Εργαστήριο Κυματικής Και Κβαντικής Φυσικής

Σχολή: ***Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών***

Ονοματεπώνυμο:

Τμήμα:

Άσκηση: ***25 – Συμβολή και Περίθλαση του φωτός***

Αριθμός Καταλόγου:

Συνεργάτες:

Υπεύθυνος άσκησης: ***Σοφία Θύμη***

Ημερομηνία Διεξαγωγής της άσκησης: ***18/4/2019***

Σκοπός της άσκησης

Στην άσκηση αυτή μελετάμε με την βοήθεια δέσμης λέιζερ τα φαινόμενα συμβολής και περίθλασης από διάφορα είδη σχισμών καθώς επίσης και από οπτικά φράγματα. Ακόμα, στην περίπτωση του τελευταίου βγάζουμε συμπεράσματα για το εύρος της σχισμής και την πυκνότητα των σχισμών.

Θέμα- Θεωρία

- Συμβολή του φωτός από δύο σύμφωνες σημειακές πηγές

Αν θεωρήσουμε ένα διάφραγμα που φέρει δύο πανομοιότυπες σχισμές S_1, S_2 οι οποίες βρίσκονται σε μικρή απόσταση d μεταξύ τους και φωτίζονται από μία σύμφωνη μονοχρωματική δέσμη φωτός (λέιζερ) τότε θα δημιουργηθούν δύο δευτερογενείς σημειακές πηγές σφαιρικών κυμάτων στις σχισμές. Θα δούμε δηλαδή στην οθόνη ότι εμφανίζονται εναλλάξ φωτεινές και σκοτεινές λωρίδες (κροσσοί) οι οποίες προέρχονται από την συμβολή των φωτεινών κυμάτων που ξεκινούν από τις δύο οπές S_1 και S_2. Φωτεινές είναι όλες οι θέσεις στις οποίες τα δύο συμβάλλοντα κύματα έχουν διαφορά φάσεως 0 ή

ενώ αντίθετα σκοτεινές είναι οι θέσεις αποσβεστικής συμβολής, στις οποίες τα δύο συμβάλλοντα κύματα έχουν διαφορά φάσης περιττό πολλαπλάσιο του 2π. Μετά από θεωρητική μελέτη προκύπτει ότι οι φωτεινοί κροσσοί θα βρίσκονται στις θέσεις $dsin\theta \;=\; m\lambda$ ή $y \;\approx \frac{r}{d} m\lambda$ και οι σκοτεινοί αντίστοιχα στις θέσεις $dsin\theta \;= (m+\frac{1}{2})\lambda$ ή $y \;\approx \frac{r}{d}(m+\frac{1}{2})\lambda$ όπου y η απόσταση των κροσσών από το κέντρο της συμβολής, r η απόσταση μεταξύ σχισμών και οθόνης, θ η γωνία μεταξύ της απευθείας και της περιθλώμενης ακτίνας και m = 0, ±1, ±2,…
Επίσης, η απόσταση μεταξύ δύο κροσσών του ίδιου είδους αποδεικνύεται ότι ισούται με $\Delta y \;\approx \frac{r}{d}\lambda$.

➢ Περίθλαση από μια σχισμή

Αν θεωρήσουμε μία παράλληλη δέσμη φωτός που προσπίπτει σε μία οπή διαμέτρου D θα παρατηρήσουμε ότι το φως διερχόμενο δια της σχισμής εκτρέπεται από την αρχική του διεύθυνση και δημιουργεί στην οθόνη μία φωτεινή κηλίδα. Η κηλίδα αυτή αποτελείται από δακτυλίους εναλλάξ φωτεινούς και σκοτεινούς γύρω από μία φωτεινή κεντρική κηλίδα. Επομένως συμπεραίνουμε ότι κάθε σημείο της σχισμής γίνεται δευτερογενής πηγή κυμάτων της ίδιας συχνότητας που διαδίδονται μέσω της σχισμής. Μετά από θεωρητική μελέτη προκύπτει ότι οι σκοτεινοί κροσσοί θα βρίσκονται στις θέσεις $Dsin\theta \;=\; n\lambda\,, n = \;\pm 1, \pm 2, \ldots$ και η απόσταση τους από το κέντρο συμμετρίας θα ισούται με $x_n \;=\; \frac{r}{D} n\,\lambda$. Επιπλέον, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σκοτεινών κροσσών είναι $\Delta x = \;\frac{r}{D}\lambda$ και το γραμμικό εύρος του κεντρικού σκοτεινού κροσσού είναι $W_\pi \;=\; \frac{2r\lambda}{D}$.

