

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ  
ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

ΑΣΚΗΣΗ 4

*“ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ”*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της άσκησης είναι η εισαγωγή στην τεχνογνωσία των οπτικών ινών.

Οι οπτικές ίνες άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την μετάδοση οπτικών σημάτων την δεκαετία του 1960. Αρχικά ο συντελεστής διάδοσης περιοριζόταν σε μόλις 0.1% km<sup>-1</sup>. Σήμερα η απόδοση των μονορυθμικών ινών έχει αυξηθεί σε 93% και των πολυρυθμικών σε 70% km<sup>-1</sup>. Η διάμετρος των μονορυθμικών ινών είναι της τάξης των 8 μm ενώ των πολυρυθμικών κυμαίνεται από 50 μm ως 1 mm. Ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται συνήθως γυαλί. Οπτικές ίνες από πλαστικό χρησιμοποιούνται για την κάλυψη μικρών αποστάσεων λόγω του περιορισμένου συντελεστή διάδοσης της τάξης του 1.0% km<sup>-1</sup>.

Σημαντικά πλεονεκτήματα της χρήσης οπτικών ινών είναι ότι :

- έχουν μικρή διάμετρο, μικρό βάρος και είναι εύκαμπτες.
- έχουν μεγάλο εύρος ζώνης : μέχρι και 20000 τηλεφωνικές συνδιαλέξεις μπορούν να μεταδοθούν μέσω οπτικής ίνας με διάμετρο 8 μm, ενσωματωμένης σε καλώδιο διαμέτρου 3 mm.
- δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις (EMI, RFI) και μηχανικούς κραδασμούς.
- δεν επηρεάζονται από βρόχους γείωσης (ground loop) και διάζευξης (cross talk).
- είναι ανθεκτικές σε θερμοκρασιακές και χημικές μεταβολές.

Μειονεκτήματα αποτελούν ότι :

- απαιτούν υψηλό κόστος εγκαταστάσεων ενίσχυσης και μετατροπής του οπτικού σήματος σε αναλογικό.
- απαιτούν σχετικά υψηλό κόστος συντήρησης.
- είναι δύσκολο να κατασκευασθούν οπτικοί συζεύκτες χαμηλών απωλειών. Ιδιαίτερα σε συζεύκτες μονορυθμικών ινών οι απώλειες ανέρχονται σε 15%.
- είναι σχετικά εύθραυστες.

Παρά τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν, οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές που αφορούν τις τηλεπικοινωνίες, την ιατρική, την βιομηχανία, τον στρατό και την έρευνα.

## ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Η διάδοση του φωτός στις οπτικές ίνες είναι αποτέλεσμα πολλαπλών εσωτερικών ολικών ανακλάσεων.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες οπτικών ινών ανάλογα με την κατανομή του δείκτη διάθλασης :

- α. ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης (ή κλιμακωτές ίνες)
  - β. ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης
- και

δύο κατηγορίες οπτικών ινών ανάλογα με το πλήθος των διαδιδόμενων ρυθμών (ή τρόπων) :

- α'. μονορυθμικές ίνες  
β'. πολυρυθμικές ίνες

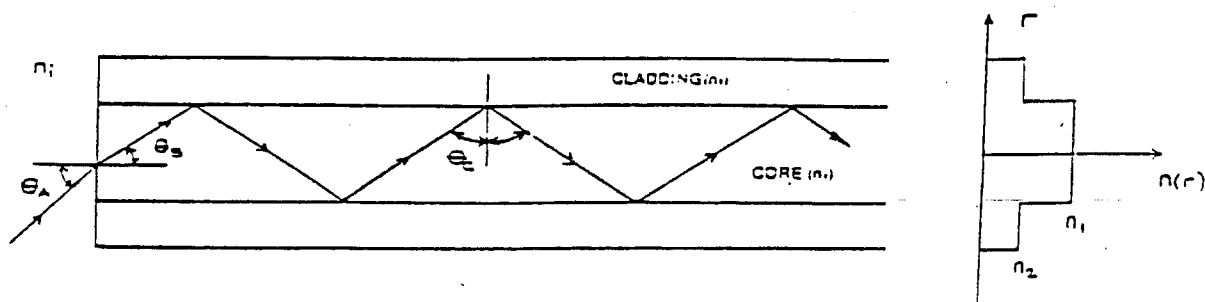
### α. Κλιμακωτές ίνες

Η κλιμακωτή ίνα αποτελείται από πυρήνα και περίβλημα με δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  αντίστοιχα. Για να περιορισθεί μια φωτεινή δέσμη στο εσωτερικό της ίνας πρέπει να διαδίδεται υπό γωνία μεγαλύτερη ή ίση προς την γωνία ολικής ανάκλασης. Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης παρατηρείται μόνο κατά την διάδοση από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο υλικό μέσο. Συνεπώς ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα  $n_1$  οφείλει να είναι μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης του περιβλήματος  $n_2$ . Στην περίπτωση αυτή όλες οι φωτεινές ακτίνες θα διαθλασθούν κατά την είσοδό τους στην ίνα ακολουθώντας τον νόμο του Snell με κατεύθυνση προς τον άξονα της ίνας. Ακτίνες με γωνία μικρότερη της οριακής γωνίας ολικής ανάκλασης θα διαδοθούν στο περίβλημα. Το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας (NA) καθορίζεται από την γωνία για την οποία δέσμη εισερχόμενη στην ίνα διαδίδεται με ολικές εσωτερικές ανακλάσεις μέσω της ίνας.

- (1)  $NA = n_1 \sin \theta_A$   $n_1 \approx 1$  στον αέρα  
(2)  $\sin \theta_c = n_2 / n_1$  ολική εσωτερική ανάκλαση στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος  
(3)  $\theta_B = 90 - \theta_c$   
(4)  $\sin \theta_A \cdot 1 = \sin \theta_B \cdot n_1$  νόμος του Snell στην διαχωριστική επιφάνεια αέρα-πυρήνα

Με αντικατάσταση των (1), (2) και (3) στην (4) :

$$NA = \sin \theta_A = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$



Σχ. 1. Διάδοση δέσμης σε οπτική ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κλιμακωτών ινών :

- ίνες με πυρήνα και περίβλημα από γυαλί.
- ίνες με πυρήνα από γυαλί και πλαστικό περίβλημα.
- ίνες με πυρήνα και περίβλημα από πλαστικό.

Γενικά ίνες από πλαστικό (all-plastic) ή ίνες με πλαστικό περίβλημα (PCS = plastic cladded silica) εξασφαλίζουν μεγαλύτερο αριθμητικό άνοιγμα και

επομένως μεγαλύτερη γωνία εισόδου της δέσμης στον πυρήνα ("γωνία κώνου υποδοχής") απ' ό,τι οι ίνες από γυαλί (all-glass). Από την άλλη πλευρά, ίνες από γυαλί παρέχουν δυνατότητα επιλογής του δείκτη διάθλασης σε μία ευρεία περιοχή τιμών. Ακολουθεί πίνακας με αντιπροσωπευτικές τιμές των δεικτών διάθλασης πυρήνα-περιβλήματος, του αριθμητικού ανοίγματος και της γωνίας εισόδου της δέσμης στην ίνα.

