



ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ ΟΠΤΙΚΗ ΙΝΑ

Επιβλέποντες: Ι. Ασαρίδης
Σ. Λούβρος

Σπουδαστής: Σεβαστού Σοφία



Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε

1.1	Γενική περιγραφή οπτικών ινών.....	5
1.2	Βασικές αρχές λειτουργίας οπτικών ινών.....	5
1.3	Δομή οπτικών ινών.....	6
1.4	Τύποι οπτικών ινών.....	6
1.5	Λόγοι εξασθένησης του φωτός στην οπτική ίνα.....	8
1.6	Παράγοντες που επηρεάζουν τις αποστάσεις μετάδοσης.....	9
1.7	Οπτικά καλώδια.....	10
1.8	Χρήση οπτικών ινών.....	11
1.9	Πλεονεκτήματα οπτικών ινών.....	12
1.10	Μειονεκτήματα οπτικών ινών.....	14
2.1	Λόγοι επιδόσεων των οπτικών ινών.....	16
2.2	Φαινόμενα που προκαλούν εξασθένηση.....	16
3.1	Γενική περιγραφή Η/Μ ακτινοβολίας.....	27
3.2	Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας.....	29
3.3	Διάδοση ακτινοβολίας στο πυρήνα της οπτικής ίνας μέσω του φαινομένου της ανάκλασης.....	36
3.4	Βασική αρχή λειτουργίας.....	37
3.5	Διασπορά	39
3.5.1	Διατροπική Διασπορά.....	39
3.5.2	Ενδοτροπική Διασπορά.....	40
3.5.3	Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης(PMD).....	41
4α	Δίοδοι Ημιαγωγοί Εκπομπής Φωτός (LED).....	43
4α.1	Εισαγωγή.....	43
4α.2	Αρχή λειτουργίας των LED.....	44
4α.3	Δομή των LED.....	45
4α.4	Κυκλώματα οδήγησης των LED.....	46
4α.5	Σύζευξη της LED με την οπτική ίνα και εισαγωγή (launching) του φωτός μέσα στην ίνα.....	47
4α.6	Πλεονεκτήματα των LED.....	49
4α.7	Μειονεκτήματα των LED.....	50
4β	Laser Ημιαγωγών.....	51
4β.1	Εισαγωγή.....	51
4β.2	Βασικές αρχές λειτουργίας των LASER.....	52

4β.3 Απορρόφηση φωτός.....	54
4β.4 Αυθόρμητη εκπομπή φωτός.....	54
4β.5 Εξαναγκασμένη ή Επαγομένη Εκπομπή φωτός.....	55
4β.6 Κυκλώματα οδήγησης των LASER.....	57
4β.7 Ιδιότητες της δέσμης laser.....	59
4β.8 Εφαρμογές των Laser.....	60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

1.11 Γενική περιγραφή οπτικών ινών

Μια οπτική ίνα είναι μια γυάλινη ή πλαστική ίνα που μεταφέρει το φως κατά μήκος της. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών, και επιτρέπουν την μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρους ζώνης σε σχέση με άλλες μορφές επικοινωνίας όπως ο χαλκός. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων, διότι τα σήματα ταξιδεύουν μαζί τους με λιγότερη απώλεια, και επίσης δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται επίσης για φωτισμό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων λείζερ.

1.12 Βασικές αρχές λειτουργίας οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες αποτελούν έναν υβριδικό τομέα. Ξεκινώντας σαν ένα εκμεταλλεύσιμο οπτικό προϊόν, οι οπτικές ίνες πρωτοχρησιμοποιήθηκαν σαν οπτικά μέρη. Στη συνέχεια, ως ένα νέο μέσο επικοινωνίας, ο τομέας "δανείστηκε" ιδέες και ορολογία από τις ηλεκτρονικές επικοινωνίες. Πομποί και δεκτές μετατρέπουν σήματα από ηλεκτρικά σε οπτικά και αντιστρόφως. Για να κατανοηθούν σωστά οι οπτικές ίνες πρέπει πρώτα να κατανοηθούν οι τομείς των οπτικών, των τηλεπικοινωνιών αλλά και των ηλεκτρονικών.

Η λειτουργία των οπτικών ινών εξαρτάται από τις βασικές ιδιότητες των οπτικών και την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη. Από τη φυσική σκοπιά, το φως αποτελείται είτε από ηλεκτρομαγνητικά κύματα είτε από φωτόνια, τα οποία είναι κβάντα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Το πιο βασικό σημείο στην κατανόηση της λειτουργίας των οπτικών ινών είναι η θεώρηση ότι το φως αποτελείται από ακτίνες οι οποίες ταξιδεύουν σε ευθείες γραμμές μεταξύ οπτικών στοιχείων, τα οποία μπορούν να κάμψουν ή να ανακάμψουν τη τροχιά αυτή.

Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι, η οπτική ίνα χρησιμοποιείται ως μέσο και το φως ως φορέας της πληροφορίας. Ο τρόπος που αποστέλλεται η πληροφορία, η

οποία βρίσκεται σε ψηφιακή μορφή, είναι η διαμόρφωση πλάτους του εκπεμπόμενου από την πηγή φωτός σε μορφή on/off.

Το φως αποτελεί ένα μικρό κομμάτι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η φύση όλων των μορφών της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι η ίδια, και αναγνωρίζεται ως φωτόνια ή κύματα τα οποία ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, η οποία είναι 300.000 km/s. Η διαφορά της ακτινοβολίας μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρομαγνητικών φασμάτων μπορεί να μετρηθεί ως μήκη κύματος, ενέργεια φωτονίων ή ακόμα ως μια κυματοειδή συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Στην τελική μορφή της η οπτική ίνα μοιάζει πολύ με μια λεπτή διάφανη τρίχα. Στο εσωτερικό της το γυαλί μπορεί να μεταδίδει το φως. Το περίβλημα (το οποίο βρίσκεται εξωτερικά) εξασφαλίζει ότι το φως θα παραμένει συνεχώς μέσα στην ίνα. Οι περισσότερες από τις οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται σήμερα λειτουργούν στα πλαίσια του υπέρυθρου φωτός με μήκη κύματος που κυμαίνονται από 800 έως 1600nm και αποτελούνται συνήθως από τρεις ομοαξονικούς κυλίνδρους διηλεκτρικού υλικού, την κεντρική ίνα (Core), την επίστρωση (Cladding) και το κάλυμμα (Buffer Coating). Το υλικό αυτό βοηθά στη συνεχή ανάκλαση της φωτεινής δέσμης, η οποία θα πέσει μέσα στην οπτική ίνα, εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής διότι σε άλλη περίπτωση θα έχουμε διάθλαση στην εξωτερική επίστρωση (cladding). Με αυτό τον τρόπο η οπτική ίνα εγκλωβίζει τη δέσμη του φωτός και την οδηγεί στην άκρη της. Για λόγους προστασίας τοποθετείται κατά τη διάρκεια κατασκευής της ίνας, μια επικάλυψη (πρόσθετο προστατευτικό περίβλημα) από συνθετικό ή πολυμερές υλικό το οποίο έχει σαν στόχο την προστασία της ίνας από πιθανά τραβήγματα, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της ίνας.

1.13 Δομή οπτικών ινών

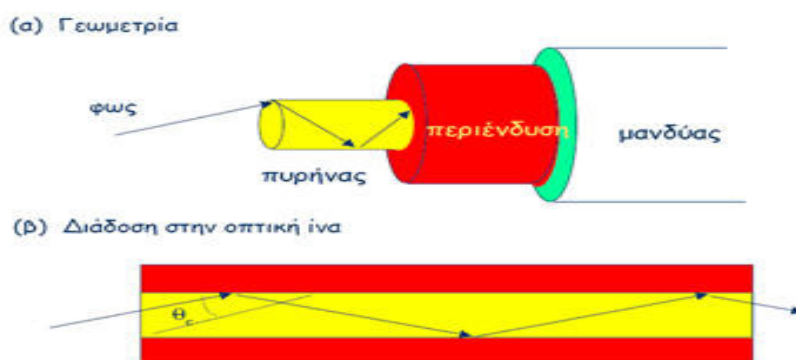
Οι οπτικές ίνες είναι το πλέον αξιόπιστο μέσο μετάδοσης των οπτικών συστημάτων. Είναι εύκαμπτες ίνες γυαλιού ή πλαστικού, λεπτές όσο μια ανθρώπινη τρίχα. Ουσιαστικά δεν είναι παρά κυλινδρικοί διηλεκτρικοί κυματοδηγοί που λειτουργούν στις συχνότητες της οπτικής περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Μια τυπική οπτική ίνα αποτελείται από τρεις ομόκεντρους κυλίνδρους διηλεκτρικού υλικού.

Στο κέντρο της ίνας βρίσκεται ο πυρήνας, που είναι γυαλί υψηλού δείκτη διάθλασης. Ο πυρήνας περιβάλλεται από υλικό χαμηλότερου δείκτη διάθλασης, το μανδύα ή περίβλημα. Το φως εγκλωβίζεται στον πυρήνα και διαδίδεται κατά μήκος της ίνας. Ο πυρήνας στην πραγματικότητα μεταφέρει το φως, ενώ το περίβλημα της ίνας ανακλά το φως πίσω στον πυρήνα. Η εξωτερική περιοχή της ίνας καλείται απομονωτής. Ο απομονωτής, τυπικά ένα πλαστικό υλικό, παρέχει προστασία και διατηρεί την αντοχή του γυαλιού της ίνας.

Η κυματοδότηση του οπτικού σήματος επιτυγχάνεται και χωρίς την παρουσία του απομονωτή, που χρησιμοποιείται για να ελαττώσει της απώλειες λόγω κατασκευαστικών ατελειών της κεντρικής ίνας και για της προσδώσει μηχανική αντοχή.

Το υλικό κατασκευής τόσο του πυρήνα όσο και του μανδύα είναι συνήθως υψηλής καθαρότητας γυαλί.

Οπτική ίνα



Σχήμα 1.1: Δομή ενός απλού οπτικού καλωδίου

1.4 Τύποι οπτικών ινών

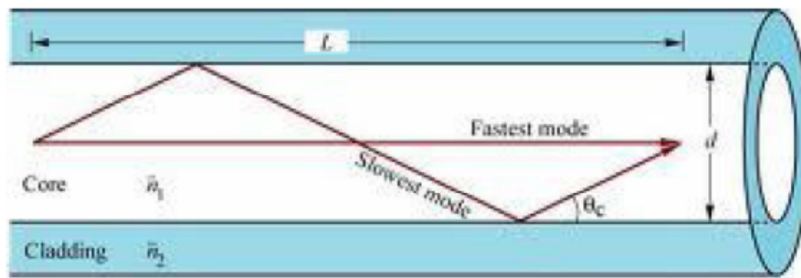
Οι τύποι των οπτικών ινών είναι τρεις και κατατάσσονται με βάση τον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται το φως στην οπτική ίνα. Η ακτίνα φωτός διαδίδεται σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα κατά μήκος της ίνας. Τα δυο αυτά στοιχεία του σχηματίζουν μοτίβα τα οποία ονομάζονται τρόποι ή ρυθμοί (modes). Μια ίνα που έχει έναν τρόπο διάδοσης ονομάζεται μονότροπη και εάν έχει πολλούς τρόπους διάδοσης ονομάζεται πολύτροπη. Ο αριθμός των modes είναι πάντα ακέραιος αριθμός.

Τα είδη των οπτικών ινών μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη δομή και τη λειτουργία τους. Οι οπτικές ίνες διακρίνονται σε τρεις τύπους:

1. Πολύτροπες με βηματικό δείκτη
2. Πολύτροπες με βαθμιαίο δείκτη
3. Μονότροπες με βηματικό δείκτη

Υπάρχουν λοιπόν δυο βασικοί τύποι οπτικών ινών: Οι μονότροπες και οι πολύτροπες ίνες.

Η πολύτροπη ίνα ήταν ο πρώτος τύπος που εμπορευματοποιήθηκε.



Σχήμα 1.2 Πολύτροπη οπτική ίνα βηματικού δείκτη διάθλασης

Ο πυρήνας της είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της μονότροπης ίνας, επιτρέποντας εκατοντάδες ακτίνες φως να μετακινούνται μέσα από αυτήν ταυτόχρονα. Αντιθέτως η μονότροπη ίνα έχει πολύ μικρότερο πυρήνα.



Σχήμα 1.3 Μονότροπη οπτική ίνα

Το γεγονός ότι ένας μεγάλος πυρήνας θα επέτρεπε ένα μεγάλο εύρος ζώνης ή μεγαλύτερη μεταβίβαση πληροφοριών είναι κάτι το οποίο δεν συμβαίνει. Οι μονότροπες ίνες είναι καλύτερες στο να συγκρατούν την πιστότητα κάθε παλμού φως για μεγαλύτερες αποστάσεις και παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά που προκαλείται από πολλαπλές ακτίνες. Ακόμα η μονότροπη ίνα παρουσιάζει χαμηλότερη εξασθένηση από την πολύτροπη, με μειονέκτημα τον μικρή διαμέτρου πυρήνα ο οποίος κάνει την σύζευξη του φως στον πυρήνα δύσκολη.

