

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 9**  
**ΔΙΑΔΟΣΗ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΠΟΥ ΠΑΡΑΓΕΙ ΠΗΓΗ**  
**LASERΜΕΣΑ ΣΕ ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ**

**ΣΚΟΠΟΣ ΑΣΚΗΣΗΣ**

Σκοπός της εργαστηριακής αυτής άσκησης είναι η μελέτη της διάδοσης φωτεινής δέσμης laserμέσα σε οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

**ΘΕΩΡΙΑ**

Η λέξη Laser είναι ακρωνύμιο των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας). Ένα laser είναι ένας ενισχυτής φωτός ο οποίος παράγει μία έντονη δέσμη φωτονίων τα οποία έχουν την ίδια συχνότητα, φάση, διεύθυνση και πόλωση. Αυτή η ιδιαιτερότητα έχει ως αποτέλεσμα η φωτεινή δέσμη laser να ξεχωρίζει από μία κοινή δέσμη φωτός βάσει των εξής χαρακτηριστικών γνωρισμάτων:

- λαμπρότητα,
- μονοχρωματικότητα,
- συμφωνία και
- κατευθυντικότητα.

Το laser είναι μία συσκευή που παράγει σύγχρονο, μονοχρωματικό φως με υψηλή κατευθυντικότητα και χρησιμοποιείται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες για την μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων. Το μέσο μετάδοσης είναι η οπτική ίνα.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό της δέσμης laser είναι η συμφωνία, γι' αυτό και το φως του laserονομάζεται «σύμφωνο», σε αντίθεση με το κοινό φως που είναι ασύμφωνο. Μπορεί κανείς να φανταστεί το σύμφωνο φως σαν μία καλά οργανωμένη ομάδα στρατιωτών που περπατούν με συντονισμένο και συγχρονισμένο βήμα προς την ίδια κατεύθυνση και φορούν όλοι την ίδια στολή. Όπως ένα καλά οργανωμένο

στρατιωτικό τμήμα, έτσι και το φως του laser μπορεί να κάνει πράγματα τα οποία το λιγότερο οργανωμένο φως - ή αντίστοιχα η λιγότερο οργανωμένη ομάδα στρατιωτών - δεν μπορεί να κάνει τόσο καλά. Οι επιστήμονες έχουν κατορθώσει να ελέγχουν και να χειρίζονται το φως του laser εδώ και περισσότερα από 40 χρόνια έχοντας επιτύχει θαυμαστά αποτελέσματα συγκεκριμένα μήκη κύματος. Μόνο τα στάσιμα αυτά κύματα ενισχύονται από το οπτικό αντηχείο και ονομάζονται ρυθμοί του laser. Τελικά η οπτική έξοδος του laser (φωτεινή δέσμη) παράγεται όταν το κέρδος αντισταθμίζει τις απώλειες του συστήματος.

Στην περίπτωση της απομόνωσης ενός μόνο ρυθμού παράγεται αυστηρά μονοχρωματική ακτινοβολία, ενώ όταν οι ρυθμοί «κλειδώνονται» ως προς τις φάσεις τους μέσω μιας γραμμικής σχέσης, δημιουργείται συρμός στενά χρονικά παλμών. Οι παλμοί αυτοί μπορούν να γίνουν ακόμη πιο στενοί χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, οι οποίες εκμεταλλεύονται τις μη γραμμικές ιδιότητες του ενεργού υλικού καθώς και τη διασπορά της ομαδικής ταχύτητας.

Τα συστήματα laser που έχουν κατασκευασθεί μέχρι σήμερα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το αν το ενεργό τους υλικό είναι αέριο, υγρό ή στερεό. Έτσι υπάρχουν lasers αερίων, υγρών και στερεών αντίστοιχα.