Construction	$n_1$	$n_2$	NA	$\alpha_0$
All-glass	1.48	1.46	0.24	13.9°
PCS	1.46	1.4	0.41	24.2°
All-plastic	1.49	1.39	0.53	32°

Πίνακας 1.

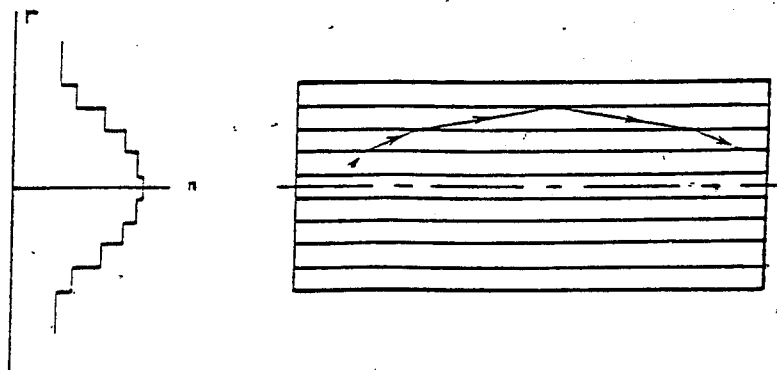
### β. Ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης

Σε ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα δεν έχει σταθερή τιμή, αλλά είναι μεγαλύτερος στο κέντρο της ίνας και μειώνεται σταδιακά από τον πυρήνα προς το περίβλημα μέχρι προσαρμογής του στην τιμή του δείκτη διάθλασης του περιβλήματος. Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης περιγράφεται ως :

$$n(r) = n_1 [1 - (r/a)^2 \Delta] \quad \text{για } r < a$$

$$n(r) = n_1 [1 - \Delta] = n_2 \quad \text{για } r \geq a$$

όπου  $a$  : διάμετρος πυρήνα και  $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$



Σχ. 2. Διάδοση δέσμης σε οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης.

Αξονικές ακτίνες διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα  $v_{ph} = c/n_1$  απ' ό,τι περιφερειακές ακτίνες με αποτέλεσμα να αντισταθμίζεται η καθυστέρηση των περιφερειακών ακτίνων (που διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις λόγω της διάδοσης μέσω πολλαπλών ολικών ανακλάσεων) έναντι των

αξονικών (που διαδίδονται ευθυγράμμως κατά μήκος του άξονα της ίνας). Ακτίνες που συναντούν τον άξονα της ίνας σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης επιστρέφουν προς τον άξονα αφού διανύσουν μικρή απόσταση. Αντίθετα ακτίνες μεγαλύτερων γωνιών πρόσπτωσης διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις και συναντούν την διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος, όπου η διαφορά των δεικτών διάθλασης είναι μηδενική, με αποτέλεσμα να περιορίζονται στο περίβλημα. Γενικά σε ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης μειώνεται η χρονική καθυστέρηση περιφερειακών ακτίνων (ακτίνων μεγαλύτερων γωνιών πρόσπτωσης) ως προς τις αξονικές (ακτίνες μικρών γωνιών πρόσπτωσης), -βλ. και "διασπορά ρυθμών", με αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους ζώνης  $v_{max}$ .

### α'. Πολυρυθμικές ίνες

Στις πολυρυθμικές ίνες διαδίδονται πολλοί ρυθμοί, που αντιστοιχούν σε ακτίνες διαφορετικών διευθύνσεων και επομένως διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης. Το πλήθος των ρυθμών σε ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης προσδιορίζεται στα πλαίσια της θεωρίας του Maxwell ως :

$$N = V^2/2, \quad V = \pi d (NA) / \lambda$$

όπου  $d$  : διάμετρος του πυρήνα  
 $\lambda$  : μήκος κύματος

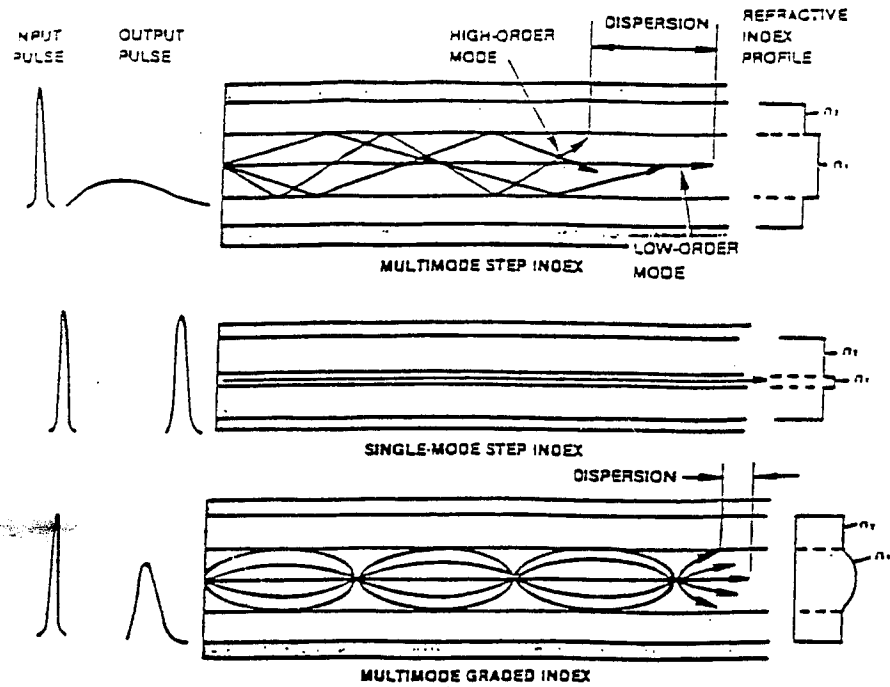
Σε πολυρυθμική ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης διαμέτρου πυρήνα 50  $\mu\text{m}$ , δείκτη διάθλασης πυρήνα  $n_1 = 1.48$  και δείκτη διάθλασης περιβλήματος  $n_2 = 1.46$  είναι δυνατή η διάδοση 1078 ρυθμών ακτινοβολίας μήκους κύματος  $\lambda = 0.82 \mu\text{m}$ .

Υψηλοί ρυθμοί, που αντιστοιχούν σε περιφερειακές ακτίνες, διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις απ' ό,τι χαμηλοί ρυθμοί, που αντιστοιχούν σε αξονικές ακτίνες με αποτέλεσμα οι περιφερειακές ακτίνες να καθυστερούν χρονικά έναντι των αξονικών. Ένας παλμός εισόδου παρουσιάζεται στην έξοδο της ίνας διευρυμένος (παραμορφωμένος), αφού διαφορετικοί ρυθμοί φθάνουν στην έξοδο της ίνας σε διαφορετικά χρονικά σημεία. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως "διασπορά των ρυθμών".

### β'. Μονορυθμικές ίνες

Όπως προκύπτει από την θεωρία του Maxwell, διάδοση ενός μόνο ρυθμού είναι δυνατή όταν  $V=2.405$  και επομένως όταν η διάμετρος του πυρήνα  $d \leq 2.405 \lambda / \pi NA$ .

