

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σ.Ε.Μ.Φ.Ε.

Οπτικές Ύφες

Θωμόπουλος Σπύρος
spyros.thomop@gmail.com/ ge19042@mail.ntua.gr

Ημερομηνία Παράδοσης 04/04/2022

Σκοπός

Ο σκοπός της εν λόγω εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη βασικών στοιχείων και φαινομένων που σχετίζονται με τις οπτικές ίνες όπως φαινόμενα διασποράς και εξασθένησης σήματος.

Θεωρητικά Στοιχεία

Μέσω των οπτικών ινών μπορούμε να μεταδίδουμε οπτικά σήματα με μεγάλη πυκνότητα πληροφορίας σε μεγάλες αποστάσεις. Ενδεικτικά, κάποια από τα θετικά τους είναι η μικρή διάμετρος, το μικρό βάρος, η υψηλή ευκαμπτότητά τους, το μεγάλο εύρος ζώνης. Αντίθετα, κάποια από τα αρνητικά των οπτικών ινών είναι ότι έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και είναι σχετικά εύθραυστες.

Κατηγορίες Οπτικών Ινών

(I) Δείκτης Διάθλασης

Κλιμακωτές

Αποτελείται από έναν πυρήνα με δείκτη διάθλασης n_1 και ένα περίβλημα με n_2 . Η συνθήκη για την διάδοση του φωτός εντός της οπτικής ίνας είναι να την εισάγουμε σε αυτή με γωνία μεγαλύτερη ή ίση από την κρίσιμη γωνία ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Επίσης, για να παρατηρείται ολική ανάκλαση κατά την διάδοση του σήματος στον πυρήνα, θα πρέπει $n_1 > n_2$. Ορίζουμε το *αριθμητικό άνοιγμα* (NA) την ίνας ως

$$NA = n_1 \sin \theta_{in} \quad (1)$$

και την *κρίσιμη γωνία*

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 \quad (2)$$

Ο συνδυασμός περιβλήματος-πυρήνα μπορεί να είναι γυαλί-γυαλί, πλαστικό-γυαλί, πλαστικό-πλαστικό

Βαθμιαίες

Ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν είναι σταθερός, αλλά μειώνεται καθώς πηγαίνουμε προς το περίβλημα όπου και σταθεροποιείται ως εξής

$$\begin{aligned} n(r) &= n_1(1 - (r/a)^2 \Delta), \text{ για } r < a \\ n(r) &= n_1(1 - \Delta), \text{ για } r \geq a \end{aligned} \quad (3)$$

Οι αξονικές ακτίνες που διαδίδονται στο κέντρο έχουν μικρότερη ταχύτητα από τις περιφερειακές, αφού εκεί ο δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος με αποτέλεσμα να αντισταθμίζεται η μικρότερη απόσταση που διανύουν.

(II) Πλήθος Διαδιδόμενων Ρυθμών

Πολυρυθμικές

Έχουμε την διάδοση πολλών ρυθμών, δηλαδή ακτίνων διαφορετικών διευθύνσεων οι οποίες εισέρχονται στην ίνα με διαφορετικές γωνίες. Ισχύει ότι

$$\begin{aligned} N &= V^2/2 \\ V &= \pi d(NA)/\lambda \end{aligned}$$

όπου d η διάμετρος του πυρήνα και λ το μήκος κύματος της δέσμης. Παρατηρείται ακόμη, το φαινόμενο της *διασποράς ρυθμών* που πρόκειται για την άφιξη των διαφορετικών ρυθμών στην έξοδο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Μονορυθμικές

Έχουμε διάδοση ενός ρυθμού για $V = 2.405$ και κατ' επέκταση $d \leq 2.405\lambda/\pi(NA)$. Εδώ προφανώς δεν παρατηρείται Διασπορά των Ρυθμών και γι' αυτό έχουμε και μεγαλύτερο Εύρος Ζώνης.

Φαινόμενα Διασποράς

Κατά την έξοδο από την οπτική ίνα, ένας παλμός βγαίνει παραμορφωμένος. Υπάρχουν διάφορα είδη παραμόρφωσης και όλα οφείλονται σε φαινόμενα διασποράς, δηλαδή διαφορετικής ταχύτητας διάδοσης για διαφορετική συχνότητα. Όταν ένας μονοχρωματικός ρυθμός διαχωρίζεται σε ρυθμούς με διαφορετικούς χρόνους διάδοσης $\Delta\tau$ λέμε ότι έχουμε Διασπορά των Ρυθμών, με:

$$\Delta\tau = \frac{(NA)^2}{2n_2c}, \quad v_{max} = \frac{1}{\Delta\tau}$$

με v_{max} το Εύος Ζώνης.