Οι πολύτροπες ίνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε βηματικού και διαβαθμιαίου δείκτη ίνες. Ο όρος πολύτροπες αναφέρεται στο γεγονός ότι πολλές ακτίνες φως μεταφέρονται σύγχρονος μέσα από την ίνα. Ο μεγαλύτερης διαμέτρου πυρήνας αυξάνει την ευκολία σύζευξης και γενικά, οι πολύτροπες ίνες

μπορούν να συζευκτούν με χαμηλότερου κόστους πηγές φωτός. Παρόλο αυτά, η πολύτροπη διασπορά, είναι μειονέκτημα και η εξασθένηση είναι μεγάλη.

Η ίνα βαθμιαίου δείκτη έχει παραβολικό δείκτη διάθλασης και είναι μεγαλύτερος στο κέντρο. Οι ακτίνες του φωτός δεν ακολουθούν ευθείες γραμμές, αλλά ακολουθούν έναν ελικοειδή δρόμο και ο δείκτης διάθλασης ελαττώνεται συνεχώς.

1.5 Λόγοι εξασθένησης του φωτός στην οπτική ίνα.

Το φως κατά το “ταξίδι” του σε μια οπτική ίνα εξασθενεί. Αυτό συμβαίνει συνήθως για τους παρακάτω λόγους:

Λόγω **απορρόφησης**, που οφείλεται στις ξένες προσμίξεις που υπάρχουν στο γυαλί.

Λόγω **σκέδασης** το φως διεισδύει στο μανδύα και διασκορπίζεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται εντονότερα, αν στην οπτική ίνα υπάρχουν συνδέσεις.

Λόγω **κακής κατασκευής** υπάρχουν στην διάμετρο του πυρήνα, για παράδειγμα, μικροδιακυμάνσεις.

Λόγω **μεγάλης καμπής** της οπτικής ίνας.

Αν ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από κοινό γυαλί, όπως αυτό των τζαμιών των σπιτιών μας, τότε το φως θα “ταξίδευε” μέσα στην ίνα το πολύ ένα μέτρο. Για το λόγο αυτό το γυαλί που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα είναι μεγάλης καθαρότητας. Έτσι το φως μεταφέρεται σε απόσταση πολλών χιλιομέτρων με πολύ μικρές απώλειες.

1.6 Επιδόσεις

Οι επιδόσεις μιας οπτικής ίνας συνδέονται με τον τρόπο μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη και με το μήκος κύματος του φωτός, που εκπέμπεται από την πηγή.

Στις μονότροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μήκη κύματος μεταξύ των 1310 nm και των 1550 nm. Στις πολύτροπες οπτικές ίνες έχουμε μήκη κύματος από 850 nm έως 1300 nm.

Θα πρέπει να τονίσουμε, ότι για δεδομένη εγκατάσταση, θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ένας τρόπος μετάδοσης και μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος από τις πηγές σε όλη την έκταση της εγκατάστασης.

Οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταφέρουν σήματα με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρή εξασθένηση του σήματος. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποστάσεις, που υπερβαίνουν τα 3 Km, ενώ οι μονότροπες

Οπτικές ίνες μπορούν να υπερβούν τα 10 Km.

1.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τις αποστάσεις μετάδοσης

Όπως σε όλες τις μορφές επικοινωνίας, το σήμα που φτάνει σε ένα δέκτη είναι πιο χαμηλό σε ένταση από αυτό που εκπέμφθηκε από τον πομπό. Αυτή η εξασθένηση του σήματος οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ακαθαρσίες και στη 'διασκόρπιση' της δέσμης φωτός λόγω ανομοιογενών περιοχών στη κεντρική ίνα του οπτικού καλωδίου.

Μεγαλύτερη εξασθένηση του σήματος παρουσιάζεται σε σημεία που γίνεται η ένωση δυο καλωδίων λόγω μη καλής ευθυγράμμισης των δυο άκρων. Τέλος η εξασθένηση του σήματος εξαρτάται και από τα μήκη κύματος του φωτός που χρησιμοποιούνται κατά τη μεταφορά του σήματος.

Οι μικρότερες τιμές εξασθένησης, λόγω του μήκους κύματος που χρησιμοποιείται, εμφανίζονται σε περιοχές που ονομάζονται "οπτικά παράθυρα".

Άλλοι παράγοντες είναι το εύρος ζώνης της πηγής και του δέκτη των σημάτων σε μια οπτική ίνα, και η χρωματική διασπορά του μεταδιδόμενου σήματος μέσα στην οπτική ίνα, η οποία διασπορά αυξάνεται με την απόσταση και εξασθενίζει το σήμα.

Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή της κεντρικής ίνας παίζει σημαντικό λόγο.

Αυτό σημαίνει ότι το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το συντελεστή διάθλασης της κεντρικής ίνας συντελούν στη διεύρυνση του σήματος που φτάνει στο δέκτη. Τέλος διασπορά του σήματος οφείλεται και στους ρυθμούς (modes) λόγω της συνύπαρξης αρκετών διαφορετικών σημάτων με διαφορετικούς χρόνους διάδοσης μέσα στην ίδια οπτική ίνα. Επίσης, επιβαρυντικός παράγων είναι η χρήση συνδέσμων και διακλαδωτών στην πορεία των οπτικών ινών.

Θα πρέπει να σημειώσουμε, ότι στις πολύτροπες οπτικές ίνες είναι πιο ανεκτό να χρησιμοποιήσουμε συνδετήρες και διακλαδωτές απ,ότι στις μονότροπες. Επίσης, στις πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλού κόστους πηγές LED, ενώ οι μονότροπες οδηγούνται συνήθως από πηγή LASER.

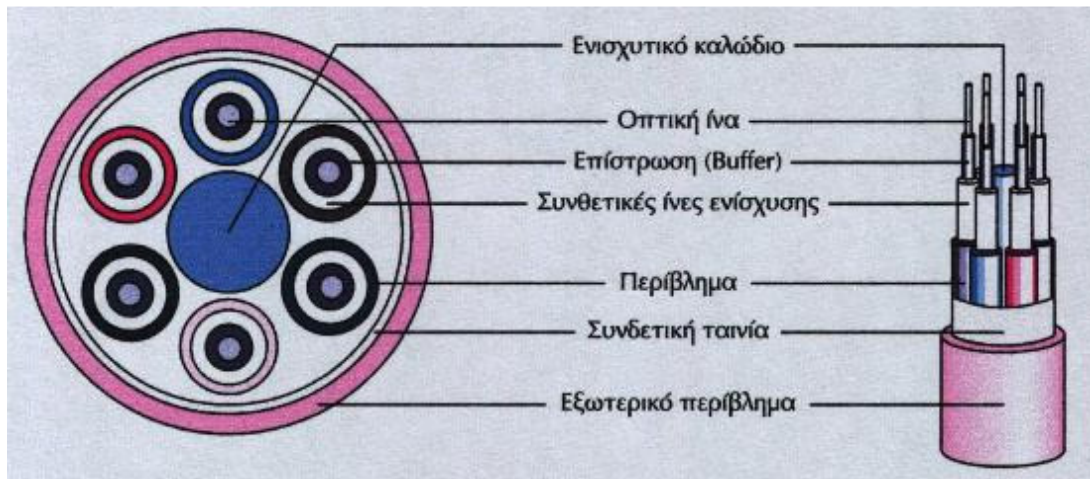
1.7 Οπτικά καλώδια

Τα οπτικά καλώδια έχουν εξελιχθεί παρά πολύ από τότε που άρχισαν να χρησιμοποιούνται. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν οπτικά καλώδια τα οποία από μόνα τους ενισχύουν το οπτικό σήμα που ταξιδεύει μέσα τους με τη χρησιμοποίηση ειδικών επιστρώσεων στην κεντρική ίνα, τα οποία ιονίζουν το φως, αυξάνοντας την ενέργεια του καθώς αυτό περνά μέσα από τα καλώδια αυτά. Έτσι το σήμα μπορεί να ταξιδεύσει ακόμα πιο μακριά χωρίς τη χρησιμοποίηση ενισχυτών.

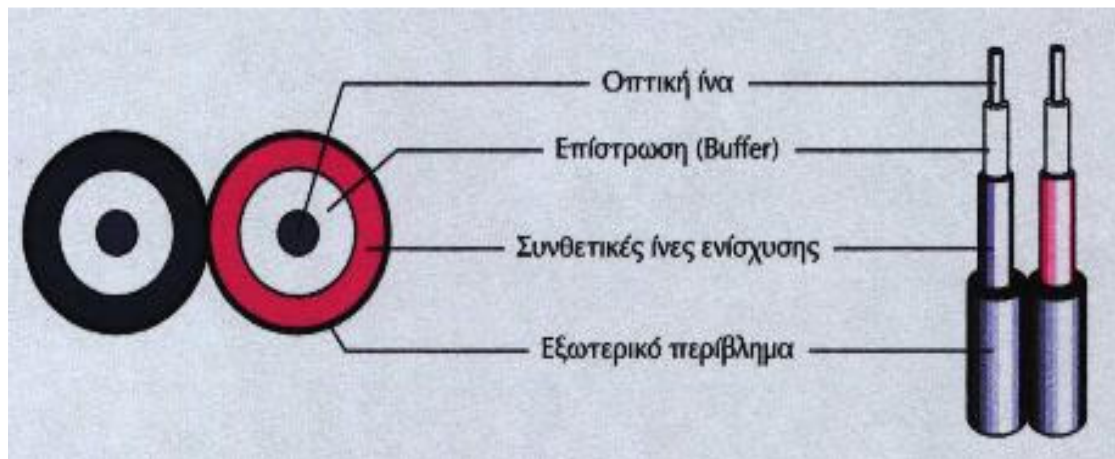
Τέλος τα υποθαλάσσια καλώδια αποτελούνται πλέον από έναν αριθμό οπτικών

καλωδίων και ειδικών μεταλλικών ράβδων, που συνήθως βρίσκονται στο κέντρο του καλωδίου και 'τρέχουν' παράλληλα με τα οπτικά καλώδια, οι οποίες έχουν σαν σκοπό την ενίσχυση του καλωδίου, επιτρέποντας στο καλώδιο να δεχτεί ψηλότερες πιέσεις χωρίς να σπάσει.

Στο 1.4 εμφανίζεται ανάλογη κατασκευή καλωδίου οπτικών ινών, στο σχήμα 1.5 εμφανίζεται ένα οπτικό καλώδιο σύνδεσης



Σχήμα 1.4 Καλώδιο οπτικών ινών (Tight Buffer)



Σχήμα 1.5 Οπτικό Patch cord

1.8 Χρήση οπτικών ινών

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές. Οπτικές ίνες μεγάλης διαμέτρου και μικρής καθαρότητας χρησιμοποιούνται στην κατασκευή φωτεινών επιγραφών, στην διακόσμηση και στο φωτισμό των πισίνων.

Η πιο σημαντική όμως εφαρμογή των οπτικών ινών αφορά τις τηλεπικοινωνίες για τους παρακάτω λόγους.

- Με την βοήθεια μιας ίνας μπορούμε να μεταφέρουμε ταυτόχρονα και χωρίς παρεμβολές χιλιάδες τηλεφωνήματα, δεκάδες εκπομπές τηλεοπτικών καναλιών και μεγάλο αριθμό δεδομένων υπολογιστών.
- Οι διαστάσεις των καλωδίων των οπτικών ινών και το βάρος τους είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα του χαλκού..
- Κατά τη μεταφορά των πληροφοριών δεν έχουμε παράσιτα.
- Είναι πολύ δύσκολη η υποκλοπή (τοποθέτηση “κοριών”) ή η συνακρόαση.
- Δεν χρειάζονται γείωση.
- Μπορούν να παραχθούν από κάθε χώρα με συνέπεια την απεξάρτησή της από χώρες που παράγουν χαλκό. Έτσι επιτυγχάνεται και τεχνολογική διάχυση. Στην Ελλάδα υπάρχουν εργοστάσια παραγωγής οπτικών ινών, δηλαδή επεξεργασίας του διοξειδίου του πυριτίου, με πρώτη ύλη την άμμο.

Στην Ελλάδα ο ΟΤΕ έχει αντικαταστήσει μέχρι σήμερα ένα μεγάλο μέρος του παλιού δικτύου του με δίκτυο οπτικών ινών.