Η διάμετρος του πυρήνα οπτικής ίνας κατάλληλης για την διάδοση ενός μόνου ρυθμού στα 0.82  $\mu\text{m}$  περιορίζεται έτσι σε  $d=5.7 \mu\text{m}$ . Μονορυθμικές ίνες μεγαλύτερης διαμέτρου μπορούν προφανώς να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Η διάμετρος του πυρήνα μπορεί να αυξηθεί, αν μειωθεί το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας. Στην πράξη, μονορυθμικές ίνες έχουν διάμετρο πυρήνα μεταξύ 3 και 10  $\mu\text{m}$  για μήκη κύματος μεταξύ 440 και 1550 nm. Οι μονορυθμικές ίνες είναι απαλλαγμένες από το φαινόμενο της διασποράς των ρυθμών και επομένως έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε αντιστάθμισμα της περιορισμένης αποδοτικότητας ζεύξης με πηγές φωτός και της σημαντικά μειωμένης ισχύος που μεταφέρουν.



Σχ. 3. Διάδοση ρυθμών σε πολυρυθμική και μονορυθμική ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης και σε πολυρυθμική ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης.

### ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ

Η παραμόρφωση παλμών κατά την διάδοσή τους μέσω οπτικών ινών οφείλεται σε φαινόμενα διασποράς. Φαινόμενα διασποράς που οδηγούν σε διεύρυνση του παλμού, παρατηρούνται όταν:

- μονοχρωματικός παλμός διασπείρεται σε πολλούς ρυθμούς με διαφορετικούς χρόνους διάδοσης  $\Delta t$  (διασπορά των ρυθμών).

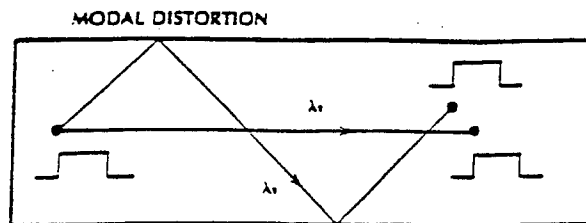
$$\Delta t = (NA)^2 / 2n_2c, \quad v_{max} = 1/\Delta t$$

NA : αριθμητικό άνοιγμα ίνας

$n_2$  : δείκτης διάθλασης περιβλήματος

c : ταχύτητα φωτός

$v_{max}$  : εύρος ζώνης

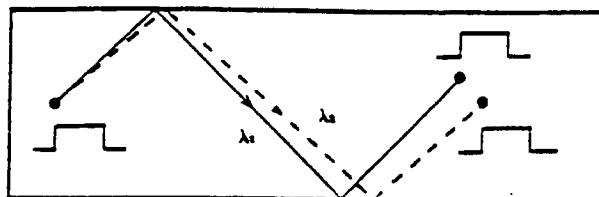


παλμοί με διαφορετικά μήκη κύματος που ανήκουν στον ίδιο ρυθμό διαδίδονται σε διαφορετικές γωνίες, αφού η γωνία διάθλασης  $\theta(\lambda)$  εξαρτάται από το μήκος κύματος (διασπορά του κυματοδηγού).

$$\Delta\tau = L (n_1/c) \sin\theta (d\theta/d\lambda) \Delta\lambda$$

- L : μήκος ίνας
- $\theta$  : γωνία κώνου υποδοχής
- $n_1$  : δείκτης διάθλασης πυρήνα
- $\lambda$  : μήκος κύματος ακτινοβολίας
- c : ταχύτητα φωτός

WAVEGUIDE DISPERSION

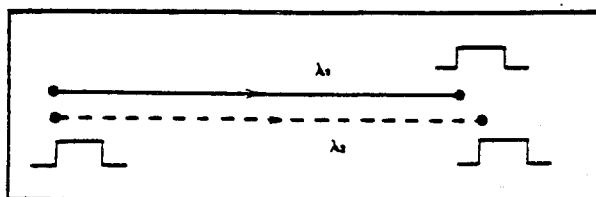


παλμοί με διαφορετικά μήκη κύματος έχουν διαφορετικές ταχύτητες αφού ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα  $n_2(\lambda)$  εξαρτάται από το μήκος κύματος (διασπορά του μέσου).

$$\Delta\tau = L (\lambda^2/c) (d^2n/d\lambda^2) (\Delta\lambda/\lambda)$$

- L : μήκος ίνας
- n : δείκτης διάθλασης
- $\lambda$  : μήκος κύματος ακτινοβολίας
- c : ταχύτητα φωτός

MATERIAL DISPERSION



## ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗ

Η εξασθένιση σήματος οφείλεται σε μείωση της ισχύος κατά την διάδοση. Στις οπτικές ίνες η εξασθένιση μετράται σε decibells ανά χιλιόμετρο (dB/km) και ορίζεται ως :

$$L \text{ (dB)} = 10 \log (P_0/P_1)$$

όπου  $P_0$  και  $P_1$  είναι η ισχύς εξόδου και εισόδου αντίστοιχα.

Η εξασθένηση του σήματος οφείλεται σε δύο κυρίως αιτίες :

### Απορρόφηση

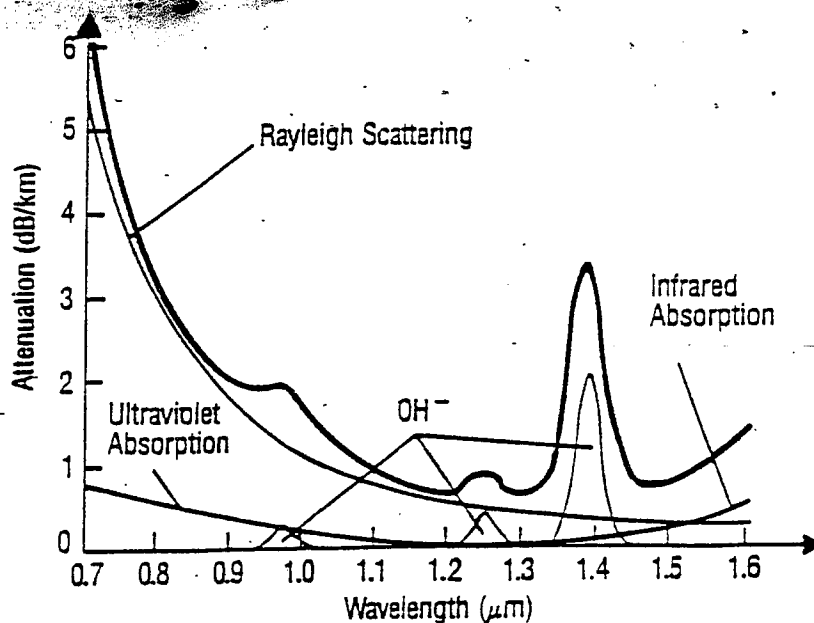
Προσμίξεις του πυρήνα αποτελούν σημαντικό παράγοντα εξασθένησης του σήματος. Δύο κυρίως είδη προσμίξεων προκαλούν απορρόφηση : ιόντα μετάλλων μετάπτωσης, όπως χαλκός, σίδηρος, κοβάλτιο, χρώμιο και ομάδες υδροξυλίου ( $\text{OH}^-$ ), που προέρχονται από μόρια νερού.