➢ Συμβολή – περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές

Αν έχουμε N παράλληλες σχισμές εύρους D σε μικρές αποστάσεις d μεταξύ τους και τις φωτίσουμε με ένα επίπεδο μονοχρωματικό κύμα τότε θα παρατηρήσουμε ότι πέρα από τους κύριους φωτεινούς κροσσούς συμβολής που οφείλονται στην συμβολή κυμάτων από σχισμές που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d, έχουμε και δευτερεύοντες φωτεινούς κροσσούς που οφείλονται στην συμβολή κυμάτων από σχισμές που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με πολλαπλάσια του d. Με βάση την θεωρία προκύπτει ότι οι κύριοι φωτεινοί κροσσοί βρίσκονται στις θέσεις $dsin\theta \ = \ m\lambda$, m = 0, ±1, ±2,… Ακόμα, έχουμε ότι ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς κύριους φωτεινούς κροσσούς υπάρχουν N – 2 δευτερεύοντες φωτεινοί κροσσοί ενώ το εύρος των πρώτων δίνεται από την σχέση $W_\sigma \ = \ \frac{2\lambda r}{Nd}$.

- Οπτικά φράγματα

Στην περίπτωση που έχουμε πολύ μεγάλο αριθμό σχισμών με πολύ μικρό εύρος (σε αυτή την περίσταση λέμε ότι έχουμε οπτικό φράγμα) τότε θα παρατηρήσουμε ότι θα έχουμε μικρούς και έντονους κύριους κροσσούς συμβολής σε αντίθεση με τους δευτερεύοντες που θα έχουν αμελητέα ένταση, ενώ παράλληλα οι κροσσοί από περίθλαση από κάθε σχισμή έχουν σταθερή φωτεινή ένταση. Όπως πριν, οι φωτεινοί κροσσοί θα βρίσκονται στις θέσεις $dsin\theta \ = \ m\lambda$ ή $y \ \approx \frac{r}{d} m\lambda$. Αν στην θέση της μονοχρωματικής δέσμης έχουμε πολυχρωματική θα δούμε ότι θα έχουμε σαν αποτέλεσμα μία σειρά λεπτών έγχρωμων κροσσών κάθε ένας από τους οποίους θα αντιστοιχεί στα διάφορα μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Από θεωρητική μελέτη πάνω σε αυτό το φαινόμενο συμπεραίνουμε ότι με αύξηση της πυκνότητας των σχισμών θα έχουμε αύξηση της απόστασης μεταξύ των έγχρωμων κροσσών σύμφωνα με την σχέση $N_0 \ = \ \frac{1}{d}$.

Μέθοδος – Πειραματική διάταξη

Για το πείραμα αυτό έγινε χρήση ενός λέιζερ He- Ne που δίνει μία λεπτή μονοχρωματική δέσμη με λ = 632,8 nm και ισχύ 0,5 mW το οποίο στηρίζεται πάνω σε έναν ευθύγραμμο μεταλλικό φορέα. Πάνω σε αυτόν στηρίζονται επίσης οι μαγνητικές βάσεις που χρησιμεύουν στην στήριξη των οπτικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Όσον αφορά τα οπτικά στοιχεία – εξαρτήματα, χρησιμοποιήθηκαν: μία ασυνέχεια με τέσσερις απλές σχισμές γνωστού εύρους D, μία μεταλλική ασυνέχεια με μία σχισμή άγνωστου εύρους D, μία ασυνέχεια με 4 συστήματα δύο σχισμών τα τρία εκ των οποίων έχουν γνωστά εύρη D και αποστάσεις μεταξύ τους d, μία ασυνέχεια με συστήματα πολλαπλών σχισμών και ένα οπτικό φράγμα άγνωστης πυκνότητας σχισμών.