Όταν παλμοί του ίδιου ρυθμού έχουν διαφορετικό μήκος κύματος τότε διαδίδονται σε διαφορετικές γωνίες και έχουμε Διασπορά του Κυματοδηγού.

$$\Delta\tau = L \frac{n_1}{c} \sin\theta \frac{d\theta}{d\lambda} \Delta\lambda$$

όπου L το μήκος της ίνας, θ γωνία κώνου υποδοχής.

Παλμοί διαφορετικού μήκους κύματος έχουν διαφορετικές ταχύτητες καθώς ισχύει ότι $n_2 = n_2(\lambda)$ και τότε έχουμε Διασπορά του Μέσου.

$$\Delta\tau = L \frac{\lambda^2}{c} \frac{d^2n}{d\lambda^2} \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Εξασθένιση Σήματος

Κατά την διάδοση του σήματος σε μία οπτική ίνα παρατηρείται η μείωση της ισχύος του που προκαλεί την εξασθένιση L :

$$L(dB) = 10 \log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right)$$

Η εξασθένιση οφείλεται στην *απορρόφηση* του σήματος από διάφορες προσμίξεις στο υλικό του πυρήνα και στην *σκέδαση* όταν το υλικό έχει ανομοιογένειες (γεωμετρικές ατέλειες, κάμψεις κατά την κατασκευή και το τύλιγμα της ίνας)

Πειραματική Διάταξη

Γενικά, τα μέρη που θα χρειαστούμε σε όλα τα πειράματα είναι

- . Laser He-Ne
- . Συζεύκτης laser-ίνας
- . Στήριγμα ίνας
- . Οθόνη με χαρτί μιλλιμετρέ
- . Συζεύκτης ινών

Πειραματική Διαδικασία - Επεξεργασία Μετρήσεων

Σύζευξη ίνας - laser

Θα μελετηθεί η σύζευξη μίας οπτικής ίνας με ένα laser He-Ne. Η σύζευξη επιτυγχάνεται με την παρουσία ενός συγκλίνονα φακού ο οποίος λόγω φαινομένων περίθλασης δεν συγκεντρώνει την δέσμη σε ένα σημείο αλλά σε ομόκεντρους δίσκους με Γκαουσιανή κατανομή. Για να είναι αποδοτική, θα πρέπει προφανώς η διάμετρος της ίνας να είναι μεγαλύτερη από αυτή της δέσμης. Η ένταση της δέσμης μειώνεται με την απόσταση r που διανύει στην ίνα ως

$$I = I_0 e^{-2\left(\frac{r}{w}\right)^2}$$

w είναι η διάμετρος της δέσμης.

Πιο ειδικά, ο συζεύκτης αποτελείται από το μέρος του φακού εστίασης και το μέρος της σύνδεσής του με την έξοδο του laser. Τα δύο μέρη συνδέονται μεταξύ τους και επιπλέον μπορούν να έχουν

και διαφορετική κλίση η οποία αν ρυθμιστεί κατάλληλα μπορεί να εστιάσει την δέσμη στο κέντρο του πυρήνα και κατ' επέκταση όλη την ισχύ στο κέντρο του ίχνους της δέσμης σε μία οθόνη.

Πειραματικά, αφού θέσουμε σε λειτουργία το laser, μετράμε με την φωτοδίοδο την τάση από το υπόβραθρο, το laser και της δέσμης του laser αφού το συνδέσουμε με την πολυρυθμική ίνα. Η μετατροπή της τάσης σε ισχύ γίνεται από την σχέση $P = -1.898 + 18.48V(S.I.)$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα (1)

| Μέτρηση | V(V) | P(mW) |
|------------------|-------|-------|
| Υπόβραθρο | 0.345 | 4.48 |
| Laser+ Υπόβραθρο | 0.824 | 13.33 |
| Ινα + Υπόβραθρο | 0.650 | 10.11 |
| Laser | 0.479 | 6.95 |
| Ινα | 0.305 | 3.74 |

Πίνακας. 1

Τέλος, μπορούμε να υπολογίσουμε την εξασθένιση της οπτικής ίνας από την σχέση

$$\begin{aligned}
 IL &= 10\log_{10}\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{P_{I\alpha}}{P_{laser}}\right) \Rightarrow \\
 &= 10\log_{10}\left(\frac{10.114}{13.330}\right) \Rightarrow \\
 IL &= -0.270
 \end{aligned}$$