Το ποσοστό αυτών των προσμίξεων δεν πρέπει να υπερβαίνει την τάξη των  $\text{ppb}$ , ώστε οι απώλειες να περιορίζονται σε  $20 \text{ dB/km}$ . Η απορροφούμενη ένταση είναι :  $I \sim \lambda$ .

### Σκέδαση

Φαινόμενα σκέδασης παρατηρούνται όταν η ίνα έχει δομικές ατέλειες. Ανομοιογένειες του υλικού, γεωμετρικές ατέλειες και μικροσκοπικές κάμψεις κατά την διαδικασία παρασκευής και τυλίγματος της ίνας προκαλούν φαινόμενα εξασθένησης. Η γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος μεταβάλλεται έτσι, ώστε μερικές ακτίνες να σκεδάζονται σε γωνίες, που δεν ικανοποιούν την συνθήκη ολικής ανάκλασης. Μακροσκοπικές κάμψεις, που παρουσιάζονται κατά την προσπάθεια τυλίγματος της ίνας, προκαλούν επίσης φαινόμενα εξασθένησης. Γενικά οι οπτικές ίνες μπορούν να καμφθούν κατά 150 φορές την διάμετρο του περιβλήματος πριν σπάσουν !

Φαινόμενα σκέδασης Rayleigh οφείλονται σε δομικές ατέλειες και ανομοιογένειες από περιοχές του υλικού με μέγεθος συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του διαδιδόμενου φωτός. Η ένταση του σκεδαζομένου φωτός είναι :  $I \sim 1/\lambda^4$ .



Σχ. 4. Μηχανισμοί απορρόφησης σε οπτική ίνα από γυαλί ως συνάρτηση του μήκους κύματος



## ΑΣΚΗΣΗ 4.1.

## ΣΥΖΕΥΞΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ - ΔΕΣΜΗΣ LASER

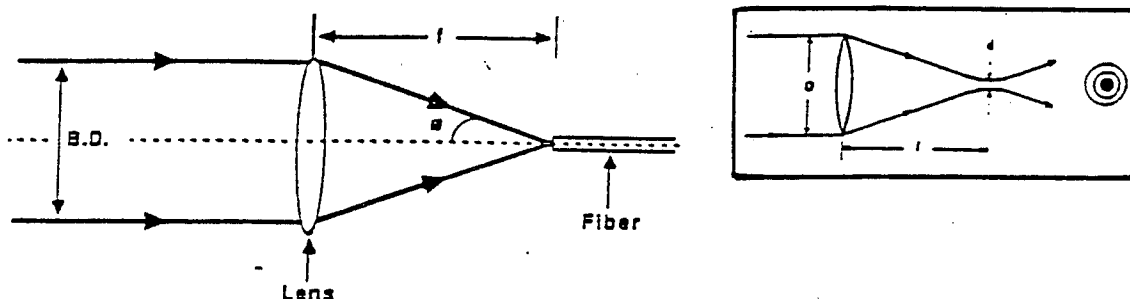
Στην άσκηση αυτή θα ασχοληθούμε με την αποδοτική σύζευξη οπτικής ίνας και πηγής φωτός (laser He-Ne).

Στο σχήμα 1. απεικονίζεται η εστίαση παραλλήλου δέσμης φωτός σε οπτική ίνα μέσω λεπτού φακού.

Λόγω φαινομένων περίθλασης, η δέσμη δεν συγκλίνει σε σημειακή εστία, αλλά παρουσιάζεται ως φωτεινός δίσκος περιβαλλόμενος από ομόκεντρους δακτύλιους (δίσκους του Airy), των οποίων η ένταση εξασθενεί από το κέντρο προς την περιφέρεια της εικόνας (Σχ. 1, ένθετο). Στον κεντρικό δίσκο συγκεντρώνεται το 95% της ισχύος δέσμης laser με προφίλ Gauss. Το μέγεθος δέσμης με προφίλ Gauss καθορίζεται από την απόσταση για την οποία η αρχική ένταση  $I_0$  μειώνεται στο  $1/e^2$  ως :

$$I = I_0 \exp(-2(r/w)^2)$$

$w$  : διάμετρος δέσμης με προφίλ Gauss



Σχ. 1. Σύζευξη πηγής φωτός - ίνας

Για αποδοτική σύζευξη πηγής-ίνας, η διάμετρος της ίνας οφείλει να είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο της δέσμης και το αριθμητικό άνοιγμα της δέσμης οφείλει να προσαρμοσθεί στο αριθμητικό άνοιγμα της ίνας. Το αριθμητικό άνοιγμα της δέσμης για μικρές γωνίες  $\theta$  ορίζεται ως :

$$NA_{\text{δέσμης}} = \text{διάμετρος δέσμης (B.D.)} / 2 \times \text{εστιακή απόσταση φακού (f)}$$

$$\text{εφόσον } \tan \theta \approx \sin \theta = NA_{\text{δέσμης}} = (\text{B.D.}/2)/f$$

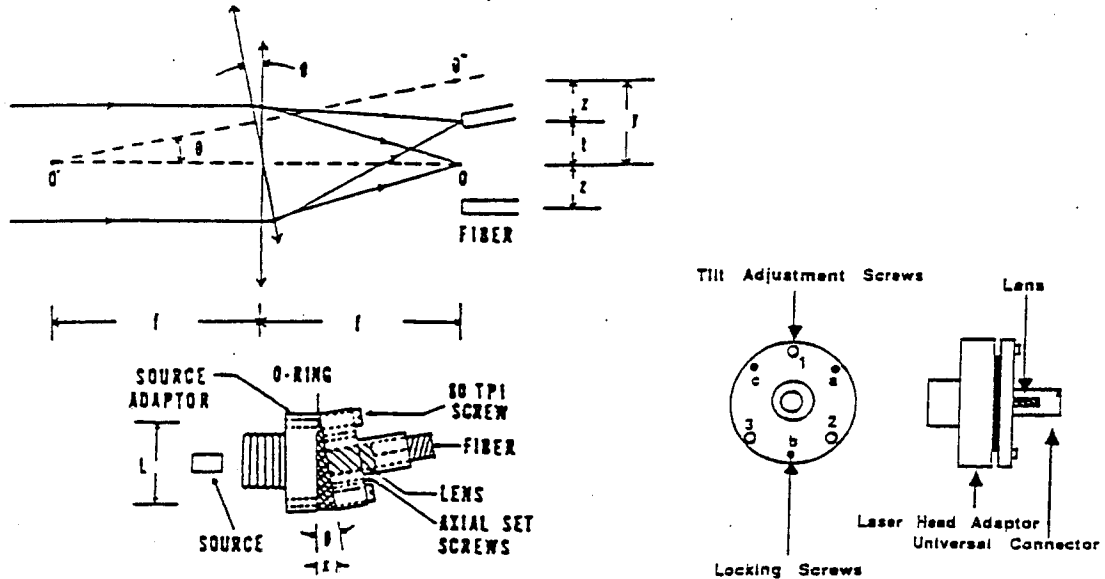
Σύζευξη για την οποία 75% της ισχύος εισόδου φθάνουν στην έξοδο της ίνας μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική. Ιδανική θεωρείται σύζευξη με απόδοση μεγαλύτερη από 90%, που επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή των συζευγμένων στοιχείων και ρύθμιση του συζεύκτη.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

## Εξαρτήματα :

- laser He-Ne
- Συζεύκτης laser-ίνας
- Πολυρυθμική ίνα (χρώμα γκρι)
- στήριγμα ίνας
- φωρατής

Στο σχήμα 2. απεικονίζεται ο τρόπος λειτουργίας του συζεύκτη.

