Εισαγωγή

Σκοπός της άσκησης αυτής είναι η εισαγωγή στην τεχνογνωσία των οπτικών ινών και η μελέτη τους κατά τη διάδοση μιας δέσμης laser. Συγκεκριμένα μελετάται η εξασθένιση που υφίσταται το σήμα στην ίνα κάτω από διάφορες συνθήκες, γίνεται υπολογισμός του συντελεστή εξασθένισης για μια παραμορφωμένη ίνα και για δύο συζευγμένες ίνες καθώς και ο υπολογισμός του αριθμητικού ανοίγματος της ίνας.

Στοιχεία Θεωρίας

Οι οπτικές αποτελούν λεπτούς κυλινδρικούς κυματοδηγούς μέσω των οποίων γίνεται μετάδοση οπτικών σημάτων. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Πρόκειται για εξαιρετικά λεπτά νήματα κυλινδρικής διατομής τα οποία απαρτίζονται από τρία κυρίως μέρη. Την επικάλυψη, το περίβλημα και τον πυρήνα. Το φωτεινό σήμα μεταφέρεται κατά μήκος της ίνας διαμέσου του πυρήνα, οποίος περιβάλλεται από το περίβλημα που είναι ουσιαστικά η περιοχή που ανακλά το φως πίσω στον πυρήνα. Όπως είναι γνωστό, για να ικανοποιείται η συνθήκη της ολικής ανάκλασης θα πρέπει ο συντελεστής διάθλασης του πυρήνα να είναι μεγαλύτερος από αυτόν του περιβλήματος. Ο απομονωτής παρέχει προστασία στο σύστημα πυρήνα-περιβλήματος.

Για την πλήρη ανάλυση και κατανόηση του φαινομένου της κυματοδήγησης είναι απαραίτητη η χρήση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και των εξισώσεων του Maxwell, όμως μια αρκετά ικανοποιητική μελέτη κάποιων βασικών μπορεί να γίνει με την χρήση της απλής γεωμετρικής οπτικής. Για να έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση πρέπει η ακτίνα φωτός να εισέρχεται στον πυρήνα υπό κατάλληλη γωνία. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η δέσμη κατά την είσοδό της στον πυρήνα βρίσκεται εσωτερικά ενός κώνου γωνίας θ. Το μέγεθος sinθ ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα της ίνας (NA).

Οι οπτικές ίνες ανάλογα με την κατανομή του δείκτη διάθλασης διακρίνονται σε ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης και ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης. Η μεταβολή αυτή του δείκτη διάθλασης αποσκοπεί στην καθυστέρηση των ακτινών που διέρχονται από τον κεντρικό διαμήκη άξονα της ίνας, οι οποίες διανύουν μικρότερες αποστάσεις από τις περιφερειακές ακτίνες, έτσι ώστε να φτάνουν όλες ταυτόχρονα στην έξοδο της ίνας. Έτσι, ο δείκτης διάθλασης δεν είναι σταθερός αλλά λαμβάνει μια μέγιστη τιμή στο διαμήκη κεντρικό άξονα και γύρο από αυτόν έχει μικρότερες τιμές όσο πλησιάζουμε στην επιφάνεια της ίνας.

Επίσης, ανάλογα με το πλήθος των διαδιδόμενων ρυθμών (ή τρόπων) οι οπτικές ίνες διακρίνονται σε μονορυθμικές, αν επιτρέπουν τη διάδοση ενός μόνο ρυθμού, και σε πολυρυθμικές , αν μπορούν να φέρουν περισσότερους από ένα ρυθμό. Το αριθμητικό άνοιγμα συνδέεται επίσης και με το πλήθος των ρυθμών που μπορούν να διαδοθούν σε μια πολυρυθμική, κλιμακωτού δείκτη διάθλασης οπτική ίνα. Το πλήθος των ρυθμών προσδιορίζεται ως: $N=V^2/2$, όπου $V=\pi d(NA)/\lambda$, με d τη διάμετρο του πυρήνα και λ το μήκος κύματος της διαδιδόμενης ακτινοβολίας.