1.9 Πλεονεκτήματα οπτικών ινών

Τα συστήματα μετάδοσης οπτικών ινών παρουσιάζουν ένα μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τα συμβατικά ηλεκτρικά/ηλεκτρονικά συστήματα. Μία πρώτη σύγκριση οδηγεί στα παρακάτω σημεία:

(α) Τεράστιο εύρος ζώνης. Οι οπτικές ίνες διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, που με πολυπλεξία, φθάνουν ακόμη και τα 128 Gbit/s. Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 και 10 Gbps, ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20,40 και 50 Gbps. Το εύρος ζώνης του οπτικού φέροντος (10^{14} Hz ή 100000 GHz) είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό των χάλκινων ομοαξονικών καλωδίων που γενικά δεν ξεπερνά τα 500 MHz ή των μιλιμετρικών ραδιοκυμάτων. Είναι φανερό ότι ακόμα και με τη μερική χρήση του διαθέσιμου

εύρους ζώνης σε συστήματα οπτικών ινών αρκετά GHz διαμόρφωση μπορούν να μεταδοθούν σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων χωρίς την παρέμβαση ενδιάμεσων ηλεκτρονικών αναμεταδοτών. Από την άλλη πλευρά σε ομοαξονικά καλώδια δεν πρέπει κανείς να περιμένει αποστάσεις μεγαλύτερες των μερικών χιλιομέτρων για ένα εύρος ζώνης που θα ξεπερνά τα 100 MHz.

(β) Μικρό μέγεθος και βάρος. Η διάμετρος των οπτικών ινών είναι μερικά (ή μερικές δεκάδες) μικρόμετρα. Ακόμα και εάν κανείς συνεκτιμήσει τα διάφορα προστατευτικά στρώματα και πάλι διαπιστώνει ότι το βάρος και το μέγεθος ενός οπτικού καλωδίου είναι πολύ μικρότερα από αυτά ενός χαλκού

(γ) Ηλεκτρική απομόνωση. Το οπτικό κύμα οδηγείται από μία γυάλινη ίνα, άρα ένα διηλεκτρικό. Δεν υπάρχουν βρόχοι γης, τόξα, βραχυκυκλώματα κτλ. Άρα η οπτική ίνα μπορεί να περάσει άφοβα από κάποιο “ηλεκτρικά επικίνδυνο” περιβάλλον. Η οπτική ίνα είναι ιδανικό μέσον για την εγκατάσταση σε χώρους με υψηλά δυναμικά.

(δ) Ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η μετάδοση του οπτικού κύματος μέσα στο διηλεκτρικό κυματοδηγό (ίνα) είναι απαλλαγμένη από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές καθώς και από μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Αυτό σημαίνει ότι η οπτική ίνα μπορεί να βρίσκεται σε ένα περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικού θορύβου χωρίς να χρειάζεται να ληφθούν μέτρα για την ηλεκτρομαγνητική της θωράκιση. Για το λόγο αυτό βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε περιβάλλοντα υψηλού ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.

(ε) Ασφάλεια. Το οπτικό σήμα μέσα στην ίνα περιορίζεται κυρίως στον πυρήνα της και δεν ακτινοβολεί. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να υποκλαπεί, παρά μόνο στην περίπτωση που κάποιος μπορεί να έχει πρόσβαση στο φως που οδηγείται από τον πυρήνα. Το παραπάνω είναι απίθανο να συμβεί χωρίς να διακοπεί η συνέχεια της ίνας, πράγμα το οποίο γίνεται εύκολα αντιληπτό. Αυτό σημαίνει ότι η ασφάλεια που προσφέρουν τα συστήματα οπτικών ινών είναι ιδιαίτερα

αυξημένη, καθώς είναι σχεδόν αδύνατη η εξωτερική επέμβαση για την υποκλοπή ή την παρεμβολή των μεταφερόμενων σημάτων.

(στ) Πολύ χαμηλές απώλειες μετάδοσης. Η εξέλιξη των οπτικών ινών έχει οδηγήσει σε ίνες με ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες.

(ζ) Ευελιξία και αντοχή. Οι οπτικές ίνες παρά το γεγονός ότι είναι κατασκευασμένες από γυαλί

χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή καθώς και ευκαμψία. Ταυτόχρονα δεν επηρεάζονται από την υγρασία, σε αντίθεση με τα χάλκινα καλώδια που η έκθεση τους σε υγρασία μπορεί να προκαλέσει βραχυκυκλώματα ή το φαινόμενο της διαφωνίας. Σε συνδυασμό με το μικρό βάρος και όγκο εμφανίζονται γενικά πλεονεκτικότερες σε ότι αφορά στην αποθήκευση, μεταφορά και εγκατάσταση σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια. Τέλος η αντοχή καθώς και η διάρκεια ζωής τους είναι τουλάχιστον συγκρίσιμες με τα προηγούμενα.

(η) Αξιοπιστία και ευκολία συντήρησης. Λόγω των πολύ μικρών απωλειών ο αριθμός ηλεκτρονικών αναμεταδοτών είναι αρκετά περιορισμένος. Αυτό σημαίνει αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος. Παράλληλα η ίδια η αξιοπιστία των οπτικών εξαρτημάτων και διατάξεων έχει αυξηθεί σημαντικά με αποτέλεσμα η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής να είναι 20 μέχρι 30 χρόνια.

(θ) Εν δυνάμει χαμηλό κόστος. Το κόστος των οπτικών ινών (καλωδίων) έχει μειωθεί σημαντικά προσεγγίζοντας αυτό των μεταλλικών καλωδίων. Αυτό που συνεχίζει να έχει υψηλό κόστος είναι άλλα οπτικά εξαρτήματα, όπως οι οπτικές πηγές, ανιχνευτές κτλ.

(ι) Το error rate ή αλλιώς ο ρυθμός εμφάνισης σφαλμάτων σε καλώδια οπτικών ινών είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι είναι ο καλύτερος από τα ενσύρματα μέσα μετάδοσης κατά 3 τάξεις μεγέθους.

1.10 Μειονεκτήματα οπτικών ινών

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολία σύνδεσης των οπτικών ινών με άλλα εξαρτήματα, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Είναι χαρακτηριστικό ότι και μικρές ακόμη αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση αυτή μπορούν να προξενήσουν μεγάλη απώλεια του φωτεινού σήματος.

Όμως, η πρόοδος της τεχνολογίας, που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή των οπτικών ινών, αντιμετώπισε με επιτυχία την παραπάνω δυσκολία, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η χρήση τους και για συνδέσεις σημείου προς πολλά σημεία. Παρόλα αυτά, η χρήση τους σε τέτοιες συνδέσεις δεν έχει ακόμη ευρέως εξαπλωθεί, ιδιαίτερα λόγω του αυξημένου κόστους, που παρουσιάζουν τέτοια συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εξασθένηση

2.1 Λόγοι επιδόσεων των οπτικών ινών

Παρά τις μεγάλες δυνατότητες των οπτικών ινών για μεταφορά σημάτων, οι επιδόσεις τους υποβαθμίζονται από διάφορους μηχανισμούς οι οποίοι περιορίζουν τόσο το μέγιστο δυνατό μήκος L_{\max} μιας ζεύξης όσο και το εύρος ζώνης B ή το ρυθμό μετάδοσης R που μπορεί να επιτευχθεί στη ζεύξη για δεδομένο μήκος L .

Τα δύο βασικά φαινόμενα που καθορίζουν τις επιδόσεις των οπτικών ινών ως μέσων μετάδοσης είναι η εξασθένηση και η διασπορά. Η εξασθένηση εκδηλώνεται ως μείωση της κυματοδηγούμενης οπτικής ισχύος κατά μήκος της οπτικής ίνας ενώ η διασπορά ως χρονική διαπλάτυνση των ψηφιακών παλμών στην έξοδο του οπτικού δέκτη. Άλλο περιοριστικό φαινόμενο είναι η τετρακυματική μίξη η οποία όμως εκδηλώνεται όταν στην οπτική ίνα επιδιώκεται η ταυτόχρονη μετάδοση περισσοτέρων του ενός ψηφιακών σημάτων μέσω χρήσης διαφορετικού μήκους κύματος για κάθε σήμα (τεχνική WDM).

2.2 Φαινόμενα που προκαλούν εξασθένηση

Η εξασθένηση (attenuation) εκδηλώνεται ως μείωση της κυματοδηγούμενης οπτικής ισχύος κατά μήκος της ίνας και θέτει περιορισμούς στο μέγιστο δυνατό μήκος L_{\max} μιας ινοοπτικής ζεύξης. Τα κυριότερα φαινόμενα που την προκαλούν είναι:

- Η σκέδαση (π.χ. σκέδαση Rayleigh, Mie, Raman, Brillouin)
- Η απορρόφηση ισχύος (είτε από το ίδιο το υλικό της ίνας είτε από προσμίξεις που εισχώρησαν σε αυτό)
- Άλλα φαινόμενα (όπως μικροκάμψεις, εισχώρηση υγρασίας, γήρανση) κ.τ.λ.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να μετρήσουμε την εξασθένηση μιας οπτικής ίνας, μεταξύ των

οποίων είναι:

- Μέθοδος cut-back
- Μέθοδος οπισθοσκέδασης
- Μέθοδος παρεμβολών

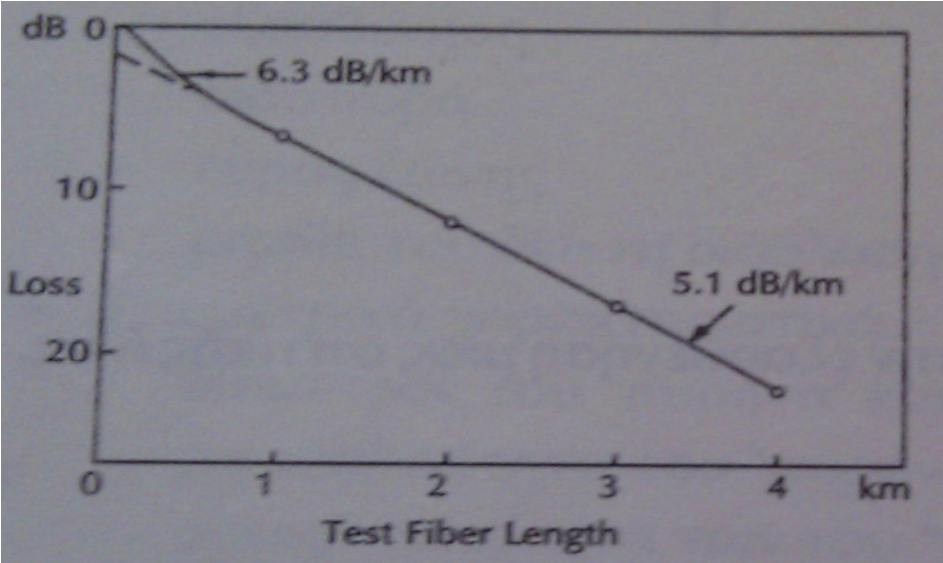
Στο εργαστήριο λόγου χάρη, για να διαπιστώσουμε μερικές παραμέτρους της οπτικής ίνας με αξιόπιστες μετρήσεις, απαιτείται η χρήση του τρόπου “scrambler” που περιγράφουμε στην συνέχεια. Αυτό το εξάρτημα δεν χρησιμοποιείται, όταν δεν απαιτείτε μεγάλη αξιοπιστία. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λεγόμενη «εκτοξεύουσα οπτική ίνα», με πολύ καλά αποτελέσματα.

Mode ‘scramble’

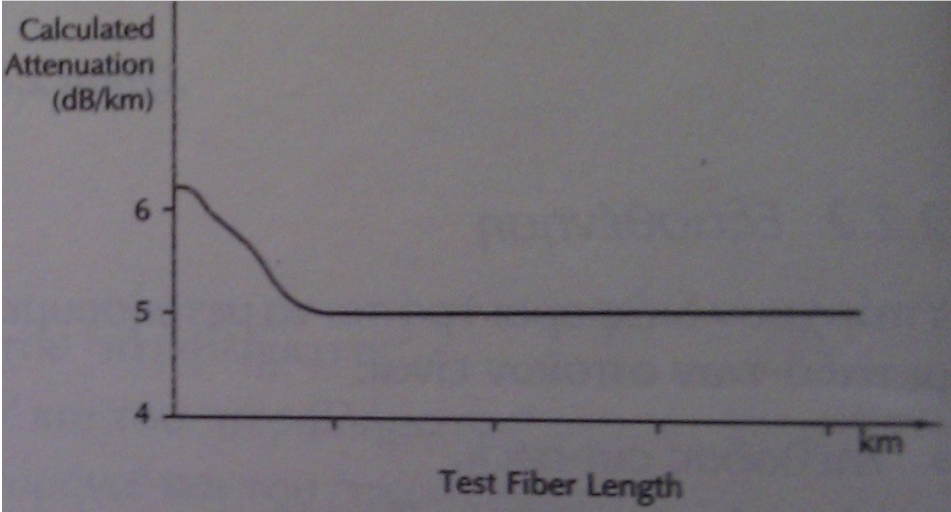
Πριν περιγράψουμε τις μεθόδους μέτρησης για την εξασθένηση, πρέπει να περιγράψουμε τις συνθήκες διάδοσης, που πρέπει να ισχύουν για να πάρουμε μια αξιόπιστη μέτρηση. Το κύριο πρόβλημα, που αφορά στις πολυτροπικές ίνες, είναι το γεγονός, ότι στο κομμάτι που ξεκινά η οπτική ίνα και που ονομάζεται ‘περιοχή μεταβατικής κατάστασης’, κάθε mode έχει διαφορετικό συντελεστή εξασθένησης. Αυτό σημαίνει ότι η εξασθένηση εξαρτάται από τις συνθήκες διέγερσης, δηλαδή από ποια είναι τα διεγερμένα modes και πώς αυτά μοιράζουν την ισχύ. Η κατανομή ισχύος είναι ορισμένη μόνο στο εσωτερικό στην ονομαζόμενη ‘περιοχή σταθερής κατάστασης’, όπου όλα τα modes έχουν τους ίδιους συντελεστές απωλειών και τότε αποκτά νόημα η εξασθένηση.

