δ) με χοάνη όμοια με εκείνη του πομπού, η οποία συλλέγει το μικροκυματικό σήμα και το οδηγεί σε μια διάοδο Schottky, μέσα σε κοιλότητα συντονισμού στα 10,525 GHz. Η διάδος ανταποκρίνεται μόνο στη συνιστώσα του κύματος που είναι πολωμένη κατά μήκος του άξονα της διόδου (κάθετη στον μεγάλο άξονα της χοάνης) και παράγει μια συνεχή τάση ανάλογη της έντασης του μικροκυματικού σήματος. Η ένδειξη οδηγείται σε μετρητή ενσωματωμένο στον δέκτη ή σε εξωτερικό πολύμετρο, το οποίο συνδέεται με τον δέκτη και παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Ο δέκτης και διαθέτει έναν γωνιομετρικό δείκτη για τη μέτρηση της γωνίας,  $\theta$ , μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέδων πομπού και δέκτη.
- Ράγες στήριξης του πομπού και του δέκτη μικροκυμάτων, με ενσωματωμένους χάρακες για τη μέτρηση των αποστάσεων.
- Μία σχάρα πόλωσης.
- Δύο μεταλλικές ανακλαστικές πλάκες.
- Μία ημιπερατή πλάκα.

## Βιβλιογραφία

1. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική*, Τόμος Β': *Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική*. (Αθήνα, 2022), 33.5, 35.1–35.3, 35.5, 36.2–36.4.
2. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Φυσική: Βασικές αρχές*, Τόμος Β': *Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική* (Αθήνα, 2021), 33.4, 35.2, 35.3, 35.5, 36.1, 36.2, 36.4.
3. H. J. Pain, *Φυσική των ταλαντώσεων και των κυμάτων* (Αθήνα, 1991), 1.8, 10.12–10.16, 10.19, 10.23, 10.26.
4. M. Young, *Οπτική και Λέιζερ* (Αθήνα, 2008), Κεφ. 5.
5. F. S. Crawford, *Κυματική (Μαθήματα Φυσικής Berkeley, Τόμος 3)* (Αθήνα, 1979), 9.2, 9.6.
6. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος ΙΙ (Αθήνα, 2011), σ. 69-84.

## 24.5 Εκτέλεση

### 24.5.1 Πόλωση

1. Φέρτε το νδείκτη του ανιχνευτή στην κατακόρυφη θέση ( $\theta = 0^\circ$ ) και τοποθετήστε τη σχάρα πόλωσης ( $\Sigma$ ) μεταξύ πομπού ( $\Pi$ ) και δέκτη ( $\Delta$ ), όπως στο Σχ. 24.2. Προσδιορίστε πειραματικά τη χαρακτηριστική διεύθυνση πόλωσης (άξονα της σχάρας πόλωσης) ως προς τη διεύθυνση των παράλληλων σχισμών.
2. Επιβεβαιώστε ότι στη θέση όπου η διεύθυνση πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλη προς τις σχισμές, η διαδιδόμενη ένταση μηδενίζεται.
3. Πραγματοποιήστε τη διάταξη του Σχ. 24.1 και συνδέστε το τροφοδοτικό με το δίκτυο αφού ελεγχθεί το σύστημα από τον επιβλέποντα.
4. Ευθυγραμμίστε πομπό ( $\Pi$ ) και δέκτη ( $\Delta$ ), ώστε τα χαρακτηριστικά τους επίπεδα να είναι κατακόρυφα ( $\theta = 0^\circ$ ) αναζητώντας τη μέγιστη ένδειξη του μικροαμπερομέτρου. Καταγράψτε στον Πίνακα Ι τη μέγιστη αυτή ένδειξη του μικροαμπερομέτρου που αντιστοιχεί σε  $\theta = 0^\circ$ .

Πίνακας Ι

| $\theta$ (deg) | $I(\theta)$ ( $\mu\text{A}$ ) | $I(\theta)_{\text{θεωρ}}$ ( $\mu\text{A}$ ) |
|----------------|-------------------------------|---|
|                |                               |   |

5. Στρέφοντας ανά  $10^\circ$  τον ανιχνευτή, από  $0^\circ$  ως  $+90^\circ$  (δεξιά) και από  $0^\circ$  ως  $-90^\circ$  (αριστερά), μετρήστε τις αντίστοιχες ενδείξεις  $I(\theta)$  του μικροαμπερομέτρου και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα Ι. Εκτιμήστε και καταγράψτε συγχρόνως με τις μετρήσεις και τα σφάλματα ανάγνωσης  $\delta\theta$  και  $\delta I(\theta)$ .

### 24.5.2 Περίθλαση από μία σχισμή

1. Πραγματοποιήστε τη διάταξη του Σχ. 24.3.

2. Σχηματίστε μία σχισμή εύρους  $D = 5,6$  cm (δύο μήκη κύματος). Τοποθετήστε τον ανιχνευτή στον κεντρικό κροσσό της περίθλασης, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένδειξη του μικροαμπερομέτρου, και θεωρήστε ότι η θέση αυτή αντιστοιχεί στη γωνία  $\theta = 0^\circ$ . Καταγράψτε την ένδειξη  $I_{\max}$ , καθώς και την απόσταση  $r$  μεταξύ σχισμής και δέκτη.