Η μέθοδος που ακολουθήσαμε βασίζεται στην πρόπτωση της δέσμης λέιζερ κάθετα στην εκάστοτε ασυνέχεια και στην συνέχεια στην παρατήρηση των κροσσών πάνω σε χαρτί μιλιμιτρέ. Για την ασυνέχεια με μία σχισμή μετρήσαμε την απόσταση x_n ενός σκοτεινού κροσσού τάξης n από το κέντρο της εικόνας και το γραμμικό εύρος W_π του κεντρικού κροσσού και τα συγκρίναμε με τις αναμενόμενες θεωρητικές τιμές. Μετά μετρήσαμε το εύρος D μίας άγνωστης σχισμής μετρώντας ένα εκ των x_n, W_π του φωτεινού κροσσού περίθλασης. Όσον αφορά τις ασυνέχειες με δύο ίδιες σχισμές μετρήσαμε την απόσταση y_m του φωτεινού κροσσού συμβολής τάξης m από το κέντρο της εικόνας και το εύρος W_π του κεντρικού κροσσού περίθλασης και τα συγκρίναμε με τις αναμενόμενες θεωρητικές τιμές. Επίσης υπολογίσαμε τον λόγο $\rho = \frac{d}{D}$ για ένα άγνωστο σύστημα σχισμών. Τέλος, υπολογίσαμε την πυκνότητα των σχισμών αγνώστου φράγματος (N_0) με την βοήθεια των τύπων

$$m\lambda N_0 = sin\theta, όπου\ sin\theta = \frac{y}{\sqrt{r^2+y^2}}.$$

Διαδικασία που ακολουθήθηκε

➢ Προετοιμασία της πειραματικής διάταξης

Ακολουθήσαμε την διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω όσον αφορά το στήσιμο της διάταξης και σημειώσαμε πάνω στο μιλιμιτρέ με την θέση στην οποία πέφτει η δέσμη του λέιζερ. Στην συνέχεια προσαρμόσαμε την ασυνέχεια με τις απλές σχισμές στην βάση και βρήκαμε το σημείο στο οποίο το κέντρο της δέσμης του λέιζερ προσπίπτει στην σχισμή.

➢ Περίθλαση από μία σχισμή

1. Μετρήσαμε με μία μετροταινία την απόσταση r μεταξύ ασυνέχειας και οθόνης και βρήκαμε ότι έχει τιμή r = 1582 ± 1 mm.

2. Μετρήσαμε την απόσταση x_1 το σκοτεινού κροσσού τάξης 1 από το κέντρο της εικόνας καθώς επίσης και το εύρος W_π του κεντρικού φωτεινού κροσσού.

Οι μετρήσεις που λάβαμε έχουν καταγραφεί στον παρακάτω πίνακα. Για τον υπολογισμό των θεωρητικών τιμών χρησιμοποιήσαμε τις σχέσεις:

$x_n = \frac{r}{D} n \lambda \; και \; W_\pi = \frac{2r\lambda}{D}$, για n = 1. Όσον αφορά την σχισμή άγνωστου εύρους μετρήσαμε την απόσταση x_3 του τρίτου σκοτεινού κροσσού καθώς επίσης και το γραμμικό εύρος W_π του κεντρικού κροσσού. Επίσης θεωρούμε ότι $\delta x_n = \pm 1$ mm και $\delta W_\pi = \pm 1$ mm.

Πίνακας 1

Α/Α	D(mm)	x_n(mm) μέτρηση	x_n(mm) υπολογισμός	W_π (mm) μέτρηση	W_π (mm) υπολογισμός
1	0.02	47	50.1	93	100.1
2	0.04	23	25	45	50.1
3	0.08	12	12.5	22	25
4	0.16	6	6.3	11	12.5
Άγνωστη	άγνωστη	71	-	22.5	-

3. Για την σχισμή με D = 0.08 mm μετρήσαμε συνολικά 102 σκοτεινούς κροσσούς άρα $n_{σκ} = 102$.

4. Λαμβάνοντας υπόψην τις παραπάνω μετρήσεις και τα παραπάνω σφάλματα έχουμε ότι $W_\pi = 22.5 \pm 1$ mm και $x_n = 71 \pm 1$ mm για n = 3.

➢ Συμβολή – περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές

1. Στην συνέχεια τοποθετήσαμε την ασυνέχεια με τα συστήματα των δύο σχισμών και μετρήσαμε την απόσταση y_1 το φωτεινού κροσσού συμβολής τάξης 1 από το κέντρο της εικόνας καθώς επίσης και το εύρος W_π του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης. Οι μετρήσεις που λάβαμε έχουν καταγραφεί στον παρακάτω πίνακα. Για τον υπολογισμό των θεωρητικών τιμών χρησιμοποιήσαμε τις σχέσεις:

   $y_m \approx \frac{r}{d} m \lambda \; και \; W_\pi = \frac{2r\lambda}{D}$, για m = 1. Επίσης θεωρούμε ότι $\delta y_m = \pm 1$ mm και $\delta W_\pi = \pm 1$ mm.