Όπως και σε άλλους κυματοδηγούς, έτσι και στις οπτικές ίνες παρατηρούνται φαινόμενα εξασθένησης και παραμόρφωσης του διαδιδόμενου σήματος. Η εξασθένηση του σήματος κατά την διάδοσή του προσδιορίζεται με τη μέτρηση της ισχύος εξόδου, P_{out}, και της ισχύος εισόδου , P_{in}, σύμφωνα με τη σχέση:

$$L(dB)=10\log(P_{out}/P_{in}) \qquad (1)$$

Η σχετική παραμόρφωση του σήματος οφείλεται κυρίως σε φαινόμενα διασποράς.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αρχικά έγινε η σύζευξη της ίνας με τη δέσμη laser He-Ne.
Οι μετρήσεις που έγιναν για την εύρεση της ισχύος του laser έδωσαν τα εξής αποτελέσματα:
Ένδειξη ενεργομέτρου στην έξοδο του laser: (542±5)mV
Ένδειξη ενεργομέτρου στην έξοδο της ίνας: (469±5)mV
Η αντίστοιχη ισχύς υπολογίζεται από τη σχέση βαθμονόμησης του ενεργομέτρου:
y(mW)=-5+33x(Volt)
Έτσι προκύπτουν τα εξής:
Ισχύς στην έξοδο του laser: P_{in}= (12.89±0.17)mW
Ισχύς στην έξοδο της ίνας: P_{out}= (10.48±0.17)mW
Όπως φαίνεται, το 81.3% της ισχύος εισόδου φτάνει στην έξοδο. Έχουμε δηλαδή ικανοποιητική σύζευξη.
Η εξασθένιση του σήματος υπολογίζεται από τη σχέση (1):
L=(-0.90±0.10)dB
Όπου το σφάλμα του L υπολογίστηκε από τη γνωστή σχέση της διάδοσης των σφαλμάτων:

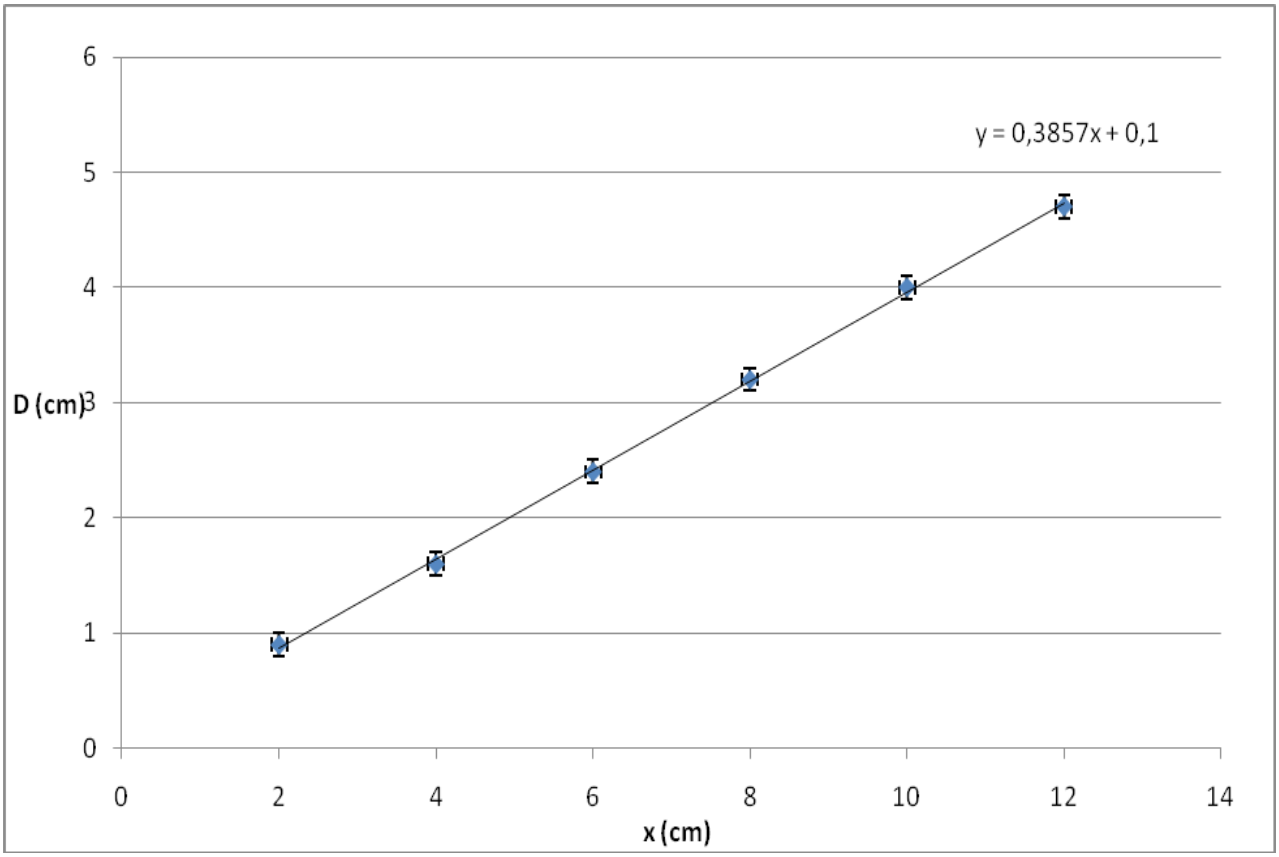
$$\delta L=\sqrt{\left(\frac{\partial L}{\partial P_{in}}\delta P_{in}\right)^2+\left(\frac{\partial L}{\partial P_{out}}\delta P_{out}\right)^2}=10\sqrt{\left(\frac{\delta P_{in}}{P_{in}\ln 10}\right)^2+\left(\frac{\delta P_{out}}{P_{out}\ln 10}\right)^2}\approx 0.10$$