Οι σύγχρονες τηλεπικοινωνίες με οπτικές ίνες βασίζονται στα διοδικά lasers (ανήκουν στην κατηγορία των laser στερεών) που στέλνουν σήματα μέσω των οπτικών ινών σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Μία δέσμη laser μπορεί να μεταφέρει εκατοντάδες ή και χιλιάδες τηλεπικοινωνιακές κλήσεις. Η πλειονότητα των τηλεπικοινωνιακών γραμμών με οπτικές ίνες συνδέουν πόλεις μεταξύ τους, ενώ η αρχή λειτουργίας του laser στηρίζεται στο φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής φωτός. Για να επιτευχθεί η εξαναγκασμένη εκπομπή, πρέπει να υπάρχει αναστροφή πληθυσμών μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών του ενεργού υλικού. Οι ενεργειακές στάθμες του laser είναι οι ενεργειακές στάθμες του ενεργού υλικού. Για να επιτευχθεί η αναστροφή πληθυσμών πρέπει να διεγερθεί το ενεργό υλικό και να υπάρχουν μία ή δύο ακόμη ενεργειακές στάθμες πέραν των δύο σταθμών laser. Η ενίσχυση του παραγόμενου φωτός επιτυγχάνεται με την ανάδραση, η οποία δημιουργείται τοποθετώντας το ενεργό υλικό του laser μεταξύ δύο κατόπτρων. Έτσι δημιουργείται ένα οπτικό αντηχείο το οποίο δημιουργεί στάσιμα κύματα μερρησιμοποιούνται ακόμη και σε γραμμές - ζεύξεις πολύ μεγάλων αποστάσεων που συνδέουν μεταξύ τους ολόκληρες ηπείρους (π.χ. υπερατλαντική ζεύξη).

Στην κατηγορία των lasers στερεών υπάγονται τα πολύ ενδιαφέροντα lasers

ημιαγωγών και οπτικών ινών, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες, όπου το μέσο μετάδοσης είναι η οπτική ίνα. Η φωτεινή δέσμη laser οδεύει μέσα σε καλώδιο οπτικών ινών.

Η οπτική ίνα στην απλούστερή της μορφή αποτελείται από ένα κεντρικό πυρήνα που περιβάλλεται από ένα περίβλημα του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι λίγο μικρότερος από τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Η οπτική ίνα είναι ένας γυάλινος κυματοδηγός κυλινδρικής διατομής. Η βασική της δομή περιλαμβάνει μια κεντρική κυλινδρική ράβδο, που ονομάζεται πυρήνας, και έναν σωλήνα, που περιβάλλει τον πυρήνα και ονομάζεται μανδύας. Για λόγους προστασίας από εξωτερικούς παράγοντες, ο μανδύας καλύπτεται από πρωτογενή επικάλυψη πλαστικού, γνωστή ως πρωτεύουσα επικάλυψη ή εξωτερικό περίβλημα. Ο πυρήνας και ο μανδύας είναι συνήθως κατασκευασμένοι από συνθετικό γυαλί υψηλής καθαρότητας με δείκτη διάθλασης 1,46. Ο πυρήνας περιλαμβάνει προσμίξεις  $\text{GeO}_2$  με δείκτη διάθλασης 1,48 και άλλες προσμίξεις, οι οποίες μεταβάλλουν τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα, επιτυγχάνοντας την απαιτούμενη χρησιμοποιούνται ακόμη και σε γραμμές - ζεύξεις πολύ μεγάλων αποστάσεων που συνδέουν μεταξύ τους ολόκληρες ηπείρους (π.χ. υπερατλαντική ζεύξη).

Στην κατηγορία των lasers στερεών υπάγονται τα πολύ ενδιαφέροντα lasers ημιαγωγών και οπτικών ινών, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες, όπου το μέσο μετάδοσης είναι η οπτική ίνα. Η φωτεινή δέσμη laser οδεύει μέσα σε καλώδιο οπτικών ινών.