Πίνακας 2

A/A	d(mm)	y_m(mm) μέτρηση	y_m(mm) υπολογισμός	D(mm)	W_π (mm) μέτρηση	W_π (mm) υπολογισμός
1	0.250	3	4	0.04	43	50.1
2	0.500	2	2	0.04	43	50.1
3	0.500	2	2	0.08	23	25
4	0.250	3	4	0.08	21	25

2. Τοποθετήσαμε στην βάση την ασυνέχεια με τα άγνωστα d και D και μετρήσαμε την απόσταση y_3 του φωτεινού κροσσού συμβολής τάξης 3 (απόσταση μεταξύ $3^{ου}$ και $9^{ου}$ φωτεινού κροσσού) από το κέντρο της εικόνας καθώς επίσης και το εύρος W_π του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης και λαμβάνοντας υπόψην ότι $\delta y_m = \pm 1$ mm και $\delta W_\pi = \pm 1$ mm βρήκαμε τα παρακάτω:
   $y_m = 12 \pm 1$ mm και $W_\pi = 43 \pm 1$ mm για m = 3.

3. Τέλος, τοποθετήσαμε στην βάση την ασυνέχεια με τα συστήματα πολλαπλών σχισμών με το ίδιο D και αρχίζοντας από το σύστημα με τις δύο σχισμές καταγράψαμε τις αλλαγές που παρατηρήσαμε καθώς αυξανόταν ο αριθμός των σχισμών. Πιο συγκεκριμένα είδαμε ότι με την αύξηση των σχισμών αυξάνεται η ένταση των κροσσών ένα παράλληλα αυξάνονται η καθαρότητα και η οξύτητα τους. Επιπλέον, εμφανίζονται δευτερεύοντες κροσσοί και μειώνεται το εύρος των κύριων κροσσών.

➢ Οπτικό φράγμα

Βάλαμε το οπτικό φράγμα στην μαγνητική βάση και μετρήσαμε την απόσταση y_1 του φωτεινού κροσσού συμβολής τάξης 1 από το κέντρο της εικόνας. Η τιμή που βρήκαμε είναι $y_m = 564 \pm 1$ mm για m = 1.

Ανάλυση των αποτελεσμάτων

➢ Περίθλαση από μία σχισμή

1. Στις στήλες 4 και 6 του πίνακα 1 έχουν ήδη καταχωρηθεί οι ζητούμενες τιμές. Παρατηρούμε ότι οι τιμές που μετρήσαμε είναι αρκετά κοντά με τις αναμενόμενες θεωρητικές όχι ίδια ωστόσο κάτι το οποίο ευθύνεται στο γεγονός ότι το σφάλμα της απόστασης διαδίδεται στις υπολογιζόμενες τιμές x_n και W_π.

2. Σύμφωνα με την συνθήκη $n_{σκ} \leq \frac{D}{\lambda}$, ο αριθμός των σκοτεινών κροσσών με αντικατάσταση των τιμών που έχουμε θα έπρεπε να είναι $n_{σκ} \leq \frac{0.08\ mm}{632{,}8*10^{-6} mm}$ = 126.4 επομένως ο μέγιστος αριθμός σκοτεινών κροσσών θα έπρεπε να είναι 126. Εμείς υπολογίσαμε συνολικά 102 σκοτεινούς κροσσούς. Η απόκλιση αυτή από την αναμενόμενη θεωρητική οφείλεται σε σφάλματα μετρήσεων κυρίως λόγω του ασθενούς φωτισμού που υπήρχε κατά την εκτέλεση του πειράματος και ο οποίος έκανε δυσδιάκριτους τους υπόλοιπους 24 κροσσούς.