Επειδή η ‘περιοχή μεταβατικής κατάστασης’ μπορεί να φτάσει μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα, οι μετρήσεις εξασθένησης για μικρά κομμάτια οπτικών ινών μπορεί να είναι λάθος. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει το διάγραμμα της χιλιομετρικής εξασθένησης, που μετρήθηκε σε οπτικές ίνες διαφορετικών μηκών. Σημειώνουμε ότι αν το μήκος της υπο έλεγχο οπτικής ίνας είναι μικρότερο από 1 χιλιόμετρο, η χιλιομετρική εξασθένηση βρέθηκε

μεγαλύτερη απ' το αν παίρναμε την εξασθένηση για οπτικές ίνες μεγαλύτερου μήκους που λειτουργούν στις ίδιες συνθήκες.

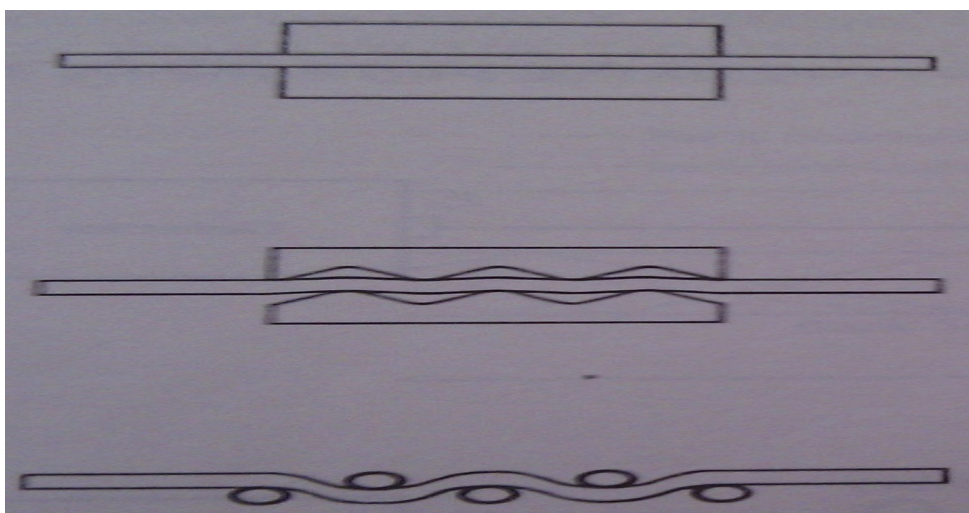


Σχήμα 2.1



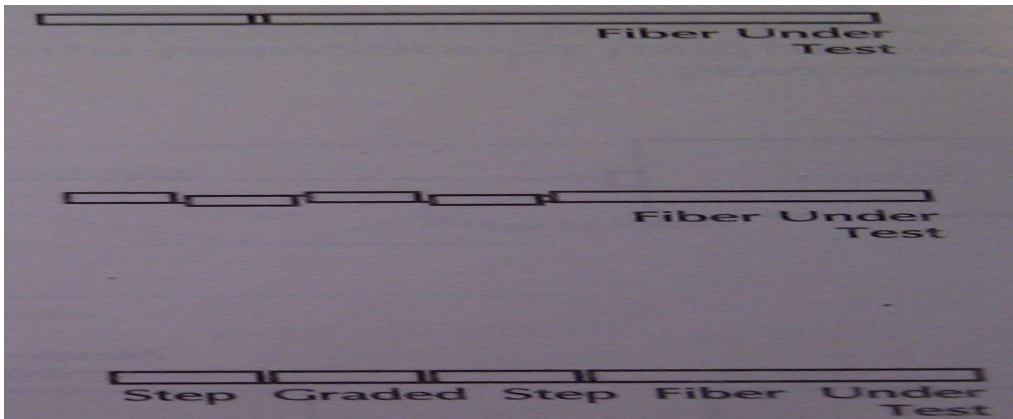
Σχήμα 2.2

Για να εξετάσουμε την οπτική ίνα κάτω από συνθήκες ρύθμισης, μπορούμε να εισάγουμε ένα 'mode scrambler' μεταξύ της πηγής και της οπτικής ίνας που θέλουμε να ελέγξουμε. Αυτό γίνεται αιτία ισχυρών διαταραχών στην οπτική ίνα εξαναγκάζοντας την να φτάσει στην σταθερή κατάσταση της σε μερικά μέτρα. Υπάρχουν διάφορα 'mode scramblers' που δρουν στην κορυφή ή στην βάση της οπτικής ίνας. Τα πρώτα δημιουργούν μικρόκομπους από τα πρώτα κομμάτια της οπτικής ίνας συμπιέζοντας την ίδια την ίνα κατά των ρυτιδωμένων επιφανειών βλέπουμε (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3

Τα δεύτερα χρησιμοποιούν μικρό κομμάτι της οπτικής ίνας με ζαρωμένα άκρα ή μέρη της οπτικής ίνας μερικώς επεξεργασμένα και με εναλλαγές κομματιών με βηματικό δείκτη διάθλασης και διαβαθμισμένο δείκτη διάθλασης της ίνας (Σχήμα 2.4)



Σχήμα 2.4

Ένα πρόχειρο αλλά ενεργό ‘mode scrambler’ μπορούμε να έχουμε δημιουργώντας με το χέρι τα ζαρώματα (ακτίνας περίπου 10 cm) στο πρώτο κομμάτι της οπτικής ίνας (σχεδόν 1m). Όπως ήδη είπαμε, σε μετρήσεις που δεν εκτελούνται στο εργαστήριο, το ‘mode scrambler’ αντικαθίσταται με μία εκτοξεύουσα οπτική ίνα. Αυτό εισάγει το επαρκές ‘μείγμα’ για μια αποδεκτή μέτρηση. Η εκτοξεύουσα οπτική ίνα είναι ένα οπτικό καλώδιο συγκεκριμένου μήκους (3-5 μέτρων περίπου) φτιαγμένο από οπτική ίνα του ίδιου είδους με εκείνη που θέλουμε να μετρήσουμε.

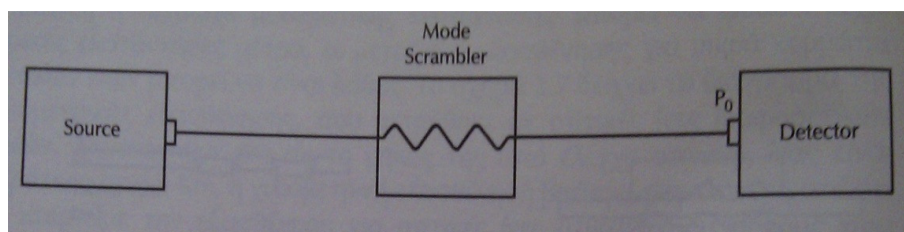
Μέθοδος Cut-Back

Η μέτρηση της εξασθένησης με την μέθοδο του cut-back εκτελείται σε δύο φάσεις:

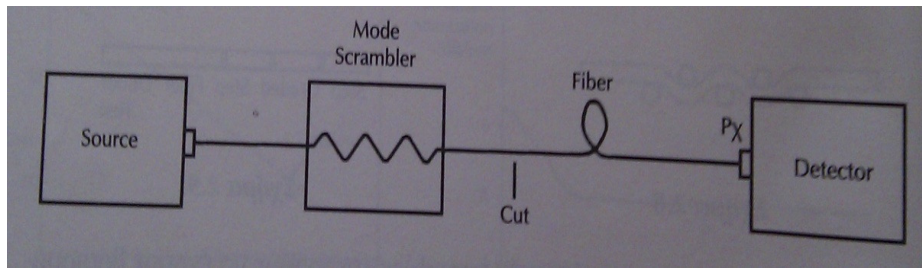
1. Η προς μέτρηση οπτική ίνα συνδέεται με την πηγή και τον ανιχνευτή, με την προφανή σύνδεση ενός 'mode scrambler' στην κορυφή της οπτικής ίνας. Τότε μετράμε την λαμβανόμενη ισχύ (σχήμα 2.5)
2. Κόβουμε την οπτική ίνα μετά το 'mode scrambler' (ή αν δεν υπάρχει 'mode scrambler', σε μερικά μέτρα από την πηγή) και μετράμε την οπτική ισχύ P_0 στην έξοδο του παραμένοντος κομματιού της οπτικής ίνας (εικόνα 2.6). Η ολική εξασθένηση A_{db} που εισάγεται στην οπτική ίνα, μετρούμενη σε db δίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$A_{db} = 10 * \log \frac{P_0}{P_x} \quad (2.1)$$

Η χιλιομετρική εξασθένηση υπολογίζεται διαιρώντας το A_{db} με το μήκος της οπτικής ίνας.



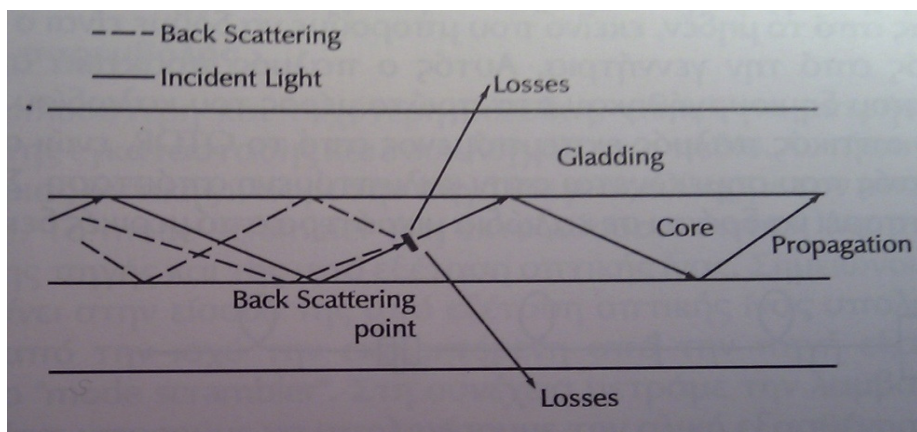
Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6

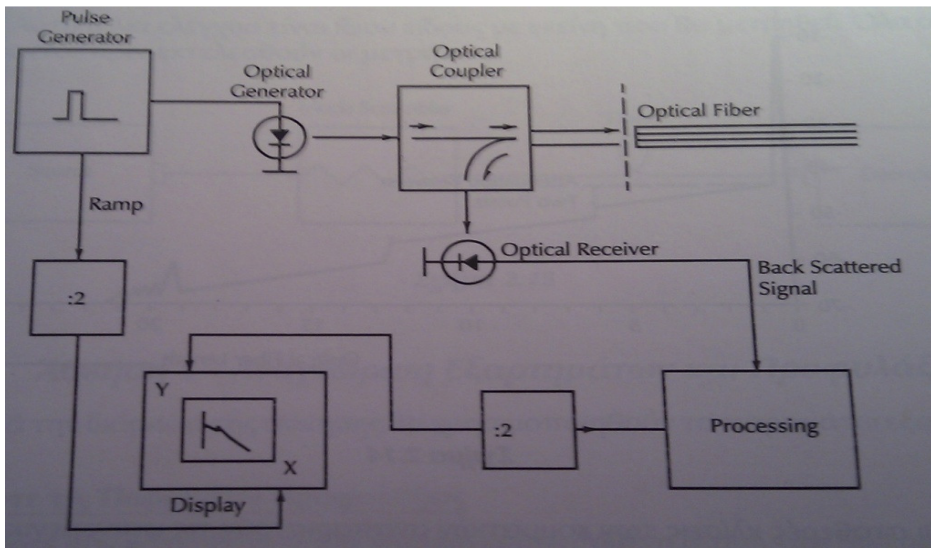
Μέθοδος Οπισθοσκέδασης

Αυτή βασίζεται στο φυσικό αξίωμα σύμφωνα με το οποίο όταν φως διαδίδεται σε ένα μέσο με μικροσκοπικές ανομοιογένειες τότε το φως απλώνεται προς όλες τις κατευθύνσεις ακόμα και προς τα πίσω. (σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7

Το όργανο που εκτελεί αυτή την μέτρηση είναι το οπτικό ανακλασίμετρο (OTDR), που φαίνεται με block διάγραμμα στο παρακάτω (σχήμα 2.8).