Για τον προσδιορισμό του αριθμητικού ανοίγματος της οπτικής ίνας, παρατηρήθηκε η φωτεινή δέσμη πάνω σε μιλιμετρέ χαρτί. Για διάφορες τιμές της απόστασης x ανάμεσα στην έξοδο της ίνας και την οθόνη παρατήρησης μετρήθηκε η διάμετρος D της δέσμης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα 1:

Πίνακας 1

Απόσταση x (±0.1cm)	Διάμετρος D (±0.1cm)
2.0	0.9
4.0	1.6
6.0	2.4
8.0	3.2
10.0	4.0
12.0	4.7

Απο τα δεδομένα αυτά προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (διάμετρος D συναρτήσει της απόστασης x):



Η καλύτερη ευθεία που περνά από τα πειραματικά σημεία είναι της μορφής ψ=α+βχ με α=(0.10±0.04)cm και κλίση β=0.386±0.035

Για τη γωνία του κώνου υποδοχής θ ισχύει η σχέση: $\tan\theta=\frac{1}{2}\frac{D}{x}$ (2)

και το αριθμητικό άνοιγμα μπορεί να βρεθεί από τη σχέση: NA=sinθ (3)

Στη σχέση (2) το D/x είναι η κλίση β της ευθείας, και έτσι έχουμε:
tanθ=β/2=0.193±0.018
άρα arctanθ=(10.924±0.017)deg και sinθ=0.189±0.017
επομένως και το αριθμητικό άνοιγμα από τη σχέση (3) είναι **NA=0.189±0.017**

Σφάλματα: Τα σφάλματα των παρακάτω μεγεθών υπολογίστηκαν ως εξής:
$\delta(\arctan\theta) = (\arctan\theta)'\,\delta\theta = \delta\theta/(1+\theta^2)$
$\delta(\sin\theta) = (\sin\theta)'\,\delta\theta = \cos\theta\,\delta\theta$
Τα σφάλματα υπολογίστηκαν με δύο σημαντικά ψηφία και οι τιμές των μεγεθών με την ίδια ακρίβεια δεκαδικών ψηφίων.

Στη συνέχεια έγινε σύνδεση δύο ινών με τη βοήθεια ενός συζευκτή. Μετρήθηκε η ισχύς στην έξοδο της πρώτης και στην έξοδο της δεύτερης ίνας αφού συνδέθηκε με την πρώτη. Επίσης μετρήθηκε η ισχύς με την πρώτη ίνα τυλιγμένη,

μετά ξανά με τις δύο ίνες συνδεδεμένες, και τέλος με τις δύο ίνες τυλιγμένες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 2:

Πίνακας 2

	Ένδειξη ενεργόμετρου (±5mV)	Ισχύς (±0.17mW)
Α) Στην έξοδο της πρώτης ίνας	469	10.48
Β) Δύο ίνες συζευγμένες	465	10.35
Γ) Τυλιγμένη πρώτη ίνα	456	10.05
Δ) Δύο ίνες συζευγμένες (ξανά)	460	10.18
Ε) Δύο ίνες τυλιγμένες	455	10.02