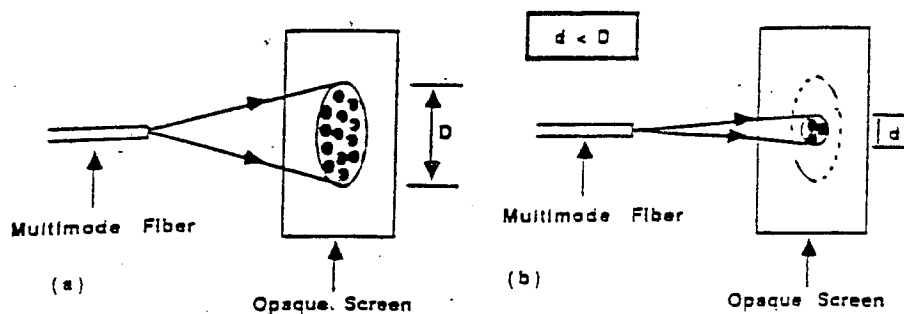


Σχ. 2. Ρύθμιση συζεύκτη πηγής-ίνας

Αποδοτική σύζευξη επιτυγχάνεται μέσω ελέγχου της γωνίας μεταξύ δέσμης laser και φακού εστίασης.

Ο συζεύκτης πηγής-ίνας αποτελείται από δύο τμήματα (Σχ. 2.). Το ένα τμήμα περιλαμβάνει τον φακό εστίασης, ενώ το άλλο προσαρμόζεται στην έξοδο του laser. Τα δύο τμήματα συγκρατούνται με τις βίδες στήριξης (Locking Screws). Η γωνία του ενός τμήματος προς το άλλο ρυθμίζεται με τις βίδες ρύθμισης (Adjustment Screws).

Στην άσκηση αυτή χρησιμοποιείται πολυρυθμική ίνα, διότι είναι σχετικά εύκολο να ρυθμισθεί η γωνία μεταξύ των δύο τμημάτων του συζεύκτη κατά την ζεύξη ίνας σχετικά μεγάλης διαμέτρου πυρήνα (50  $\mu\text{m}$ ). Στόχος είναι να εστιασθεί η δέσμη στο κέντρο του πυρήνα. Αν η δέσμη εστιασθεί στην περιφέρεια του πυρήνα διαγείρονται περιφερειακές ακτίνες. Το φωτεινό ίχνος στην έξοδο της ίνας μεγαλώνει τόσο περισσότερο, όσο η δέσμη απομακρύνεται από το κέντρο του πυρήνα (Σχ. 3α.). Με ρύθμιση της κλίσης του φακού εστίασης η δέσμη μπορεί να εστιασθεί στο κέντρο του πυρήνα και να διεγερθούν αξονικές ακτίνες με αποτέλεσμα την συγκέντρωση της ισχύος της δέσμης στο κέντρο του φωτεινού ίχνους (Σχ. 3β.).



Σχ. 3. Μεταβολές της απεικόνισης κατά την ρύθμιση του συζεύκτη.

### Μετρήσεις :

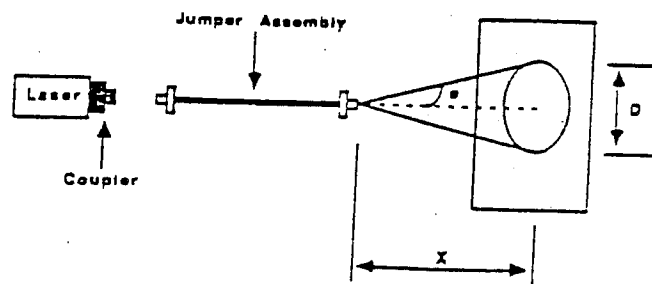
1. Αναγνωρίστε τα εξαρτήματα.

2. Βάλτε σε λειτουργία τον laser. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης με τον φωρατή. Χρησιμοποιήστε την καμπύλη βαθμονόμησης του φωρατή για την μετατροπή του σήματος από Volt σε Watt.
3. Προσαρμόστε τον συζεύκτη στην έξοδο του laser. Ελέγξτε την ποιότητα της εικόνας με την βοήθεια οθόνης ή λευκού φύλλου χαρτιού. Το είδωλο της δέσμης πρέπει να απεικονίζεται πάνω στον άξονα του laser. Αν η εικόνα δεν είναι κεντραρισμένη, ρυθμίστε την θέση του φακού εστίασης ως προς την δέσμη μέχρι να κεντραρισθεί.
4. Συνδέστε την πολυρυθμική ίνα με τον συζεύκτη. Ρυθμίστε κυκλικά τις βίδες ρύθμισης προσπαθώντας να συγκεντρώστε όσο το δυνατόν περισσότερο φως στο κέντρο του φωτεινού ίχνους στην έξοδο της ίνας. Όταν η φωτεινότητα του ίχνους κριθεί ικανοποιητική στερεώστε τα τμήματα του συζεύκτη με τις βίδες στήριξης.
5. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της ίνας, προσαρμόζοντας τον οπτικό ευθυγραμμιστή στον φωρατή.
6. Υπολογίστε την εξασθένιση της δέσμης (IL) σε dB από την σχέση :  $IL = 10 \log_{10}(P_{out} / P_{in})$ .

#### ΑΣΚΗΣΗ 4.2.

#### ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Στην άσκηση αυτή θα προσδιορίσουμε το αριθμητικό άνοιγμα οπτικής ίνας από τις διαστάσεις του φωτεινού ίχνους στην έξοδο της ίνας και την απόσταση στην οποία θα απεικονίσουμε το φωτεινό ίχνος (Σχ. 4).



Σχ. 4. Μέτρηση του αριθμητικού ανοίγματος οπτικής ίνας

#### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

##### Εξαρτήματα :

- εξαρτήματα άσκησης 4.1
- οθόνη
- μετροταινία, χαρτί μιλλιμετρέ

### Μετρήσεις :

1. Χρησιμοποιήστε την διάταξη της άσκησης 4.1.
2. Αναγνωρίστε τα επί πλέον εξαρτήματα.
3. Στερεώστε το χαρτί μιλλιμετρέ σε οθόνη απέναντι από το άκρο της ίνας. Μετρήστε την απόσταση της οθόνης από το άκρο της ίνας ( $x$ ) και την διάμετρο ( $D$ ) της δέσμης πάνω στην οθόνη.
4. Επαναλάβετε το 3ο βήμα 6 φορές μετατοπίζοντας κάθε φορά την οθόνη κατά μερικά εκατοστά.
5. Καταχωρήστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε διάγραμμα  $D(x)$ .
6. Προσδιορίστε την γωνία του κώνου υποδοχής ( $\theta$ ) και το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας ( $NA$ ) από το διάγραμμα σύμφωνα με τις σχέσεις :  $NA = \sin\theta$  ,  $\tan\theta = (D/2)/x$
7. Προσδιορίστε το αριθμητικό άνοιγμα του συστήματος laser-συζεύκτης από την σχέση :  $NA_{\text{δέσμης}} = (B.D.)/2f$  ,  $B.D.=3\text{mm}$ ,  $f=1\text{mm}$   
Συγκρίνετε το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας με αυτό της δέσμης.