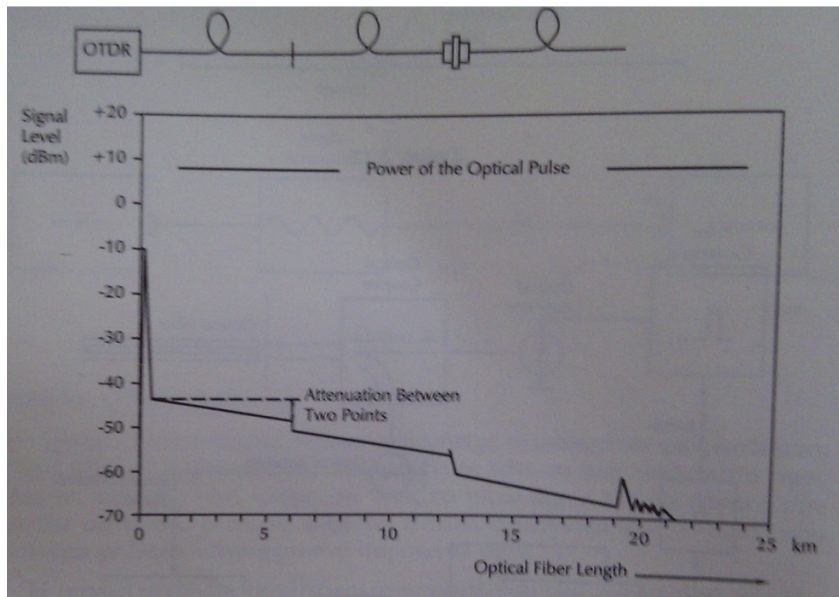
Σχήμα 2.8

Η τεχνική μέτρησης συνίσταται στην εκτόξευση μιας ακολουθίας περιοδικών φωτεινών παλμών μέσα στην οπτική ίνα και στην μέτρηση της αντίστοιχης ισχύος. (Αυτό είναι ανάλογο με την τεχνική που χρησιμοποιείται στους παλμούς ραντάρ, στα οποία ένας παλμός ραδιοσυχνότητας εκπέμπεται για να ανιχνεύσει τον ήχο). Οι απώλειες στην οπτική ίνα μπορούν να υπολογιστούν και να ανιχνευτούν μετρώντας την ισχύ, διασχίζοντας την οπτική ίνα.

Υπολογίζουμε έτσι το χρόνο που η φωτεινή ενέργεια κάνει να διασχίσει την οπτική ίνα στις δυο διευθύνσεις (μπρος - πίσω) η μέτρηση τότε αναπαρίσταται σε ένα X-Y επίπεδο, στο οποίο η οπισθοσκεδάζουσα ισχύς σημειώνεται στον Y – άξονα, συνήθως σε dbm, και η απόσταση στον X – άξονα (σαν γινόμενο της ταχύτητας διάδοσης του φωτός μέσα στην οπτική ίνα επί τον χρόνο που πέρασε).

Στο block διάγραμμα, σημειώνουμε ότι υπάρχουν δύο διαιρέτες του δύο, στον έλεγχο του X – άξονα (χρόνος) και τον Y – άξονα (εξασθένηση). Οι διαιρέτες αυτοί χρειάζονται διότι ο μετρούμενος χρόνος μετάδοσης ουσιαστικά αντιστοιχεί σε μία διπλή διάδοση, το ίδιο επίσης ισχύει και για την εξασθένηση.

Το σχήμα 2.9 δείχνει ένα τυπικό διάγραμμα που αποκτάτε με το OTDR. Ξεκινώντας από το μηδέν, εκείνο που μπορούμε να δούμε είναι ο εκπεμπόμενος παλμός από την γεννήτρια. Αυτός ο παλμός πρακτικά σβήνει τις αντηχήσεις που δημιουργήθηκαν στο πρώτο μέρος του καλωδίου. Ο στενότερος είναι ο οπτικός παλμός εκπεμπόμενος από το OTDR, ενώ ο μικρότερος θα είναι αυτός που σημειώνεται στην καλυπτόμενη απόσταση. Συνήθως ένα OTDR δεν μπορεί να δράσει σε καλώδια μικρότερα από μερικές δεκάδες μέτρα. (Σχήμα 2.9)

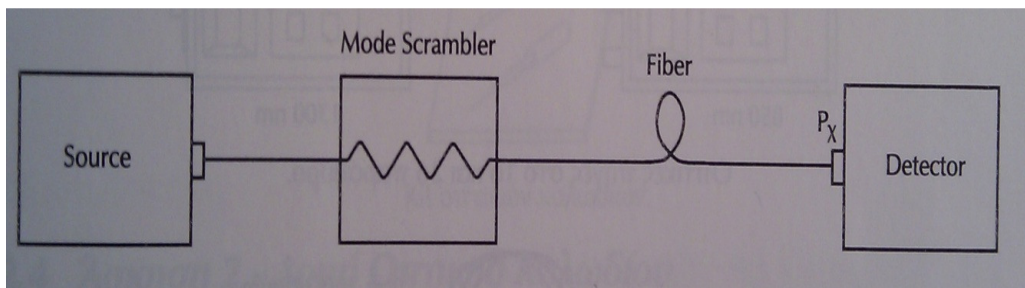


Σχήμα 2.9

Οι σταθερές κλήσεις των κομματιών αναπαριστούν τις φαινομενικές απώλειες της οπτικής ίνας. Οι χιλιομετρική εξασθένηση μπορεί να δειχθεί παίρνοντας την διαφορά των μετρούμενων ισχύων σε δύο σημεία και διαιρώντας με την απόσταση των ίδιων των σημείων. Τα άλματα στην καμπύλη δείχνουν τα σημεία που εισέρχονται κολλήσεις και συνδετήρες. Στην κόλληση φαίνεται ένα μικρό άλμα, ενώ στον συνδετήρα φαίνεται ένα μεγαλύτερο άλμα και αναπαριστά ένα ισχυρότερο δείκτη ανάκλασης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φως, μεταξύ των συνδετήρων, αναπήδα ακόμα και εκτός της οπτικής ίνας στα σημεία που υπάρχει σαν διαχωριστικό ο αέρας. Στα άκρα της οπτικής ίνας υπάρχει μια κορυφή με ισχυρή ανάκλαση.

Μέθοδος παρεμβολής

Είναι η απλούστερη και ταχύτερη μέθοδος, ειδικά για μετρήσεις κατά την διάρκεια της εγκατάστασης και του ελέγχου στο πεδίο. Αυτή συνίσταται στην σύνδεση μιας οπτικής ίνας με την πηγή και μίας άλλης με τον οπτικό ανιχνευτή (σχήμα 2.10). Το 'mode scrambler' ή η εκτοξεύουσα οπτική ίνα μπορεί να μπει μεταξύ της πηγής και της υπο εξέταση οπτικής ίνας. Σημειώνουμε ότι η ισχύς που μπαίνει στην είσοδο της υπο εξέταση οπτικής ίνας υπολογίζεται αφαιρώντας από την ισχύ την εκπεμπόμενη από την πηγή εξασθένηση, που εισάγει το 'mode scrambler'. Στην συνέχεια μετράμε την λαμβανόμενη οπτική ισχύ και έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την ολική εξασθένηση εξ αιτίας της εισαγωγής της οπτικής ίνας.



Σχήμα 2.10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Βασικές αρχές διάδοσης Η/Μ ακτινοβολίας εντός οπτικής ίνας.

3.1 Γενική περιγραφή Η/Μ ακτινοβολίας

Σύμφωνα με τη θεωρία των κυμάτων, η οποία αναπτύχθηκε από τον Maxwell, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι συνισταμένη δύο πεδίων δυνάμεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού. Τα πεδία αυτά είναι κάθετα μεταξύ τους και προς τη διεύθυνση διάδοσης τους. Η διάδοση της ακτινοβολίας δεν απαιτεί την ύπαρξη κανενός ιδιαίτερου μέσου και γίνεται υπό τη μορφή αρμονικών ημιτονοειδών κυμάτων και με σταθερή ταχύτητα στο κενό 299.793 Km/sec (ταχύτητα του φωτός.)

Τρεις βασικοί παράμετροι ορίζουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

Αυτές είναι:

Το μήκος κύματος (λ), δηλαδή η απόσταση μεταξύ των κορυφών δυο διαδοχικών κυμάτων του ίδιου φορτίου, η ταχύτητα (c), δηλαδή η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και η συχνότητα (ν), δηλαδή ο αριθμός των κορυφών των κυμάτων τα οποία περνούν από ένα συγκεκριμένο σημείο σε μια δεδομένη περίοδο. Η σχέση μεταξύ των παραπάνω παραμέτρων είναι: $\lambda = c/\nu$.

Τα όρια της ακτινοβολίας, χωρίς να είναι απολύτως γνωστά, θεωρείται ότι είναι το 10^{-7} (κοσμικές ακτίνες) και το 10^{10} μm (κύματα ραδιοφώνου). Μεταξύ αυτών των ακραίων τιμών υπάρχει μία συνέχεια μηκών κυμάτων τα οποία συνθέτουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το φάσμα διαιρείται σε περιοχές οι οποίες έχουν διάφορα ονόματα. Η πιο γνωστή είναι η ορατή ακτινοβολία δηλαδή το ηλιακό φως.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δέχεται επιδράσεις από την ατμόσφαιρα οι οποίες είναι:

Διάχυση. Η σημαντικότερη αιτία μείωσης της ακτινοβολίας στην ορατή και ανακλούμενη υπέρυθρη περιοχή του φάσματος. Αυτή θεωρητικά διαιρείται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι **Rayleigh** (Ρειλέρ), η **Mie** (Μάι) και η μη εκλεκτική διάχυση.

Η Rayleigh διάχυση είναι αποτέλεσμα της παρουσίας στην ατμόσφαιρα μοριακών και άλλων μικρών σωματιδίων με διάμετρο πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η διάχυση αυτή γίνεται

αντιληπτή τις ημέρες κατά τις οποίες στην ατμόσφαιρα υπάρχουν λίγοι υδρατμοί και σωματίδια σκόνης. Είναι η αιτία δημιουργίας του μπλε χρώματος του ουρανού.

Η Mie διάχυση είναι μια άλλη κατηγορία διάχυσης η οποία συμβαίνει όταν στην ατμόσφαιρα υπάρχουν σωματίδια με διάμετρο σχεδόν ίση με τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας. Τέτοια σωματίδια είναι ο καπνός η σκόνη και οι υδρατμοί. Η Mie διάχυση επηρεάζει τα μεγαλύτερα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας (κόκκινης) και αυτό είναι μια αιτία που ο ουρανός φαίνεται κοκκινωπός. Συνήθως συμβαίνει στα χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας (κάτω από 4 Km).

Η μη εκλεκτική είναι η τρίτη κατηγορία διάχυσης. Αυτή συμβαίνει όταν τα σωματίδια της ατμόσφαιρας έχουν διάμετρο πολύ μεγαλύτερη από τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας. Τέτοια σωματίδια είναι τα σταγονίδια νερού των σύννεφων. Στη περίπτωση της μη εκλεκτικής διάχυσης όλα τα μήκη κύματος της ορατής ακτινοβολίας διαχέονται κατά περίπου ίσες ποσότητες. Για το λόγο αυτό, αποτέλεσμα της μη εκλεκτικής διάχυσης είναι το άσπρο χρώμα των σύννεφων.

β) **Απορρόφηση:** Απορρόφηση είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα μέρος της ακτινοβολίας που συναντά ένα σωματίδιο της ατμόσφαιρας δε διαχέεται, ούτε ανακλάται, αλλά απορροφάται από αυτό και μετατρέπεται σε άλλη μορφή ακτινοβολίας π.χ. θερμότητα.

γ) **Ανάκλαση:** Τα διάφορα σωματίδια της ατμόσφαιρας ανακλούν μέρος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτά.

δ) **Διάθλαση:** Όταν η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περνά από ένα μέσο σε κάποιο άλλο, διαφορετικής πυκνότητας αλλάζει η κατεύθυνση της (διαθλάται).

3.2. Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας

A) Διάδοση μέσα σε υλικό

Η διάδοση των Η/Μ κυμάτων γίνεται με τρεις μηχανισμούς :

Ανάκλαση: Μια ακτίνα φωτός που χτυπά πάνω σε μια ευθεία επιφάνεια ανακλάται υπο γωνία ίση με τη γωνία πρόσπτωσης:

Νόμος Ανάκλασης:

Γωνία πρόσπτωσης (i) = Γωνία ανάκλασης (r)

Διάθλαση: Μια ακτίνα φωτός διαθλάται υπό διαφορετική γωνία από αυτή της γωνίας πρόσπτωσης. Η διάθλαση ακολουθεί το νόμο του Snell.

Νόμος του Snell:

$$n_0 \sin a = n_2 \sin b$$

Στη περίπτωση μας οι συντελεστές n_0 και n_2 ονομάζονται δείκτες διάθλασης.