Η οπτική ίνα στην απλούστερή της μορφή αποτελείται από ένα κεντρικό πυρήνα που περιβάλλεται από ένα περίβλημα του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι λίγο μικρότερος από τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Η οπτική ίνα είναι ένας γυάλινος κυματοδηγός κυλινδρικής διατομής. Η βασική της δομή περιλαμβάνει μια κεντρική κυλινδρική ράβδο, που ονομάζεται πυρήνας, και έναν σωλήνα, που περιβάλλει τον πυρήνα και ονομάζεται μανδύας. Για λόγους προστασίας από εξωτερικούς παράγοντες, ο μανδύας καλύπτεται από πρωτογενή επικάλυψη πλαστικού, γνωστή ως πρωτεύουσα επικάλυψη ή εξωτερικό περίβλημα.

Ο πυρήνας και ο μανδύας είναι συνήθως κατασκευασμένοι από συνθετικό γυαλί υψηλής καθαρότητας με δείκτη διάθλασης 1,46. Ο πυρήνας περιλαμβάνει προσμίξεις  $\text{GeO}_2$  με δείκτη διάθλασης 1,48 και άλλες προσμίξεις, οι οποίες μεταβάλλουν τον δείκτη διάθλασης του πυρήνα, επιτυγχάνοντας την απαιτούμενη διαφορά από τον δείκτη διάθλασης του μανδύα,  $\Delta n \approx 0,01$ , έτσι ώστε να υπάρχει διάδοση του φωτός.

Τυπικές τιμές συντελεστών διάθλασης είναι για τον πυρήνα  $n_1=1,47$  και για τον μανδύα  $n_2= 1,46$ .

Το οπτικό σήμα οδεύει στον πυρήνα της οπτικής ίνας μέσω του φαινομένου των διαδοχικών εσωτερικών ολικών ανακλάσεων στην κοινή επιφάνεια πυρήνα - μανδύα. Στο εσωτερικό του πυρήνα, μια φωτεινή ακτίνα φωτός προσπίπτει στην κοινή επιφάνεια με γωνία μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας, ανακλάται ολικά και συνεχίζει την διαδρομή της εντός του πυρήνα, μέσω συνεχών ανακλάσεων. Αντίθετα, εάν η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη της κρίσιμης γωνίας, το φως διαθλάται μέσα από τον μανδύα και χάνεται μετά από κάποια απόσταση.

Η μετάδοση της φωτεινής δέσμης laser μέσα σε οπτική ίνα εξαρτάται από την διάμετρο του πυρήνα, τους δείκτες διάθλασης του πυρήνα και του μανδύα και το μήκος κύματος της δέσμης που εκπέμπει η πηγή laser.

Οι οπτικές ίνες αποτελούν το περισσότερο τεχνολογικά προηγμένο ενσύρματο μέσο μετάδοσης στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Οι οπτικές ίνες κατηγοριοποιούνται ως προς:

- το υλικό κατασκευής πυρήνα και μανδύα,
- την μεταβολή του δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα στον μανδύα και
- το πλήθος των τρόπων μετάδοσης που υποστηρίζουν.

Οι οπτικές ίνες ανάλογα με το πλήθος των τρόπων μετάδοσης χωρίζονται στις μονότροπες (ένας τρόπος μετάδοσης) και στις πολύτροπες (πολλοί τρόποι μετάδοσης). Οι πολύτροπες ίνες υποστηρίζουν περισσότερους τρόπους μετάδοσης του ενός τρόπου και διακρίνονται στις ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης και στις ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης. Στις μονότροπες ίνες, το φως δεν μεταδίδεται με συνεχείς ανακλάσεις στα κοινά τοιχώματα πυρήνα / μανδύα, αλλά κινείται κατά μήκος του πυρήνα. Ο τρόπος αυτός είναι γνωστός σαν βασικός τρόπος μετάδοσης.