### ΑΣΚΗΣΗ 4.3.

#### ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ ΣΕ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΔΕΣΜΗ

Στην άσκηση αυτή θα ασχοληθούμε με την μετατροπή της δέσμης εξόδου οπτικής ίνας σε παράλληλη δέσμη με την βοήθεια οπτικού-ευθυγραμμιστή (collimator).

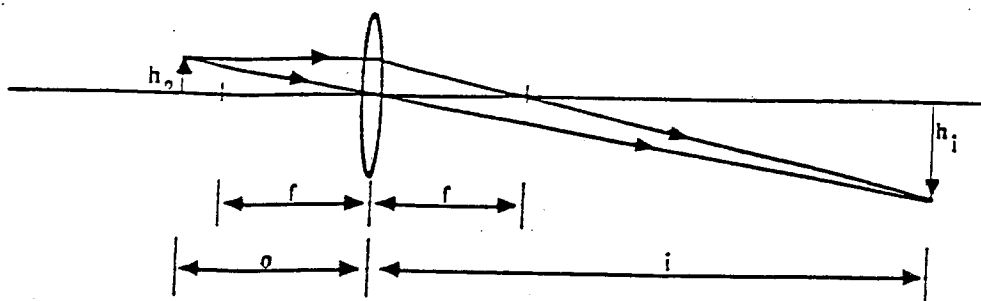
Ο ευθυγραμμιστής περιλαμβάνει λεπτό φακό, μέσω του οποίου η δέσμη στην έξοδο της ίνας μετατρέπεται σε παράλληλη δέσμη. Για τον σκοπό αυτό η έξοδος της ίνας τοποθετείται στο εστιακό επίπεδο του φακού. Ο ευθυγραμμιστής θα χρησιμοποιηθεί επί πλέον στην άσκηση 4.4. για την σύζευξη δύο οπτικών ινών.

Στο σχήμα 5. παρουσιάζεται η απεικόνιση αντικειμένου με την βοήθεια λεπτού φακού.

Η θέση του ειδώλου προσδιορίζεται ως σημείο τομής ακτίνας παράλληλης προς τον οπτικό άξονα του φακού και ακτίνας που διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού. Η εγκαρσία μεγένθυση προσδιορίζεται από τον λόγο των αποστάσεων ειδώλου-αντικειμένου. Ισχύει η εξίσωση των λεπτών φακών :

$$1/o + 1/i = 1/f \text{ και } M = h_i/h_o = i/o$$

- $o$  : απόσταση αντικειμένου  
 $i$  : απόσταση ειδώλου  
 $f$  : εστιακή απόσταση φακού  
 $M$  : εγκαρσία μεγένθυση

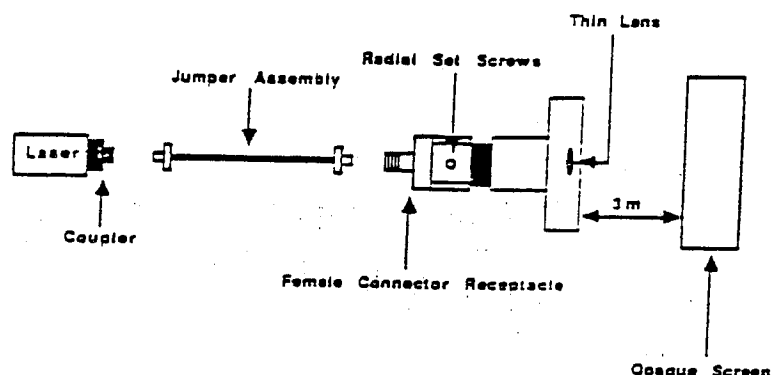


Σχ. 5. Απεικόνιση αντικειμένου μέσω λεπτού φακού

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

### Εξαρτήματα :

- εξαρτήματα άσκησης 4.1 και 4.2
- ευθυγραμμιστής δέσμης (συζεύκτης ινών)



Σχ. 6. Σύζευξη ευθυγραμμιστή δέσμης - ίνας.

### Μετρήσεις :

1. Χρησιμοποιήστε την διάταξη της άσκησης 4.2.
2. Αναγνωρίστε τα επί πλέον εξαρτήματα.
3. Στερεώστε τον ευθυγραμμιστή δέσμης στην έξοδο της ίνας. Χαλαρώστε τις βίδες στήριξης στην περιφέρεια του ευθυγραμμιστή. Παρατηρώντας στην οθόνη την έξοδο της δέσμης από τον ευθυγραμμιστή, στρέψτε τον συζεύκτη μέχρι να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος του φωτεινού ίχνους της δέσμης. Στην θέση αυτή το άκρο της ίνας έχει εισέλθει στο εστιακό επίπεδο του φακού.
4. Στρέψτε τον συζεύκτη 180° προς τα αριστερά. Μετρήστε την απόσταση οθόνης-ευθυγραμμιστή. Αυτή είναι η απόσταση του ειδώλου.

5. Προσδιορίστε την απόσταση του αντικείμενου προσθέτοντας στην εστιακή απόσταση του φακού ( $f = 1 \text{ mm}$ ) την μετατόπιση του συζεύκτη, δεδομένου ότι σε στροφή  $360^\circ$  αντιστοιχεί μετατόπιση  $0.454 \text{ mm}$ .
6. Υπολογίστε την απόσταση του ειδώλου από την εξίσωση των λεπτών φακών και συγκρίνετε το αποτέλεσμα με το αποτέλεσμα της μέτρησης του 4ου βήματος.
7. Σχολιάστε το αποτέλεσμα την περίπτωση που στο 4ο βήμα ο συζεύκτης στραφεί  $180^\circ$  προς τα δεξιά.