Το φως διαθλάται επειδή θα έχει μικρότερη ταχύτητα v σε ένα μέσο με υψηλότερο δείκτη διάθλασης και περιγράφεται από τη παρακάτω σχέση:

$$v = \frac{c}{n_g} \rightarrow n_g = \frac{c}{v} \rightarrow n_g \geq 1$$

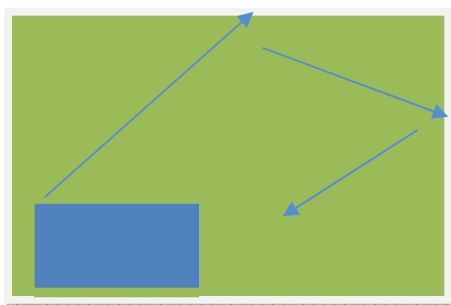
Όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και ο δείκτης διάθλασης n_g εξαρτάται από το μήκος κύματος λ ως εξής:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

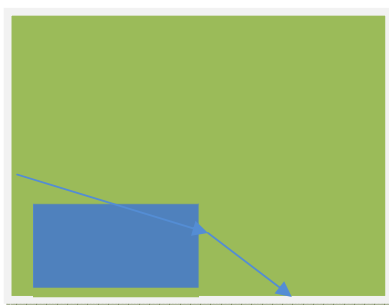
Σκέδαση:

Σε ένα άμορφο υλικό, όπως το γυαλί, η πυκνότητα του υλικού δεν είναι ομοιόμορφη σε όλο τον όγκο του. Υπάρχουν σημεία στα οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε αλλαγές στη πυκνότητα. Το ίδιο ισχύει για τα αέρια και τα υγρά. Επιπλέον δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα απολύτως καθαρό υλικό.

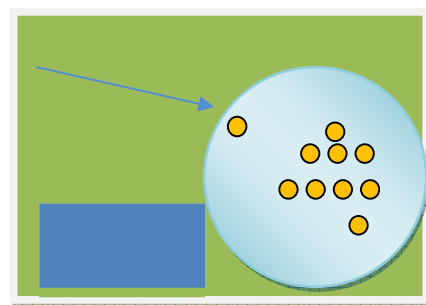
Μια ακτίνα που ταξιδεύει σε ένα τέτοιο υλικό θα σκεδαστεί προς διαφορετικές κατευθύνσεις. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη παρουσία μικρών σωματιδίων στα οποία προσπίπτει το φως και σκεδάζεται προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις. Η σκέδαση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του μήκους κύματος στις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η σκέδαση. Μεγάλα σωματίδια όπως η σκόνη σκεδάζουν το φως σε μικρότερες γωνίες. Αν το σωματίδιο είναι αρκετά μεγάλο, ενδέχεται να λειτουργήσει σαν καθρέπτης και να ανακλάσει το φως προς τα πίσω. Το ουράνιο τόξο αποτελεί παράδειγμα αυτού του φαινομένου.



Ανάκλαση

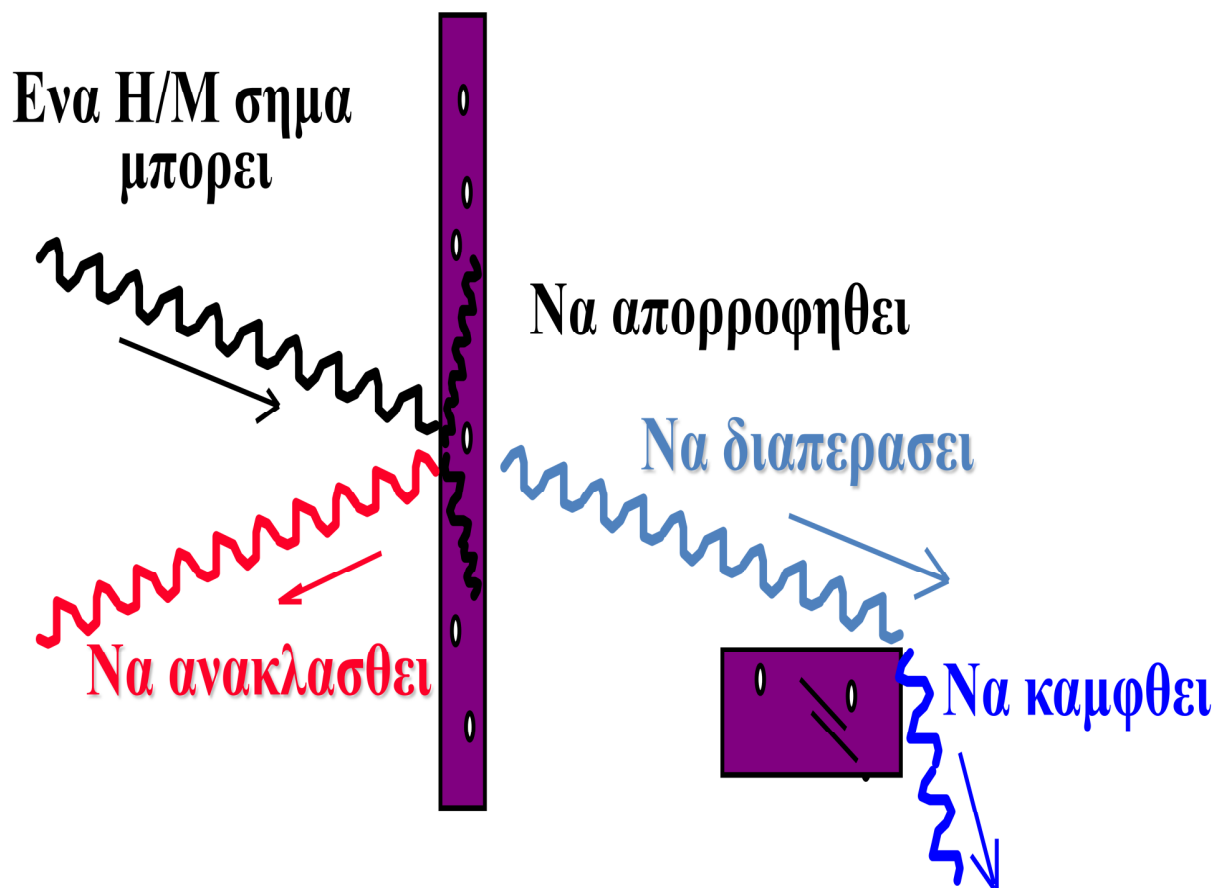


Περίθλαση



Σκέδαση

Διάδοση στη πράξη



Τρία είναι τα σηµαντικά φαινόµενα που παρατηρούνται

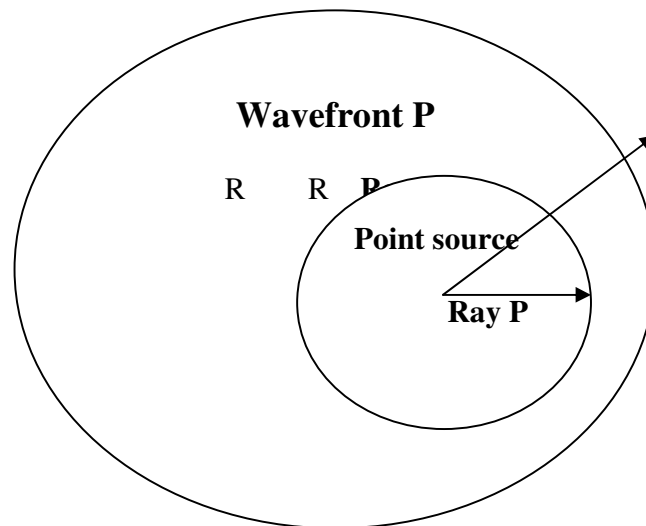
- **Απώλειες διαδροµής (path losses)** = απόσβεση λόγω απόστασης
- **Σκίαση (shadowing)** = απόσβεση λόγω µεγάλων εµποδίων
- **Διαλείψεις (fading)** = µεταβολές µικρής χρονικής κλίµακας που οφείλονται στο περιβάλλον

B) Διάδοση στον ελεύθερο χώρο

Ένα ηλεκτροµαγνητικό κύµα που εκπέµπεται από µια σηµειακή πηγή διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο οµοιόµορφα προς όλες τις κατευθύνσεις. Η διάδοση του κύµατος είναι σφαιρική όπως φαίνεται και στο σχήµα 2.1. Για να απλουστεύσουµε την έννοια της διάδοσης φανταζόµαστε ακτίνες που εκπέµπονται από την σηµειακή πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις.

Σε απόσταση P από την σηµειακή πηγή το κύµα έχει µια συγκεκριµένη φάση.

Η ακτίνα αφήνει την σημειακή πηγή όταν η τάση και το ρεύμα είναι μέγιστα σε ένα κύκλωμα το οποίο τροφοδοτεί την σημειακή πηγή π.χ σε ένα μέγιστο του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 2.1 Σφαιρικό μέτωπο κύματος

Όλα τα σημεία εκείνα τα οποία έχουν την ίδια φάση σχηματίζουν ένα επίπεδο το οποίο ονομάζεται μέτωπο κύματος. Αν το μήκος της ακτίνας Q είναι διπλάσιο του

P τότε η νέα σφαίρα που δημιουργείται έχει επιφάνεια 4 φορές μεγαλύτερη της σφαίρας ακτίνας P . Αποδεικνύεται, ότι η συνολική ισχύς της σημειακής πηγής εξαπλώνεται καλύπτοντας τετραπλάσια περιοχή (σφαιρική) για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Έτσι αν ορίσουμε την πυκνότητα ισχύος σαν ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας τότε η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται στο $\frac{1}{4}$ της τιμής της όταν η απόσταση από την πηγή διπλασιάζεται.

Αποδεικνύεται ότι η πυκνότητα ισχύος είναι αντίστροφα ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Ο νόμος αυτός ονομάζεται νόμος του αντίστροφου τετραγώνου και ισχύει για κάθε μορφή διάδοσης στον ελεύθερο χώρο.

Έτσι έχουμε:

$$P = \frac{Pt}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Όπου P = πυκνότητα ισχύος σε απόσταση r από την ισοτροπική πηγή

Pt = ακτινοβολούμενη ισχύς.

Με τον όρο ισοτροπική πηγή εννοούμε μια πηγή η οποία ακτινοβολεί ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις στον χώρο. Αν και στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ισοτροπική πηγή, η έννοια της ισοτροπικής ακτινοβολίας είναι πολύ χρήσιμη και πολύ συχνά χρησιμοποιούμενη. Αποδεικνύεται ότι ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου ισχύει ακόμα και όταν η πηγή δεν είναι ισοτροπική. Ωστόσο, για σφαιρικά κύματα η ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας πρέπει να είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του χώρου (όπως είναι για παράδειγμα στον ελεύθερο χώρο). Ένας χώρος για τον οποίο ισχύει το παραπάνω κατά την διάδοση των σφαιρικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ονομάζεται ισοτροπικός.

Οι εντάσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι επίσης σημαντικές. Οι δύο αυτές ποσότητες αντιπροσωπεύουν την τάση και το ρεύμα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, και οι μονάδες τους αντίστοιχα είναι Volt/m και A/m. Για ένα ηλεκτρικό κύκλωμα έχουμε $V=ZI$, ενώ για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει:

$$\epsilon = fH \quad (2)$$

όπου ϵ = ενεργός τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

H = ενεργός τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου

f = χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου (Ω)

Η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου δίνεται από τη σχέση:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

όπου μ = μαγνητική διαπερατότητα του μέσου

ϵ = διηλεκτρική σταθερά του μέσου

Για το κενό ισχύουν:

$$\varepsilon = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\mu = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$$

Θυμίζουμε ότι η διαπερατότητα είναι ισοδύναμη της επαγωγής και η διηλεκτρική σταθερά είναι το ισοδύναμο της χωρητικότητας στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Μπορούμε τώρα από την παραπάνω σχέση να υπολογίσουμε την χαρακτηριστική αντίσταση του κενού.

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = 120\pi = 377\Omega \quad (4)$$

Η γνώση της χαρακτηριστικής αντίστασης κάνει δυνατό τον υπολογισμό της έντασης του πεδίου σε απόσταση r από την ισοτροπική πηγή.