Στις οπτικές τηλεπικοινωνίες ως εξασθένηση ορίζεται η απώλεια της οπτικής ισχύος κατά την κυματοδήγηση. Τα βασικά φυσικά φαινόμενα, που καθορίζουν το κατώτερο όριο εξασθένησης στις γυάλινες οπτικές ίνες είναι η σκέδαση (οφείλεται στις απώλειες οπτικής ενέργειας λόγω ατελειών στην βασική δομή της ίνας) και η απορρόφηση (οφείλεται στο ότι το φως απορροφάται από το υλικό μετάδοσης και η ενέργεια του μετατρέπεται σε θερμότητα).

Οι οπτικές ίνες σχεδιάζονται έτσι ώστε να διατηρούν τις επιδόσεις τους, ως

προς την εξασθένηση και μετά την εγκατάστασή τους. Έχει όμως παρατηρηθεί ότι οι επιδόσεις αυτές μπορεί να επιδεινωθούν, υπό την επίδραση εξωτερικών παραγόντων, όπως λόγω κάμψης της ίνας κατά την εγκατάσταση του οπτικού καλωδίου, καθώς και λόγω έκθεσης της οπτικής ίνας σε περιβάλλοντα υδρογόνου και πυρηνικής ραδιενέργειας.

Εκτός του υλικού κατασκευής η εξασθένηση εξαρτάται και από το μήκος κύματος της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας. Έτσι, σε γυάλινες οπτικές ίνες, η εξασθένηση είναι μικρότερη στο υπέρυθρο μέρος του οπτικού φάσματος ( $\lambda > 800$  nm), στην περιοχή από 1200 έως 1600 nm, ενώ σε πλαστικές ίνες, η εξασθένηση είναι μικρότερη στην ορατή περιοχή του φάσματος γύρω στα 650 nm.

Τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών είναι τα ακόλουθα :

- Απεριόριστο εύρος ζώνης (το θεωρητικό όριο συχνότητας για μετάδοση σε υλικό με συντελεστή διάθλασης  $n=1,5$  με μήκος κύματος  $\lambda=1500$  nm, είναι :  $f_{max} = c/(\eta \cdot \lambda) = 3 \times 10^8 / 1,5 \times (1,5 \times 10^{-6}) = 1,3 \times 10^{14}$  Hz).
- Πολύ μικρή εξασθένηση που μόλις υπερβαίνει το 0,1 dB/km (για μονότροπες ίνες και  $\lambda=1500$  nm), επιτρέποντας την υλοποίηση οπτικών ζεύξεων σε απόσταση μεγαλύτερη των 200 km, χωρίς την χρήση ενδιάμεσων αναγεννητών.
- Μικρές διαστάσεις (η διατομή ίνας είναι περίπου ίση με 0,25mm, συμπεριλαμβανομένης και της πρωτεύουσας επικάλυψης του μανδύα).
- Μικρό βάρος
- Δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- Ασφαλές μέσο μετάδοσης
- Αδυναμία υποκλοπής
- Μονωτικό υλικό
- Χαμηλό κόστος κατασκευής

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

1. Δέσμη laser μήκους κύματος  $\lambda=1300\text{nm}$  οδεύει σε οπτική ίνα glass 62,5/125 μήκους 2Km. Να υπολογίσετε την θεωρητική τιμή της εξασθένησης χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο πίνακα.
2. Ποιος τύπος οπτικής ίνας παρουσιάζει την μικρότερη εξασθένηση ;
3. Να δικαιολογήσετε τις απαντήσεις σας.