3. Μετακινήστε τον δέκτη ( $\Delta$ ) κατά μήκος περιφέρειας κύκλου με κέντρο το μέσο της σχισμής. Καταχωρήστε στον Πίνακα II τις ενδείξεις  $I(\theta)$  του μικροαμπερομέτρου για μια σειρά γωνιών  $\theta$  με βήμα  $5^\circ$  (και προς τις δύο πλευρές του κεντρικού μεγίστου).

### Πίνακας II

$$D = 2\lambda$$

| $\theta$ (deg) | $I(\theta)$ ( $\mu\text{A}$ ) | $\sin\theta$ | $I(\theta)/I_{\max}$ |
|----------------|-------------------------------|--------------|----------------------|
|                |                               |              |                      |

4. Καταγράψτε τη γωνία του πρώτου μηδενισμού με το σφάλμα της. Παρατηρείτε και δευτερεύοντα μέγιστα; Καταγράψτε επίσης το γραμμικό εύρος,  $W_\pi$ , του κεντρικού κροσσού περίθλασης.

5. Επαναλάβετε τα βήματα 2, 3 και 4 για σχισμή πλάτους  $D = 8,4$  cm (τρία μήκη κύματος) και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα III.

### Πίνακας III

$$D = 3\lambda$$

| $\theta$ (deg) | $I(\theta)$ ( $\mu\text{A}$ ) | $\sin\theta$ | $I(\theta)/I_{\max}$ |
|----------------|-------------------------------|--------------|----------------------|
|                |                               |              |                      |

#### 24.5.3 Συμβολή από δύο πλατιές σχισμές

1. Πραγματοποιήστε τη διάταξη του Σχήματος 24.5. Το εύρος των σχισμών είναι  $D = 2,8$  cm (ένα μήκος κύματος). Σημειώστε ότι το πλάτος  $d$  του μεσαίου ανακλαστήρα ( $M_2$ ) είναι ίσο με περίπου δύο μήκη κύματος.

2. Τοποθετήστε τον δέκτη ( $\Delta$ ) στον κεντρικό κροσσό, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένδειξη του μικροαμπερομέτρου, και θεωρήστε ότι η θέση αυτή αντιστοιχεί στη γωνία  $\theta = 0^\circ$ . Καταγράψτε την ένδειξη  $I_{\max}$ , καθώς και την απόσταση  $r$  μεταξύ σχισμής και δέκτη.

3. Μετακινήστε τον δέκτη ( $\Delta$ ) σε περιφέρεια κύκλου με κέντρο το μέσο του  $M_2$ . Καταγράψτε στον Πίνακα IV τις γωνίες  $\theta_{\text{πειρ}}$  για τις οποίες παρατηρείτε μέγιστα και ελάχιστα της έντασης, καθώς και τις αντίστοιχες τιμές της έντασης  $I(\theta)$  (και προς τις δύο πλευρές του κεντρικού μεγίστου). (Υπόδειξη: Σημειώστε ότι για τις συγκεκριμένες αποστάσεις και πλάτη σχισμών η θεωρία προβλέπει το σχηματισμό πέντε κροσσών συμβολής μέσα στον κεντρικό κροσσό περίθλασης.)



**Πίνακας IV**

| $\theta_{\text{πειρ}}$ (deg) | $I(\theta)$ ( $\mu\text{A}$ ) | $\theta_{\text{θεωρ}}$ (deg) |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
|                              |                               |                              |

#### 24.5.4 Συμβολομετρία – Μέτρηση του μήκους κύματος

1. Πραγματοποιήστε τη διάταξη του Σχ. 24.7, πάνω στην ειδική γι' αυτό βάση του συμβολομέτρου. Συγκεκριμένα, τοποθετήστε τον πομπό (Π) και τον δέκτη (Δ) με τους άξονες συμμετρίας τους να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία  $90^\circ$ . Τοποθετήστε, ακολούθως, την ημιπερατή πλάκα (Μ) έτσι ώστε να βρίσκεται στην τομή αυτών των αξόνων και το επίπεδό της να διχοτομεί τη μεταξύ τους γωνία. Τοποθετήστε ακόμα τις δύο μεταλλικές πλάκες ( $M_1$  και  $M_2$ ) με τα κέντρα τους στην προέκταση των αξόνων συμμετρίας πομπού και δέκτη και τα επίπεδά τους κάθετα στους άξονες αυτούς.

2. Απομακρύνοντας αργά τη μία μεταλλική πλάκα, π.χ. την  $M_1$ , κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του πομπού (ή του δέκτη για την  $M_2$ ), αναζητήστε διαδοχικές θέσεις που αντιστοιχούν σε ελάχιστες (ή μέγιστες) ενδείξεις του μικροαμπερομέτρου και μετρήστε τις αποστάσεις τους,  $\ell_i$ , από την αρχική αυθαίρετη θέση, με τη βοήθεια του χάρακα. Καταχωρήστε στον Πίνακα V τα αποτελέσματά σας, για δέκα περίπου διαδοχικά ελάχιστα (ή μέγιστα).