Προσδιορισμός Αριθμητικού Ανοίγματος

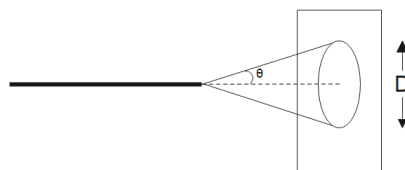
Μετρώντας την διάμετρο του ίχνους στην έξοδο της ίνας θα προσδιορίσουμε το αριθμητικό άνοιγμά της. Συγκεκριμένα, τοποθετούμε την οθόνη με το μιλλιμετρέ χαρτί σε μία απόσταση από την έξοδο της ίνας και την απομακρύνουμε ανά 1cm. Σε κάθε βήμα μετράμε την διάμετρο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα (2).

| $x(\pm 0.1cm)$ | $D(\pm 0.1cm)$ |
|----------------|----------------|
| 0.0 | 1.5 |
| 1.0 | 2.1 |
| 2.0 | 2.7 |
| 3.0 | 3.2 |
| 4.0 | 3.6 |

Πίνακας. 2

Όπου η γωνία θ είναι η γωνία του κώνου υποδοχής, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει το κέντρο του ίχνους με την ίνα και η ευθεία που ενώνει ένα σημείο της περιμέτρου του ίχνους με την ίνα (Εικόνα (1)). Έτσι, θα δίνεται από την σχέση

$$\tan\theta = D/2x \quad (4)$$



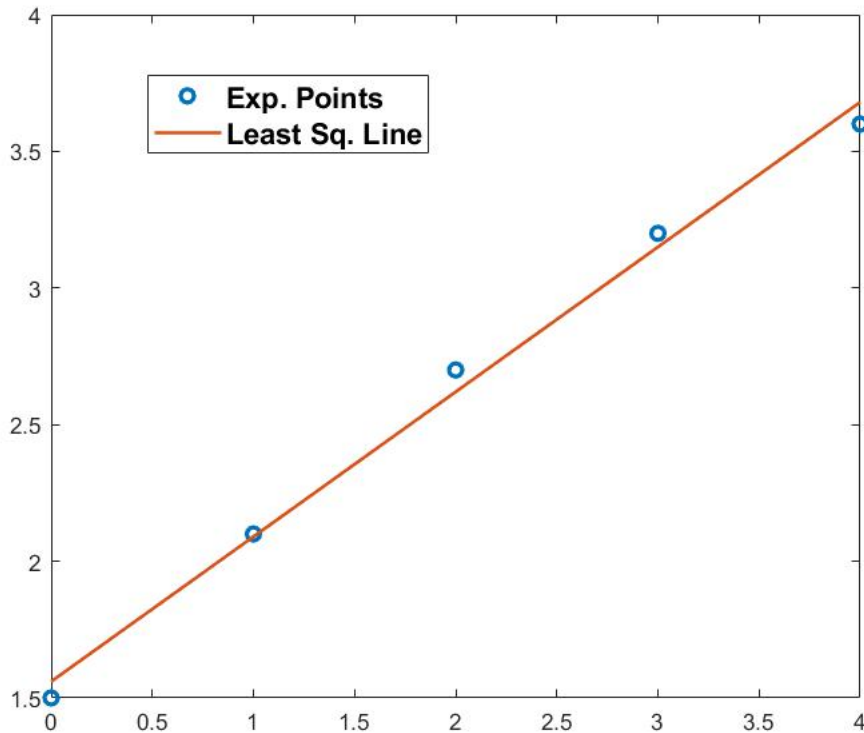
Εικόνα. 1: Γωνία Κώνου Υποδοχής

Επιπλέον, το αριθμητικό άνοιγμα της δέσμης δίνεται από την σχέση

$$NA_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} = n_{\alpha\epsilon\rho\alpha} \sin\theta = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (5)$$

Άρα δεδομένου ότι η σχέση (4) γράφεται $D = 2\tan\theta \cdot x$, μπορούμε να εφαρμόσουμε μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για ευθεία της μορφής $Y = AX + B$ ¹, με $X = x$, $Y = D$ και $A = 2\tan\theta$ και με αυτόν τον τρόπο να προσδιορίσουμε την γωνία θ .