*Πίνακας 8.1 Wavelength, Expected Attenuation, Observed Attenuation*

WAVELENGTH	EXPECTED ATTENUATION	OBSERVED ATTENUATION
Step Index 980/1000 $\mu\text{m}$ Plastic Fiber		
IR 940 nm	4.00 dB/m	4.00 dB/m
RED 635 nm	0.30 dB/m	0.28 dB/m
GREEN 565 nm	0.18 dB/m	0.20 dB/m
Graded Index 62.5/125 $\mu\text{m}$ Glass Fiber		
IR 940 nm	0.0018 dB/m	
IR 1300 nm	0.00052 dB/m	

## 8.4. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τα φυσικά μεγέθη, που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και τη μελέτη της λειτουργίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, μεταβάλλονται συχνά εντός ενός πολύ μεγάλου εύρους τιμών. Μερικά τέτοια φυσικά μεγέθη είναι η ενίσχυση - εξασθένηση ενός σήματος και το κέρδος μιας κεραίας.

Η χρήση του Decibel (dB), ως μονάδας μέτρησης, διευκολύνει την επεξεργασία πολύ μεγάλων ή πολύ μικρών τιμών τέτοιων φυσικών μεγεθών. Το Decibel, στην περίπτωση της ισχύος ενός τηλεπικοινωνιακού σήματος, ορίζεται ως εξής :  $1\text{dB}=10\log(P/P_0)$  όπου:

- $P_0$  : ισχύς αναφοράς της υπό μέτρηση ισχύος και
- $P$  : υπό μέτρηση ισχύς του σήματος.

Είναι φανερό ότι οι  $P$  και  $P_0$  έχουν τις ίδιες μονάδες μέτρησης, οπότε το πηλίκο τους είναι αδιάστατος αριθμός. Δηλαδή το dB δεν είναι μονάδα

μέτρησης της ισχύος ή ενός φυσικού μεγέθους γενικότερα, διότι εκφράζει το λόγο δύο ποσοτήτων (τιμών ισχύος) με ίδιες μονάδες μέτρησης. Στην πραγματικότητα το Decibel χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ενίσχυση ή την απώλεια ενός τηλεπικοινωνιακού σήματος σε σχέση με την τιμή αναφοράς. Για παράδειγμα αύξηση (μείωση) κατά 10dB της ισχύος του τηλεπικοινωνιακού σήματος σε σχέση με την αρχική τιμή, σημαίνει ότι η ισχύς του σήματος είναι δέκα φορές μεγαλύτερη (μικρότερη) από την αρχική τιμή της.

Όταν το υπό μέτρηση μέγεθος είναι η τάση (διαφορά δυναμικού) ή η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, το Decibel ορίζεται ως εξής:  $1dB=20\log(V/V_0)$  ή  $1dB=20\log(I/I_0)$ , όπου:

- $V_0$ : τάση αναφοράς της υπό μέτρηση τάσης,
- $V$  : υπό μέτρηση τάση,
- $I_0$  : ένταση αναφοράς της υπό μέτρηση έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος και
- $I$  : υπό μέτρηση ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Είναι φανερό ότι οι παράμετροι  $V$  και  $V_0$  έχουν τις ίδιες μονάδες μέτρησης, οπότε το πηλίκο τους είναι αδιάστατος αριθμός. Το ίδιο ισχύει και για τις  $I$  και  $I_0$ , οπότε το πηλίκο τους είναι επίσης αδιάστατος αριθμός. Δηλαδή το dB δεν είναι μονάδα μέτρησης της τάσης ή της έντασης, διότι εκφράζει το λόγο δύο ποσοτήτων (τιμών τάσης ή τιμών έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος) με ίδιες μονάδες μέτρησης.

Εάν χρησιμοποιηθούν ορισμένες ποσότητες ως μεγέθη αναφοράς, ορίζονται οι ακόλουθες μονάδες μέτρησης.

**Πίνακας 8.2 Μονάδες Μέτρησης**

<b>Μονάδα μέτρησης</b>	<b>Περιγραφή μονάδας μέτρησης</b>	<b>Μέγεθος αναφοράς</b>
dBm	dB ισχύος ως προς 1mW	1mW
dBW	dB ισχύος ως προς 1W	1W
dBμV	dB τάσης ως προς 1kV	1kV
dBmV	dB τάσης ως προς 1mV	1mV