3. Για την άγνωστη σχισμή γνωρίζουμε ότι x_n = 71 mm με n = 3, r = 1582 mm και λ = 632,8 * 10^{-6} mm. Αντικαθιστώντας στον τύπο $x_n = \frac{r}{D} n\, \lambda$ έχουμε D = 0,04 mm με σφάλμα το οποίο υπολογίζεται από τον νόμο διάδοσης σφαλμάτων μέσω του τύπου δD = $\sqrt{(\frac{\partial D}{\partial x_n} \delta x_n)^2 + (\frac{\partial D}{\partial r} \delta r)^2}$ ο οποίος μετά από αντικατάσταση των τύπων καταλήγει σε δD $= \frac{n \lambda \delta x_n}{x_n} \sqrt{(\frac{r}{x_n})^2 + 1}$ όπου με αντικατάσταση των τιμών έχουμε δD = 0,0006 mm. Επομένως προκύπτει τελικά ότι D = 0,04 ± 0,0006 mm.

➢ Συμβολή – περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές

1. Στις στήλες 4 και 6 του πίνακα 2 έχουν ήδη καταχωρηθεί οι ζητούμενες τιμές. Παρατηρούμε ότι οι τιμές που μετρήσαμε είναι αρκετά κοντά με τις αναμενόμενες θεωρητικές όχι ίδια ωστόσο κάτι το οποίο ευθύνεται στο γεγονός ότι το σφάλμα της απόστασης διαδίδεται στις υπολογιζόμενες τιμές y_m και W_π.

2. Για την άγνωστη σχισμή γνωρίζουμε ότι y_m = 12 mm με m = 3, W_π = 43 mm, r = 1582 mm και λ = 632,8 * 10^{-6} mm. Αντικαθιστώντας στους τύπους $y_m \approx \frac{r}{d} m\, \lambda$ και $W_\pi = \frac{2r\lambda}{D}$ βρίσκουμε ότι d = 0,25 mm και D = 0,05 mm οπότε ρ = 5. Για τα σφάλματα θα χρησιμοποιήσουμε τους τύπους δD = $\frac{2\lambda\delta W_\pi}{W_\pi}\sqrt{(\frac{r}{W_\pi})^2+1} = \pm 0{,}001\ mm$ και

   δd = $\frac{n\lambda\delta y_m}{y_m}\sqrt{(\frac{r}{y_m})^2+1}$ = ± 0,021 mm οι οποίοι προκύπτουν με ανάλογο τρόπο με τον τύπο του ερωτήματος 3 από τον νόμο διάδοσης σφαλμάτων. Επομένως $\lambda = \frac{d}{D} = 5\ mm$ και το σφάλμα του πηλίκου τους υπολογίζεται από τον τύπο

   δλ = $\sqrt{(\frac{\partial\lambda}{\partial D}\delta D)^2 + (\frac{\partial\lambda}{\partial d}\delta d)^2} = \frac{1}{D}\sqrt{(\frac{d\delta D}{D})^2 + (\delta d)^2} = \pm 0{,}43\ mm$.

   Επομένως ρ = λ = 5 ± 0,43 mm.

3. Το ερώτημα αυτό έχει απαντηθεί εκτενώς στην ενότητα «διαδικασία που ακολουθήθηκε»

➢ Οπτικό φράγμα

1. Όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως ισχύει ότι r = 1582 ± 1 mm , y_m = 564 ± 1 mm για m = 1. Από τις σχέσεις $m\lambda N_0 = sin\theta\ και\ sin\theta = \frac{y}{\sqrt{r^2+y^2}}$, με αντικατάσταση των τιμών έχουμε για m = 1 : $sin\theta = \frac{564}{\sqrt{1582^2+564^2}}$ = 0,34 και N_0 = 537,29. Για το σφάλμα το οποίο εξαρτάται από το σφάλμα του sinθ χρησιμοποιούμε τον τύπο $\delta(sin\theta) = \sqrt{\left(\frac{\partial sin\theta}{\partial y_m}\delta y_m\right)^2 + \left(\frac{\partial sin\theta}{\partial r}\delta r\right)^2}$ το οποίο μετά από πράξεις και τις αντικαταστήσεις δr = δy_m και δr=1mm προκύπτει $\delta(sin\theta) = \frac{r}{y_m^2+r^2} \rightarrow$ δ(sinθ) = ± 0,0006 και άρα δN_0 = $\frac{\partial N_0}{\partial sin\theta}\delta sin\theta = \frac{1}{m\lambda}\delta sin\theta \rightarrow \delta N_0 = \pm 0{,}95$. Επομένως N_0 = 537,29 ± 0,95.