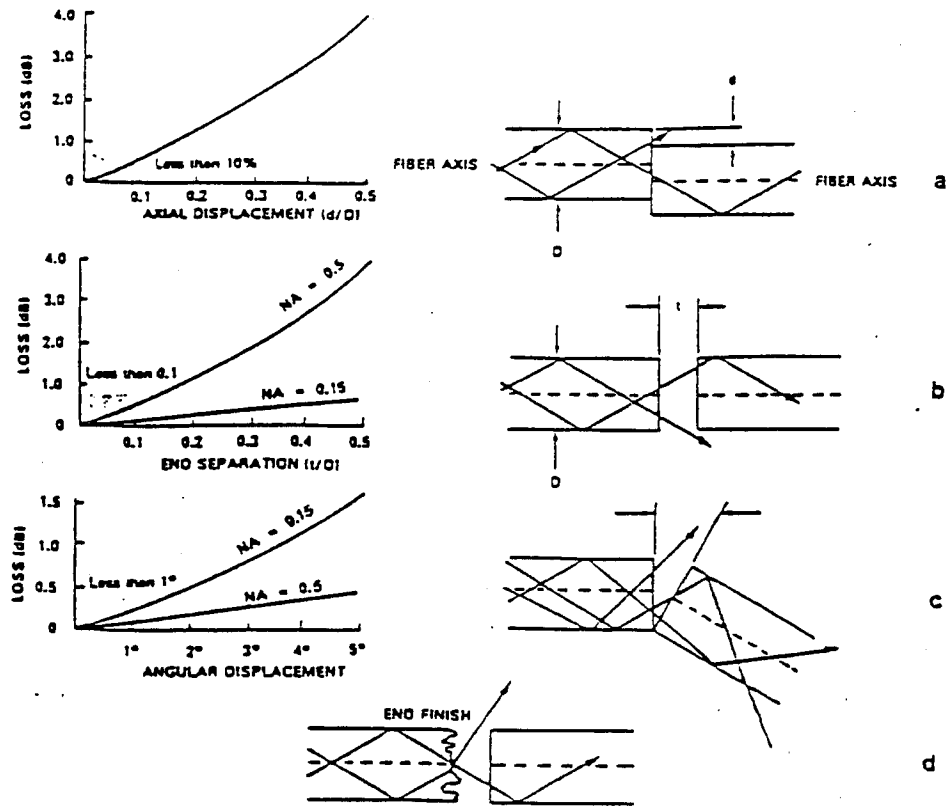
#### ΑΣΚΗΣΗ 4.4.

##### ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΔΕΣΜΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΖΕΥΞΗ ΔΥΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Στην άσκηση αυτή ασχολούμεθα με την ζεύξη μεταξύ οπτικών ινών. Απαιτείται λεπτή ρύθμιση προς αντιμετώπιση των διαφορών των συζευγμένων ινών.

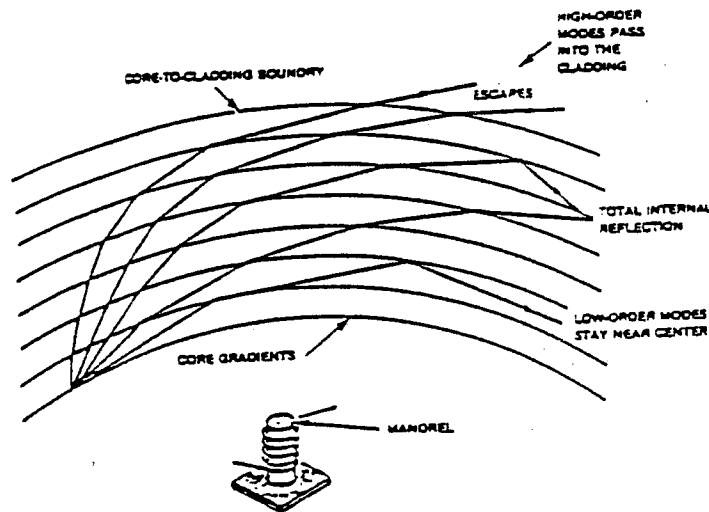
Η ζεύξη μεταξύ οπτικών ινών εξαρτάται από τους εξής παράγοντες :

1. **πλευρική απόκλιση** : Είναι η σημαντικότερη αιτία απωλειών (βλ. Σχ. 6a.) και παρουσιάζεται όταν οι άξονες των συζευγμένων ινών είναι παράλληλα μετατοπισμένοι μεταξύ τους.
2. **γωνιακή απόκλιση** : Παρουσιάζεται όταν οι άξονες των συζευγμένων ινών σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους (Σχ. 6c).
3. **χωρισμός άκρων** : Το φως που αναδύεται από το άκρο της μίας ίνας διαχέεται στον κώνο υποδοχής της άλλης. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση της δεύτερης ίνας από την πρώτη, τόσο λιγότερο φως μπορεί να δεσμεύσει αυτή (Σχ. 6b.). Όταν η απόσταση μεταξύ των ινών μηδενισθεί, δεν υπάρχουν θεωρητικά απώλειες. Στην πράξη, ατέλειες των άκρων των ινών και ακαθαρσίες προκαλούν πάντα κάποιες απώλειες.
4. **κατεργασία άκρων** : Επιφανειακές ατέλειες, ακαθαρσίες και χαραγές αποτελούν παράγοντες εξασθένησης (Σχ. 6d.).
5. **εσωτερικές απώλειες** : Οφείλονται σε διαφορές των οπτικών χαρακτηριστικών των ινών, όπως διαφορές στο αριθμητικό άνοιγμα, στην διάμετρο του πυρήνα ή του περιβλήματος, στην γεωμετρική μορφή (κυκλική ή ελλειπτική) του πυρήνα ή του περιβλήματος. Διαφορές του είδους αυτού οδηγούν σε συνολικές απώλειες της τάξης των  $2.3 \text{ dB}$ .
6. **απώλειες Fresnel** : Πρόκειται για απώλειες λόγω ανάκλασης σε διαχωριστικές επιφάνειες. Σε διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού-αέρα είναι της τάξης των  $0.2 \text{ dB}$ .



Σχ. 7. Παράγοντες απωλειών στην ζεύξη μεταξύ οπτικών ινών.

Με αύξηση των απωλειών των περιφερειακών ρυθμών έναντι των αξονικών υποστηρίζεται η διάδοση αξονικών ρυθμών. Συνθήκες εξασθένησης των περιφερειακών ρυθμών μπορούν να αναπαραχθούν στο εργαστήριο με τύλιγμα της ίνας σε κύλινδρο (βλ. Σχ. 8.)

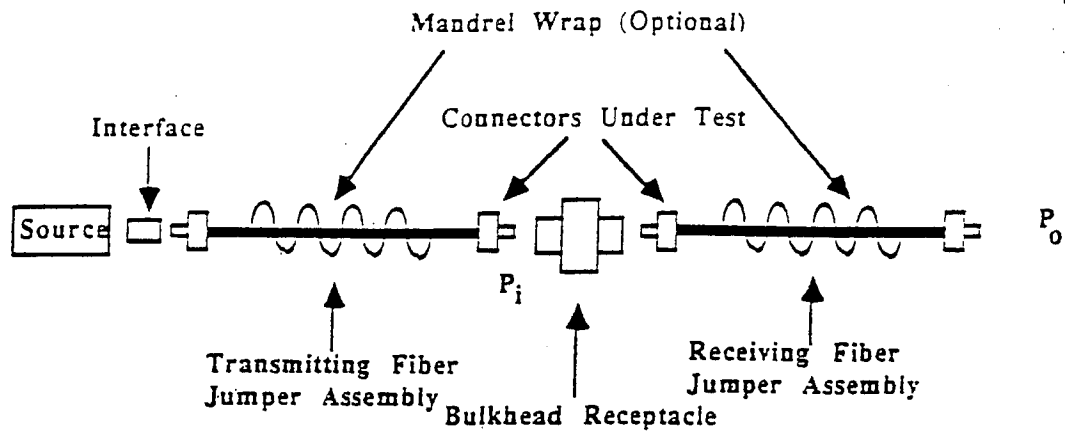


Σχ. 8. Συνθήκες εξασθένησης περιφερειακών ρυθμών.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

### Εξαρτήματα :

- εξαρτήματα άσκησης 4.1, 4.2 και 4.3
- δεύτερη πολυρυθμική ίνα (χρώμα γκρι)
- κύλινδροι για το τύλιγμα των ινών



Σχ. 9. Σύζευξη δύο οπτικών ινών.