Από την εν λόγω μέθοδο προκύπτει $A = (0.53 \pm 0.03)$, $B = (1.56 \pm 0.04)$ και η ευθεία με τα πειραματικά δεδομένα φαίνονται στην Εικόνα (2)



Εικόνα. 2

Άρα για την γωνία θ έχουμε²

$$\theta = (0.259 \pm 0.024)[rad] = (14.8 \pm 1.4)^\circ$$

Τέλος το Αριθμητικό Άνοιγμα της ίνας είναι:³

$$NA = 0.26 \pm 0.02$$

Μετατροπή Δέσμης Εξόδου σε Παράλληλη

Εδώ θα χρησιμοποιήσουμε έναν οπτικό ευθυγραμμιστή(collimator), δηλαδή έναν συγκλίνονα φακό ($f = 1mm$), προκειμένου να παραλληλοποιήσουμε την δέσμη εξόδου της ίνας. Για να επιτυγχθεί αυτό θα πρέπει να τοποθετήσουμε την έξοδο της ίνας από τον φακό ίση με την εστιακή του f .

¹Το B χρειάζεται γιατί το x που έχουμε ορίσει ως 0 δεν αντιστοιχεί σε μηδενική απόσταση από την έξοδο της ίνας. Αν είχαμε πάρει ως $x = 0cm$ όταν η οθόνη βρισκόταν στην έξοδο της ίνας θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε μία μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων της μορφής $Y = AX$

²Το σφάλμα προκύπτει από διάδοση $\delta\theta = \left| \frac{\partial\theta}{\partial A} \delta A \right| = \frac{\delta A}{\sqrt{1+A^2/4}} = \frac{2\delta A}{\sqrt{4+A^2}}$

³Ομοίως το σφάλμα προκύπτει από διάδοση $\delta NA = \left| \frac{\partial \sin\theta}{\partial \theta} \delta\theta \right| = \cos\theta \delta\theta$

Αφού τοποθετήσουμε τον συζεύκτη στην έξοδο της ίνας, τον στρίβουμε μέχρι να γίνει ελάχιστο το μέγεθος του ίχνους της στην οθόνη. Όταν το επιτύχουμε αυτό θα έχουμε τοποθετήσει την έξοδο της ίνας στο εστιακό επίπεδο του φακού.

Στρίβουμε τον φάκο κατά 180° (μία πλήρης περιστροφή μετακινεί τον φακό κατά 0.454mm). Η απόσταση του αντικειμένου (πυρήνας ίνας) είναι $o = f + (0.454/4) = 1.114\text{mm}$ και η απόσταση του ειδώλου

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \Rightarrow \boxed{i = 9.772\text{mm}}$$

Τότε η διάμετρος του ίχνους της δέσμης βρέθηκε $h_1 = D = (5 \pm 1)\text{mm}$

Γνωρίζουμε ότι η μεγέθυνση ενός αντικειμένου σε σύστημα ενός φακού δίνεται από την σχέση

$$M = \frac{h_1}{h_0} = \frac{i}{o} \Rightarrow h_0 = \frac{h_1 \cdot o}{i} \Rightarrow \boxed{h_0 = (0.6 \pm 0.1)\text{mm}}^4$$

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι έχουμε μεγάλο σχετικό σφάλμα της τάξης του $\sim 17\%$. Ακόμη, οι τιμές της διαμέτρου του πυρήνα για πολυρυθμική οπτική ίνα είναι $0.0500 - 0.0625\text{mm}$ και παρόλο που η τιμή μας δεν συμπίπτει με αυτές, δεν περιέχεται στα πλαίσια του σφάλματός της αφού πρόκειται και για διαφορετική τάξη μεγέθους.

Εξασθένιση κατά την Σύζευξη Δύο Ινών

Σε αυτό το μέρος θα μελετηθεί η σύζευξη δύο οπτικών ινών. Η σύζευξη επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η πλευρική απόκλιση (άξονες των ινών παράλληλα μετατοπισμένοι), γωνιακή απόκλιση (άξονες των ινών σχηματίζουν γωνία), χωρισμός των άκρων (το φως που εξέρχεται από την πρώτη εισέρχεται στον κών υποδοχής της δεύτερης), κατεργασία άκρων (επιφανειακές ατέλειες και ακαθαρσίες στα άκρα της ίνας), εσωτερικές απώλειες (διαφορές στα οπτικά χαρακτηριστικά των ινών) και απώλειες *Fresnel* (οφείλονται σε ανακλάσεις στις διαχωριστικές επιφάνειες).