**Πίνακας V**

| $\ell_i$ (cm) | $\Delta\ell_i$ (cm) | $\lambda_i$ (cm) |
|---------------|---------------------|------------------|
|               |                     |                  |

### 24.6 Επεξεργασία των μετρήσεων

#### 24.6.1 Πόλωση

1. Εξηγήστε σύντομα πώς δικαιολογείται η διεύθυνση (άξονας) πόλωσης που προσδιορίσατε πειραματικά με τη βοήθεια της σχάρας ως προς τη διεύθυνση των παράλληλων σχισμών της.

2. Με βάση το νόμο του Malus [Εξ. (24.1)], και χρησιμοποιώντας ως  $I_0$  τη μέγιστη τιμή  $I(\theta)$  που αντιστοιχεί σε  $\theta = 0^\circ$ , υπολογίστε τις θεωρητικές τιμές  $I(\theta)_{\text{θεωρ}}$  και καταχωρήστε τα αποτελέσματά σας στην τρίτη στήλη του Πίνακα I.

3. Σχεδιάστε, στο ίδιο χαρτί μιλιμετρέ, τις γραφικές παραστάσεις των  $I(\theta)$  και  $I(\theta)_{\text{θεωρ}}$  ως συνάρτηση της γωνίας  $\theta$ , σημειώνοντας και τα σφάλματα. Συμφωνούν οι πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές; Εξετάστε πού μπορεί να οφείλονται οι τυχόν διαφορές.

4. Τι συμπεράσματα βγάζετε για την κατάσταση πόλωσης των μικροκυμάτων και γιατί;

#### 24.6.2 Περίθλαση από μία σχισμή

1. Για κάθε τιμή της γωνίας  $\theta$  του Πίνακα II, υπολογίστε την αντίστοιχη τιμή του  $\sin\theta$  και καταχωρήστε τις τιμές που βρήκατε στην τρίτη στήλη του Πίνακα II.

2. Από τις τιμές των  $I(\theta)$  του Πίνακα I, υπολογίστε τον λόγο  $I(\theta)/I_{\max}$  για όλες τις γωνίες που έχετε καταγράψει και καταχωρήστε τα αποτελέσματά σας στην τέταρτη στήλη του Πίνακα II.
3. Σε χαρτί μιλιμετρέ, παραστήστε γραφικά τις πειραματικές τιμές του λόγου  $I(\theta)/I_{\max}$  ως συνάρτηση του  $\sin\theta$  και συγκρίνετε τη μορφή της καμπύλης με την θεωρητικά αναμενόμενη (Σχ. 24.4).
4. Επαναλάβετε τα βήματα 1, 2 και 3 με τα δεδομένα του Πίνακα III, για τη σχισμή μεγαλύτερου εύρους.
5. Με βάση τις Εξ. (24.2), υπολογίστε τη γωνία του πρώτου μηδενισμού της καμπύλης περίθλασης για τις σχισμές εύρους 5,6 cm και 8,4 cm, και συγκρίνετε με τα πειραματικά σας αποτελέσματα.
6. Υπολογίστε το γραμμικό εύρος,  $W_{\pi}$ , του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης για τις δύο περιπτώσεις [Εξ. (24.5)] και συγκρίνετε αυτές τις θεωρητικές τιμές με εκείνες που προσδιορίσατε στο πείραμα.

#### 24.6.3 Συμβολή από δύο πλατιές σχισμές

1. Με βάση τις Εξ. (24.6) και (24.7), υπολογίστε τις γωνίες  $\theta_{\text{θεωρ}}$  για τις οποίες περιμένουμε να έχουμε μέγιστα και ελάχιστα της έντασης, αντίστοιχα, λόγω της συμβολής των μικροκυμάτων από τις δύο σχισμές του πειράματος και καταχωρήστε τις τιμές τους στον Πίνακα IV.
2. Συγκρίνετε τις πειραματικές με τις θεωρητικές τιμές των γωνιών  $\theta$  και σχολιάστε πού μπορεί να οφείλονται οι τυχόν διαφορές.

#### 24.6.4 Συμβολομετρία – Μέτρηση του μήκους κύματος

1. Υπολογίστε και καταχωρήστε στον Πίνακα V τις αποστάσεις  $\Delta\ell_i = \ell_{i+1} - \ell_i$ , που αντιστοιχούν σε δύο διαδοχικά ελάχιστα (ή μέγιστα), καθώς και τις αντίστοιχες τιμές του μήκους κύματος  $\lambda_i$ , και καταχωρήστε τις στον Πίνακα V.
2. Υπολογίστε τη μέση τιμή, καθώς και το απόλυτο και το σχετικό σφάλμα της μέσης τιμής του μήκους κύματος  $\lambda$ . Συγκρίνετε την τιμή που προσδιορίσατε με την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής για το μήκος κύματος που εκπέμπει ο πομπός.