### Μετρήσεις :

1. Χρησιμοποιήστε την διάταξη της άσκησης 4.3.
2. Αναγνωρίστε τα επί πλέον εξαρτήματα.
3. Ρυθμίστε τον συζεύκτη πηγής-ίνας, έτσι ώστε να διεγείρονται όλοι οι ρυθμοί. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της πρώτης ίνας ( $P_{in}$ ).
4. Συνδέστε τις δύο ίνες μέσω του συζεύκτη ινών. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της δεύτερης ίνας ( $P_{out}$ ).
5. Υπολογίστε τις απώλειες από την σχέση :  $IL_{SS} = 10 \log_{10}(P_{out}/P_{in})$   
Τυλίξτε την πρώτη ίνα στον κύλινδρο πέντε φορές. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της ίνας ( $P_{in}$ ).
6. Συνδέστε τις δύο ίνες μέσω του συζεύκτη ινών. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της δεύτερης ίνας ( $P_{out}$ ).
7. Υπολογίστε τις απώλειες  $IL_{LS}$ .
8. Τυλίξτε και την δεύτερη ίνα στον κύλινδρο πέντε φορές. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της ίνας ( $P_{out}$ ).
9. Υπολογίστε τις απώλειες  $IL_{LL}$ .

### ΑΣΚΗΣΗ 4.5.

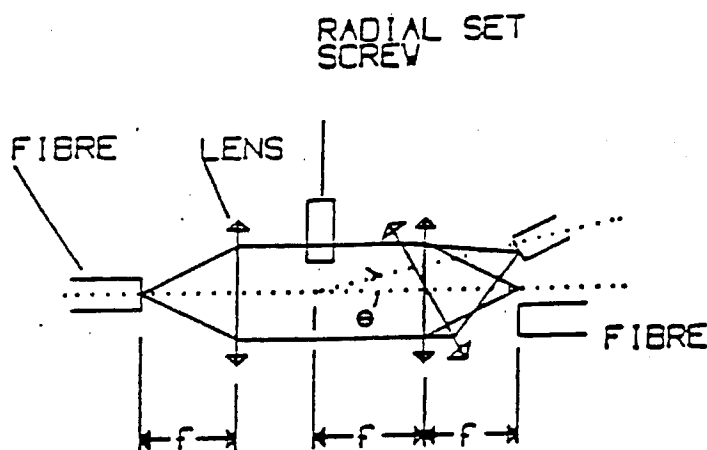
#### ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΞΑΣΘΕΝΗΣΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ

Στην άσκηση αυτή θα προσδιορίσουμε τον συντελεστή εξασθένησης οπτικής ίνας αναπαράγοντας εργαστηριακά παράγοντες εξασθένησης. Η



εξασθένηση σήματος που διαδίδεται μέσω οπτικών ινών μετράται σε dB/km. Ένας εξασθενητής των 10 dB προκαλεί την ίδια εξασθένηση σήματος, όπως ένα δίκτυο οπτικών ινών μήκους 10 km με συντελεστή εξασθένησης 1 dB/km.

Ο τρόπος λειτουργίας ενός εργαστηριακού, μεταβλητού εξασθενητή παρουσιάζεται στο σχήμα 10. Το μέγεθος της εξασθένησης ρυθμίζεται μέσω μιας βίδας που παρεμβάλεται στην πορεία της δέσμης.



Σχ. 10. Τρόπος λειτουργίας μεταβλητού εξασθενητή.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ

### Εξαρτήματα :

- εξαρτήματα άσκησης 4.1
- συζεύκτης ίνας-φωρατή
- κύλινδρος για το τύλιγμα της ίνας

### Μετρήσεις :

1. Χρησιμοποιήστε την διάταξη της άσκησης 4.1.
2. Αναγνωρίστε τα επί πλέον εξαρτήματα.
3. Μετρήστε την ισχύ της δέσμης στην έξοδο της πρώτης ίνας ( $P_{in}$ ) σε dB =  $10 \log(\text{ισχύος σε mW})$ .
4. Συνδέστε την δεύτερη ίνα με τον φωρατή. Παρεμβάλετε τον εξασθενητή μεταξύ των δύο οπτικών ινών. Βεβαιωθείτε ότι η βίδα του εξασθενητή δεν εμποδίζει την πορεία της δέσμης. Υπολογίστε τις απώλειες ισχύος (I.L.) στον εξασθενητή από την διαφορά ( $P_{out} - P_{in}$ ).
5. Παρακολουθώντας την ένδειξη του φωρατή, ρυθμίστε τον εξασθενητή σε 10 dB.

8. Στρέψτε την βίδα του εξασθενητή μέχρι να μειωθεί η ισχύς  $P_{out}$  και σημειώστε την ένδειξη του φωρατή ως  $P_1$ . Στρέψτε την βίδα κατά  $90^\circ$  (στροφή  $1/4$ ) προς τα δεξιά και μετρήστε την ισχύ  $P_2$ . Συνεχίστε να στρέφετε κατά διαστήματα  $90^\circ$  και σημειώστε 5 ακόμη ενδείξεις.
9. Καταχωρήστε την εξασθένιση ( $P_n - P_{in}$ ,  $n=1,2,\dots,7$ ) ως συνάρτηση του αριθμού στροφών της βίδας σε διάγραμμα.
10. Από το διάγραμμα προσδιορίστε τον αριθμό στροφών της βίδας που αντιστοιχεί σε εξασθένιση (3 dB + I.L.). Θεωρητικά εξασθένιση 3 dB (50%) παρατηρείται όταν η βίδα καλύπτει το ήμισυ της δέσμης. Η μετατόπιση της βίδας του εξασθενητή είναι 0.64 mm ανά  $360^\circ$ . Υπολογίστε τον αριθμό στροφών που αντιστοιχεί σε εξασθένιση 3 dB από την σχέση :  $(\text{αριθμός στροφών} \times 0.64) = (B.D./2)$ . Συγκρίνετε με τον πραγματικό αριθμό στροφών από το διάγραμμα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική  
Α.Α.Σεραφετινίδης  
Εκδόσεις "Συμμετρία". Αθήνα 1989
2. Οπτική και Lasers  
M. Young  
Μετάφραση ΕΜΠ. Δεύτερη έκδοση  
Εκδόσεις "Παρατηρητής". Αθήνα 1991
3. Optoelectronics : An Introduction  
J. Wilson and J. Hawkes  
Prentice Hall International. London 1983
4. Optics  
E. Hecht and A. Zajak  
Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1974