Αφού συνδέσουμε τις δύο ίνες, μετράμε με την φωτοδίοδο την τάση του υποβάθρου και έπειτα τις τάσεις που δίνει η έξοδος της ίνας όταν είναι τυλιγμένη μόνο η πρώτη και όταν είναι τυλιγμένες και οι δύο. Έπειτα μετατρέπουμε τις τάσεις σε ισχύ σύμφωνα με την σχέση $P = -1.898 + 18.48V[S.I.]$. Ακόμη, υπολογίζω την εξασθένιση για τις δύο περιπτώσεις από την σχέση $IL = 10\log_{10}(P_{out}/P_{in})$, όπου είχαμε βρει την ισχύ του laser $P_{in} = P_{laser} = 6.954\text{mW}$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα (3).

| Μέτρηση | V(V) | P(mW) | IL(dB) |
|------------------------|-------|-------|--------|
| Υπόβαθρο1 | 0.442 | 6.27 | - |
| 1η τυλιγμ. + Υπόβαθρο1 | 0.630 | 9.74 | - |
| Υπόβαθρο2 | 0.448 | 6.38 | - |
| 2η τυλιγμ. + Υπόβαθρο2 | 0.596 | 9.12 | - |
| 1η τυλιγμ. | 0.188 | 1.58 | -6.45 |
| 2η τυλιγμ. | 0.148 | 0.84 | -9.20 |

Πίνακας. 3

Συντελεστής Εξασθένισης της Ίνας

Η εξασθένιση των οπτικών ινών μετράται σε dB/km , την οποία και προκαλούμε με έναν τεχνητό εξασθενητή ο οποίος τοποθετείται ενδιάμεσα στις 2 ίνες. Οι μετρήσεις μας φαίνονται στον Πίνακα (4).

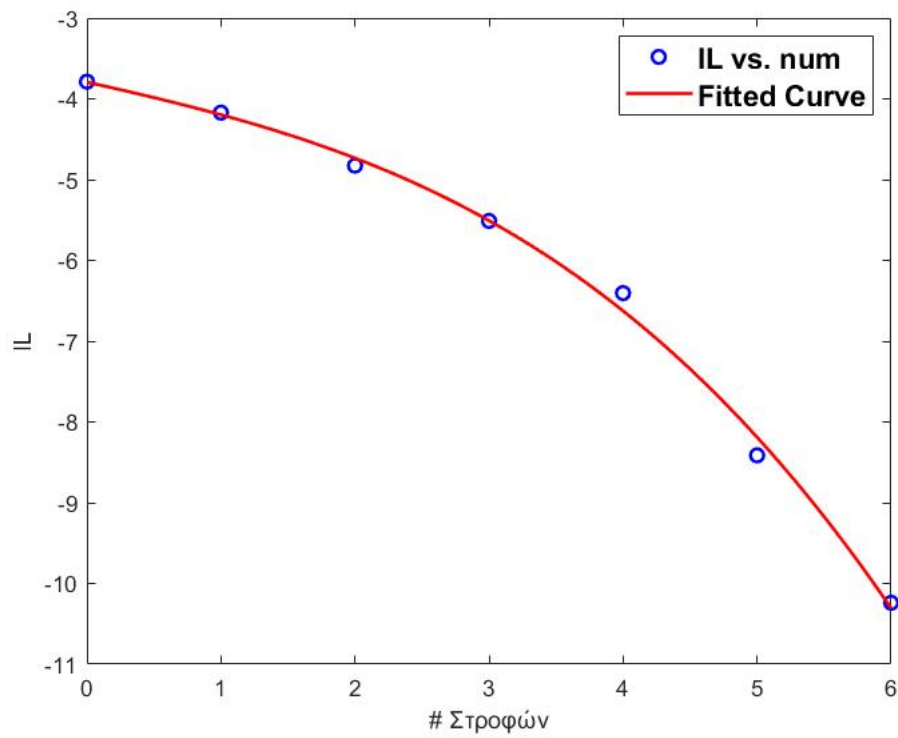
Η γραφική παράσταση των παραπάνω μεγεθών προκύπτει έπειτα από προσαρμογή με πολυώνυμο 3ου βαθμού και φαίνεται στην Εικόνα 3:

Συμπεράσματα

⁴Το σφάλμα προκύπτει από διάδοση $\delta h_0 = \sqrt{(\frac{\partial h_0}{\partial h_1} \delta h_1)^2} = \frac{o}{i} \delta h_1 = 0.1139 \simeq 0.1\text{mm}$

| # Στροφών 90° | $V(mV)$ (μετρήθηκε) | $V - V_{back}(mV)$ (από ίνα) | IL(dB) |
|---------------|------------------------|---------------------------------|--------|
| 0 | $V_{in} = 708$ | 296 | -3.79 |
| 1 | 683 | 271 | -4.17 |
| 2 | 645 | 233 | -4.83 |
| 3 | 611 | 199 | -5.51 |
| 4 | 574 | 162 | -6.41 |
| 5 | 514 | 102 | -8.41 |
| 6 | 479 | 67 | -10.24 |
| 7 | $V_{back} = 412$ | 0 | – |

Πίνακας. 4



Εικόνα. 3