<u>Υπολογισμός εξασθένισης:</u>
Στην περίπτωση (Α) → (Β): L_{AB}= -0.05±0.10dB

Στην περίπτωση (Α) → (Γ): $L_{AΓ}$= -0.18±0.10dB

Στην περίπτωση (Δ) → (Ε): L_{AB}= -0.07±0.10dB

Όπου τα παραπάνω υπολογίστηκαν από τη σχέση (1) όπως έγινε και στο πρώτο ερώτημα της άσκησης.
Παρατηρούμε ότι η εξασθένιση αυξάνεται σημαντικά όταν έχουμε παραμόρφωση της οπτικής ίνας, ενώ το σήμα παρουσιάζει πολύ μικρή εξασθένιση όταν έχουμε σύζευξη δύο απαραμόρφωτων οπτικών ινών.

Στα πλαίσια της εργαστηριακής άσκησης θα γίνει και ο υπολογισμός του συντελεστή εξασθένισης της οπτικής ίνας.
Η ισχύς της εξερχόμενης δέσμης από την πρώτη οπτική ίνα μετρήθηκε:
P_{in}=(521±5)mV → (7.73±0.10)mW → (8.89±0.13)dB
Όπου η μετατροπή σε mW έγινε από τη σχέση βαθμονόμησης του ενεργομέτρου:
y(mW)= -1.898+18.48x(Volt)
και η μετατροπή σε dB από τη σχέση: dB=10 log(ισχύς σε mW)

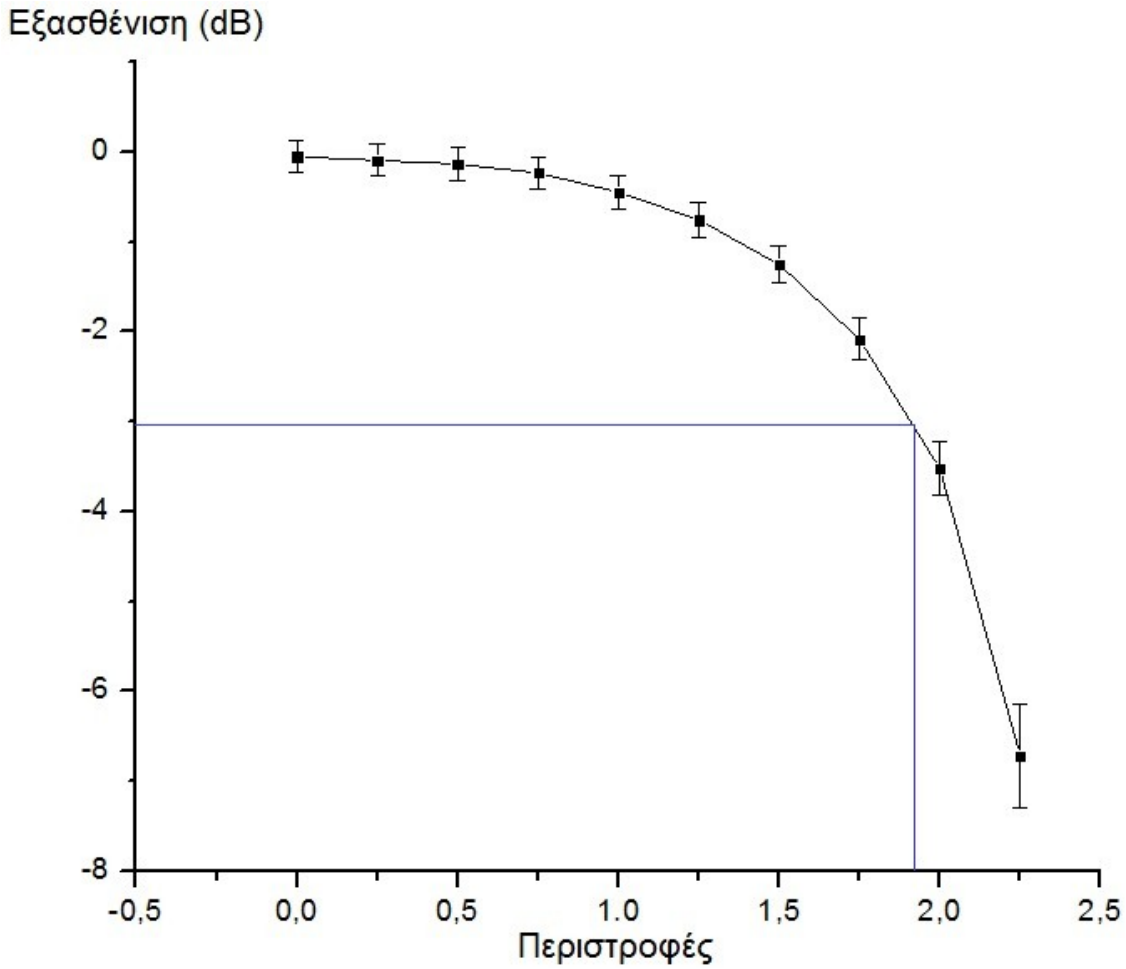
Ο εξασθενητής τοποθετείται ανάμεσα σε δύο οπτικές ίνες. Το μέγεθος της εξασθένησης μπορεί να ρυθμιστεί με τη χρήση μιας βίδας που παρεμβάλλει την πορεία της δέσμης. Η βίδα στρέφεται με βήμα 1/4 μιας περιστροφής και γίνεται μέτρηση της ισχύος της εξερχόμενης δέσμης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3:

Πίνακας 3

Περιστροφή	P_{out} (±5mV)	P_{out} (±0.092mW)	P_{out} (dB)	P_{out} - P_{in} (dB)
0	517	7,656	8,84±0.12	-0,05±0.18
1/4	513	7,582	8,80±0.12	-0,09±0.18

2/4	509	7,508	8,76±0.12	-0,13±0.18
3/4	500	7,342	8,65±0.13	-0,23±0.18
4/4	481	6,991	8,45±0.13	-0,44±0.18
5/4	455	6,510	8,14±0.14	-0,75±0.19
6/4	417	5,808	7,64±0.16	-1,25±0.20
7/4	362	4,792	6,81±0.19	-2,09±0.23
8/4	289	3,443	5,37±0.27	-3,52±0.30
9/4	192	1,650	2,18±0.56	-6,71±0.57
10/4	52	-0,937		
11/4	5	-1,807		

Στις τελευταίες δύο μετρήσεις η σχέση βαθμονόμησης του ενεργομέτρου έδωσε αρνητικές τιμές στο P_{out} με αποτέλεσμα να μη μπορεί να υπολογιστεί ο λογάριθμος για τη συμπλήρωση των άλλων στηλών.
Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται η εξασθένιση συναρτήσει των περιστροφών της βίδας του εξασθενητή.



Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, εξασθένιση 3dB+I.L.=3.05dB αντιστοιχεί περίπου σε 1.8 περιστροφές ή 648 μοίρες.

Η αντίστοιχη θεωρητική τιμή για εξασθένιση 3dB μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:
(περιστροφές x 0.64)=B.D./2 ↔ (περιστροφές x 0.64)=1.5 ↔2.34 περιστροφές ή 842°
Αυτή η σημαντική διαφορά που έχουμε ανάμεσα στην πειραματική και τη θεωρητικά αναμενόμενη τιμή οφείλεται κυρίως σε λάθος μέτρηση του P_{in} στην έξοδο της πρώτης οπτικής ίνας, με αποτέλεσμα να έχουμε εσφαλμένες (μικρότερες) τιμές από ότι θα έπρεπε στο P_{in}-P_{out} στον πίνακα 3.

Εκτός από τις τηλεπικοινωνίες, ευρεία χρήση των οπτικών ινών έχουμε και στη σύγχρονη ιατρική. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ενδοσκόπηση και η οφθαλμολογική χειρουργική. Στην ενδοσκόπηση (πνευμονοσκόπηση, γαστρεντεροσκόπηση κλπ) χρησιμοποιείται κυρίως laser Nd-YAG η δέσμη του οποίου καθοδηγείται στο εσωτερικό του ασθενούς μέσω οπτικής ίνας η οποία χρησιμεύει στο φωτισμό και τη μετάδοση εικόνας. Στις οφθαλμολογικές διατάξεις, δέσμη laser (συνήθως laser αργού ή laser κρυπτού) καθοδηγείται μέσω οπτικής ίνας σε μικροσκόπιο τύπου διόπτρας (τη σχισμοειδή λυχνία) για να εστιαστεί στις περιοχές του αμφιβληστροειδή που παρουσιάζουν πρόβλημα. Οπτικές ίνες επίσης χρησιμοποιούνται και για τη διακόσμηση εσωτερικών χώρων και το φωτισμό έργων τέχνης.