Έτσι όπως στα ηλεκτρικά κυκλώματα ισχύει: $P = V^2/Z$,

Για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει : $P = \varepsilon^2/Z$

Από την τελευταία εξίσωση και τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$\varepsilon = P \times Z = \frac{Pt}{4\pi r^2} \times 120\pi = \frac{30Pt}{r^2}$$

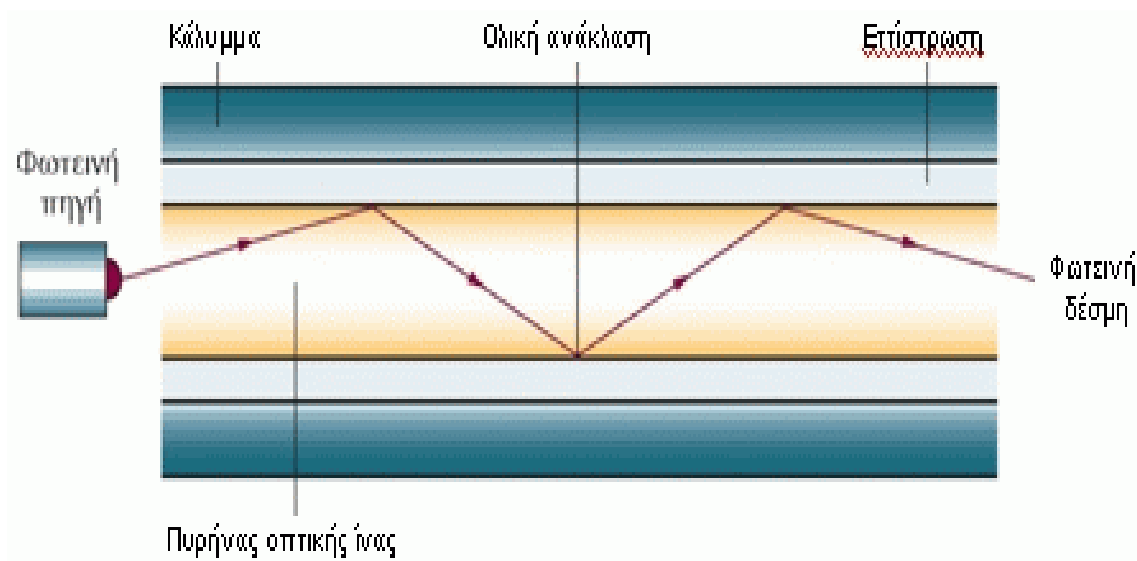
$$\varepsilon = \frac{\sqrt{30Pt}}{r} \quad (5)$$

Από την εξίσωση (5) είναι φανερό ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αντίστροφα ανάλογη της απόστασης από την πηγή και ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας ισχύος.

3.3 Διάδοση ακτινοβολίας στο πυρήνα της οπτικής ίνας μέσω του φαινομένου της ανάκλασης.

Το οπτικό σήμα κυματοδηγείται στο πυρήνα της οπτικής ίνας μέσω του φαινομένου των διαδοχικών εσωτερικών ολικών ανακλάσεων στη κοινή επιφάνεια πυρήνα-μανδύα.

Στο εσωτερικό του πυρήνα, μια ακτίνα φωτός, προσπίπτουσα στη κοινή επιφάνεια με γωνία μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας, ανακλάται ολικά και συνεχίζει τη διαδρομή της εντός του πυρήνα, μέσω συνεχών ανακλάσεων. Αντίθετα, αν η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη της κρίσιμης γωνίας, το φως διαθλάται μέσα από το μανδύα και χάνεται μετά από κάποια απόσταση.



Σχήμα 2.2: Κυματοδήγηση μέσω ολικής ανάκλασης σε οπτική ίνα

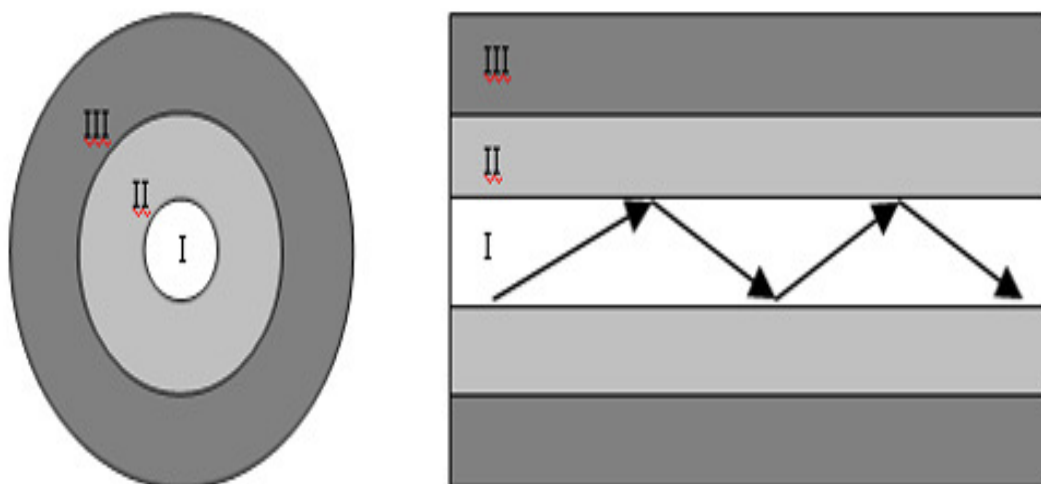
Τα ειδικότερα χαρακτηριστικά της μετάδοσης του φωτός σε ένα οπτικό κυματοδηγό εξαρτώνται:

- Από τη διάμετρο του πυρήνα
- Τους συντελεστές διάθλασης πυρήνα και μανδύα
- Το μήκος κύματος του φωτός

3.4 Βασική αρχή λειτουργίας

Η ολική ανάκλαση μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα μέσα σε ένα πρίσμα ή ένα διαφανές γυαλί.

Η αρχή διάδοσης του φωτός μέσα σε μια οπτική ίνα, βασίζεται στην αρχή της ολικής ανάκλασης. Μέσα σε μια οπτική ίνα, υπάρχουν δύο μέσα διάδοσης (ο πυρήνας και ο μανδύας) με δείκτες διάθλασης που διαφέρουν ελάχιστα. Οι πιο συνηθισμένες τιμές είναι $n_1=1.47$ $n_2=1.46$, οι οποίες μας δίνουν κρίσιμη γωνία $i=83.8^\circ$



Σχήμα 2.3 Διάθλαση του φωτός καθώς εισέρχεται στην ίνα και ολική ανάκλαση του.

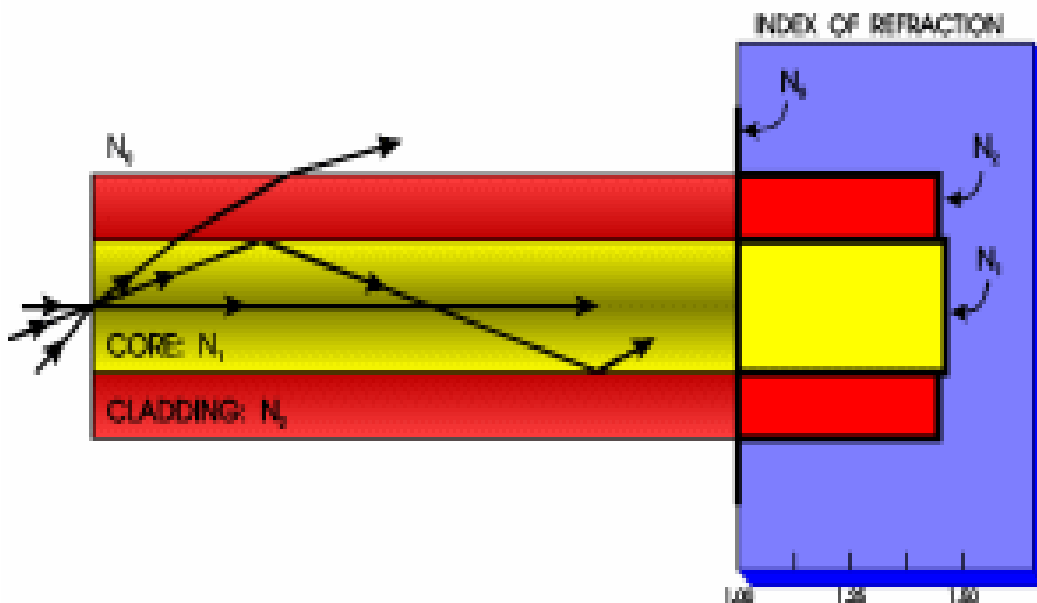
Η φωτεινή δέσμη που μεταφέρει την πληροφορία μεταδίδεται μέσω του πυρήνα της οπτικής ίνας. Η φωτεινή δέσμη οδεύει με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της ίνας προς το άλλο άκρο. Η επιτυχία της μετάδοσης αυτής οφείλεται στο γεγονός ότι το σήμα υφίσταται ολικές ανακλάσεις με αποτέλεσμα η ενέργεια της φωτεινής δέσμης να παραμένει εγκλωβισμένη στην οπτική ίνα. Βασική προϋπόθεση για να συμβεί η ολική ανάκλαση είναι αφ' ενός ο δείκτης

διάθλασης του εξωτερικού υλικού να είναι μικρότερος του εσωτερικού, αφ' ετέρου η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας να είναι μεγαλύτερη από τη κρίσιμη γωνία.

Ο δείκτης διάθλασης στο εσωτερικό του πυρήνα μπορεί να έχει μια σταθερή τιμή ή να μεταβάλλεται. Αυτό περιγράφεται μέσω της λεγόμενης κατανομής του δείκτη διάθλασης.

Αυτό το χαρακτηριστικό της ίνας είναι πολύ κρίσιμο μιάς και καθορίζει την τιμή της διασποράς που εμφανίζει η οπτική ίνα.

Αν ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα έχει παντού την ίδια τιμή τότε η ίνα λέγεται βηματικού δείκτη διάθλασης. Αντίστοιχα στην ίνα διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης ο δείκτης διάθλασης έχει μέγιστη τιμή στο κέντρο του πυρήνα μειώνεται σταδιακά μέχρι τη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα περιβλήματος όπου έχει την ελάχιστη τιμή.



Σχήμα 2.4 Μετάδοση σε οπτική ίνα

Στην περίπτωση των οπτικών ινών η επίστρωση (cladding) είναι με υλικό που έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτόν του πυρήνα. Ο άλλος στόχος που είναι η πρόσπτωση των ακτινών με γωνία μεγαλύτερη της οριακής επιτυγχάνεται με τη χρήση ινών πολύ μικρότερου αριθμητικού ανοίγματος. Το αριθμητικό άνοιγμα δίνεται από τη σχέση $NA = \sin \theta$ και παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Καθορίζει την ισχύ του φωτός που συλλέγεται στην οπτική ίνα.

3.5 Διασπορά

Το φως που ταξιδεύει μέσα σε ένα κυματοδηγό θα υποστεί παραμόρφωση. Το εκπεμπόμενο φως θα διευρυνθεί στο πεδίο του χρόνου. Στον τομέα της οπτικής ινών το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται διασπορά. Υπάρχουν δυο διαφορετικά είδη διασποράς:

- Η διατροπική διασπορά που εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες.
- Η ενδοτροπική διασπορά που εμφανίζεται στις μονότροπες και στις πολύτροπες οπτικές ίνες.

3.5.1 Διατροπική Διασπορά

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μια πολύτροπη ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υπο-παλμών, ο καθένας με τη χαρακτηριστική του γωνία πρόσπτωσης μέσα στη ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διαφέρει λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Έτσι οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα θα φτάσουν στο τέλος της ίνας σε ελάχιστα διαφορετικούς χρόνους. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιγραφεί ως διεύρυνση του παλμού (κατά τη διάρκεια διάδοσης του μέσα στην ίνα), λόγω αύξησης της διάρκειας του. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει αρκετά της τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών.

Η διατροπική διασπορά προκαλεί τα παρακάτω προβλήματα :

- Μείωση του εύρους μετάδοσης
- Μείωση της απόστασης μετάδοσης

Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της διατροπικής διασποράς μέσα σε μια ίνα. Ο κάθε ρυθμός διάδοσης μεταφέρει ενέργεια από και προς κάποιον άλλο. Οι ρυθμοί χαμηλής τάξης (ρυθμοί με μικρή γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετατρέπονται σε ρυθμούς υψηλής τάξης (μεγάλη γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετά τη μεταφορά ενέργειας. Το mode coupling, όπως ονομάζεται το προηγούμενο φαινόμενο, λαμβάνει χώρα περισσότερο σε σημεία <<μη καθαρότητας>> του πυρήνα, σε κολλήσεις και σε απότομα λυγίσματα της οπτικής ίνας. Στις σύγχρονες ίνες, ήταν δυνατό να μειώσουμε το mode coupling, βελτιώνοντας την ποιότητα της ίνας. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την αδρανοποίηση του παράγοντα διαφορά χρόνου δt . Η διαφορά αυτή δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους της ίνας, αλλά σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\delta t = \sqrt{\text{fiberlength}(L)}$$

3.5.2 Ενδοτροπική Διασπορά

Ακόμα και αν αδρανοποιηθεί πλήρως η διατροπική διασπορά, επιτρέποντας μόνο στο θεμελιώδη ρυθμό να μεταδίδεται μέσα στην ίνα (μονότροπη), θα συνεχίσει να υπάρχει διασπορά του συγκεκριμένου ρυθμού. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται χρωματική διασπορά μαζί με διασπορά πόλωσης ρυθμού μετάδοσης. Η χρωματική διασπορά μέσα σε μονότροπη ίνα συνίσταται από τη διασπορά υλικού και τη διασπορά κυματοδηγού.

Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310nm, όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν.

Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνο αν αλλάξουμε τη σύσταση του γυαλιού στο πυρήνα και στον μανδύα της ίνας. Η διασπορά κυματοδηγού οφείλεται στο προφίλ δείκτη διάθλασης και μπορεί να διορθωθεί μόνο αλλάζοντας αυτό το προφίλ.

Ο πρωτεύον λόγος εμφάνισης του φαινομένου της χρωματικής διασποράς είναι η πηγή διάδοσης του φωτός. Τα laser δεν είναι 100% μονοχρωματικά, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε παλμός που διαδίδεται περιέχει φως το οποίο ξεφεύγει από το κόκκινο και το μπλε όριο (άνω και κάτω όριο) του φάσματος του συγκεκριμένου μήκους κύματος που χρησιμοποιείται. Ο παράγοντας αυτός καλείται φασματικό εύρος και για εμβέλεια μήκους κύματος 1 - 1.5 μm , μια δίοδος laser έχει φασματικό εύρος 0.1 – 1 nm ενώ ένα LED 50 – 100 nm. Η χρωματική διασπορά είναι μηδέν ή περίπου μηδέν κοντά στα 1310 nm για μια συνηθισμένη μονότροπη ίνα. Η ελάχιστη εξασθένιση της ίνας λαμβάνει χώρα γύρω στα 1550 nm. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην κατασκευή ειδικών ινών, των οποίων το σημείο μηδενισμού της χρωματικής διασποράς έχει μετατοπιστεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.

3.5.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης(PMD)

Η μονότροπη διάδοση δεν είναι ποτέ στη πραγματικότητα μονότροπη. Υπάρχουν πάντα δυο ρυθμοί διάδοσης. Όταν το φως εισέρχεται στην ίνα από το laser, τα πεδία αυτά είναι σύγχρονα και κάθετα μεταξύ τους. Κάθε ένα από αυτά τα πεδία έχει διαφορετική πόλωση.

Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης στο τέρμα της ίνας των δυο αυτών ρυθμών διαφορετικής πόλωσης, ονομάζεται διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης ή PMD και είναι της τάξης των psec. Μετρώντας για ένα χιλιόμετρο ο παράγοντας PMD μιας ίνας έχει μονάδα $\text{ps} / \sqrt{\text{km}}$, αυτό συμβαίνει λόγω του mode coupling. Κάποιες από τις πρώτες οπτικές ίνες και κάποιες ίνες χαμηλής ποιότητας που κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα έχουν παράγοντα PMD μέχρι και 6 $\text{ps} / \sqrt{\text{km}}$ ενώ ίνες υψηλής ποιότητας έχουν παράγοντα μικρότερο από 0.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Οπτικός πομπός-Δέκτης

4α Δίοδοι Ημιαγωγοί Εκπομπής Φωτός (LED)

4α.1 Εισαγωγή

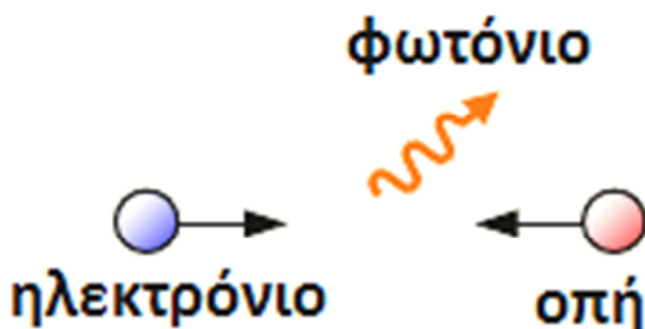
Η δίοδος εκπομπής φωτός είναι μία ημιαγωγίμος δίοδος που εκπέμπει φως όταν ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται με εμπρόσθια ορθή πόλωση (forward-biased) προς τη συσκευή, όπως ακριβώς και σε ένα απλό κύκλωμα. Το αποτέλεσμα είναι μια μορφή ηλεκτροφωταύγειας, όπου ασυνεχές και στενού φάσματος φως εκπέμπεται από το πέρασμα p-n σε ένα συμπαγές υλικό.

Η πρώτη αναφορά που έγινε στις LED (Light-emitting diodes) ήταν το 1907 από τον άγγλο H. J. Round ο οποίος και παρατήρησε ότι αν διέλθει συνεχές ρεύμα σε ένα κομμάτι από ανθρακούχο πυρίτιο (SiC) εκπέμπεται φως. Αυτή όμως η ανακάλυψη για αρκετά χρόνια δεν είχε κάποια πρακτική χρήση καθώς το εκπεμπόμενο φως ήταν πολύ χαμηλής ισχύος. Το 1955 ο Rubin Braunstein ανέφερε πως μπορεί να παραχθεί υπέρυθρη ακτινοβολία από έναν ημιαγωγό ο οποίος είναι εμπλουτισμένος με αρσενιούχο γάλλιο στους 77 kelvin. Οι πρώτες LED κατασκευάστηκαν από τον Nick Holonyak, Jr., το 1962 και έγιναν διαθέσιμες στο κοινό. Μέχρι το 1968 οι ορατές LED, χρώματος κόκκινο, και οι υπέρυθρες LED είχαν πολύ υψηλό κόστος το οποίο υπολογίζετε στα 200 δολάρια.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 με την χρήση ημιαγωγού από αρσενιούχο φωσφίδιο του γαλλίου και του αλουμινίου (GaAl/AsP) αυξάνουν κατά 50 περίπου φορές την ισχύ εκπομπής του φωτός. Τα σημερινά LED έχουν τόσο αποτελεσματικότητα και εκπομπή φωτός ώστε να εξετάζεται η χρήση τους σε πολλές εφαρμογές, όπως σηματοδότες και πινακίδες κυκλοφορίας, φωτισμός διακοπών και οργάνων αυτοκινήτων.

4α.2 Αρχή λειτουργίας των LED

Η βασική αρχή των LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να ελέγχει ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις p- και n- πλευρές αντίστοιχα. Το ελεγχόμενο φορτίο μειονότητας επανασυνδέεται με το φορτίο πλειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης ή στην ουδέτερη περιοχή. Σε ημιαγωγούς άμεσου διάκενου η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός αφού η ακτινοβολία επανασύνδεσης κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 Επανασύνδεση ηλεκτρονίου οπής με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου.

Οι φορείς φορτίου - τα ηλεκτρόνια και οι οπές ροής – περνούν από την επαφή κινούμενα από ηλεκτρόδια με διαφορετικό δυναμικό. Όταν ένα ηλεκτρόνιο συναντά μια οπή, πέφτει σε ένα χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο και απελευθερώνει ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται και επομένως και το χρώμα του, εξαρτάται από την ενέργεια χάσματος των υλικών που αποτελούν την επαφή p-n. Η ενέργεια των εκπεμπόμενων φωτονίων, $h\nu$, ισούται κατά προσέγγιση με το ενεργειακό χάσμα E_g

$$E_g = E_{\text{φωτονίου}} = h \cdot \nu$$

Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωχή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης είναι μη ακτινοβόλες με παραγωγή θερμότητας μάλλον παρά φωτός.

Η εξωτερική απόδοση $\eta_{εξ}$ ενός LED είναι ένα μέτρο της απόδοσης της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε εκπεμπόμενη εξωτερικά φωτεινή ενέργεια. Στο μέγεθος αυτό συνυπολογίζεται η εσωτερική απόδοση της ακτινοβολούσας διαδικασίας επανασύνδεσης και η επακόλουθη απόδοση της εξόδου των φωτονίων από την διάταξη. Η ηλεκτρική ενέργεια στην είσοδο ενός LED ισούται απλά με το γινόμενο του ρεύματος επί την τάση της διόδου ($I \cdot V$). Αν η φωτεινή ισχύς που εκπέμπεται από την διάταξη είναι $P_{εξ}$, τότε:

$$\eta_{εξ} = P_{εξ}(\text{οπτική}) \cdot I \cdot V \cdot 100\%$$

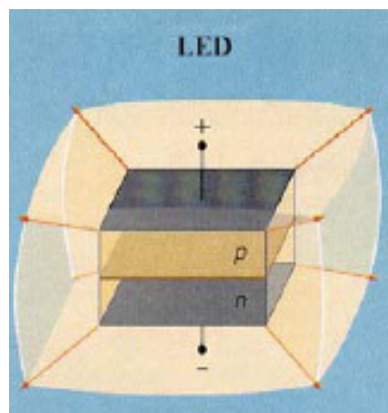
Για τους ημιαγωγούς εμμέσου ενεργειακού διακένου, η τιμή της απόδοσης είναι μικρότερη από 1%, ενώ για τους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διακένου με την ορθή δομή διάταξης, η $\eta_{εξ}$ μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη.

4α.3 Δομή των LED

Η δομή ενός LED πρέπει να είναι τέτοια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μπορούν να απομακρύνονται από την διάταξη χωρίς να επαναπορροφώνται από το ημιαγωγίμο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η p-περιοχή πρέπει να είναι επαρκώς ρηχή. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά ημιαγωγίμα υλικά άμεσου ενεργειακού διακένου, τα οποία μπορούν εύκολα να νοθευτούν και να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή εμπορικών LED που εκπέμπουν ακτινοβολία στην ερυθρή και την υπέρυθρη περιοχή μηκών κύματος του φάσματος. Μια ένωση p-n ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με διαφορετική νόθευση, οι οποίοι όμως αποτελούνται από το ίδιο υλικό, έχουν δηλαδή το ίδιο ενεργειακό διάκενο, ονομάζεται ομοεπαφή. Μια ένωση ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με το ίδιο ενεργειακό διάκενο ονομάζεται ετεροεπαφή. Μια ημιαγωγίμη δομή διάταξης η οποία περιλαμβάνει ενώσεις ανάμεσα σε υλικά με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο ονομάζεται διάταξη ετεροδομής (σχήμα 5β.2).

Αν η LED κατασκευάζεται από ένα απλό ημιαγωγό, υπάρχει ένας αριθμός προβλημάτων που μειώνει την απόδοση της συσκευής. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι σε μία LED ομοιοδομής (μια συσκευή βασισμένη σε ένα απλό ημιαγωγό), ο όγκος εκπομπής φωτονίων πρέπει να είναι κοντά στην επιφάνεια ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μην απορροφώνται ξανά. Αφού κοντά στην

επιφάνεια η ποιότητα του ημιαγωγού δεν είναι συνήθως πολύ καλή λόγω της παρουσίας καταστάσεων ατελειών, αυτό προκαλεί μεγάλο αριθμό μη ακτινοβόλων επανασυνδέσεων με την βοήθεια επιφανειακών καταστάσεων. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι το ότι τα ηλεκτρόνια που εγχέονται από την πλευρά στην p-περιοχή μπορούν να διαχυθούν σε μεγάλες αποστάσεις πριν επανασυνδεθούν με οπές. Έτσι ο ενεργός όγκος από τον οποίο εξέρχονται τα φωτόνια είναι πολύ μεγάλος. Η ετεροδομή LED λύνει αυτά τα προβλήματα εγχέοντας φορτίο από ένα υλικό μεγαλύτερου ενεργειακού διαύκνου σε μια περιοχή στενού διαύκνου.



Σχήμα 4.2 Δομή των LED

4α.4 Κυκλώματα οδήγησης των LED

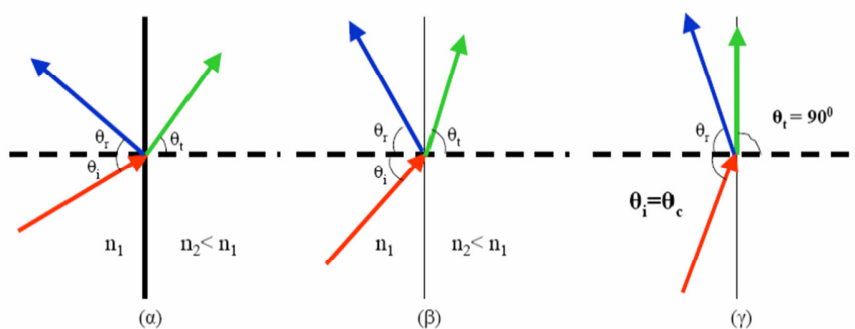
Ο σκοπός των κυκλωμάτων οδήγησης είναι να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στην οπτική πηγή και να διαμορφώνουν την έξοδο του φωτός, σύμφωνα με το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί. Τα κυκλώματα αυτά είναι σχετικά απλά για της LED, αλλά γίνονται όλο και πιο περίπλοκα για οπτικούς πομπούς υψηλού ρυθμού bit, οι οποίοι χρησιμοποιούν laser ημιαγωγούς σαν οπτική πηγή.

Στην αναλογική μετάδοση πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η φωτεινή έξοδος θα παρακολουθεί με ακρίβεια την αναλογική τάση εισόδου ως προς το πλάτος και τη φάση. Έτσι η απόκριση της LED πρέπει να έχει γραμμική εξάρτηση από την τάση ή το ρεύμα εισόδου. Η απαίτηση αυτή πολλές φορές είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί στην πράξη γιατί οι πηγές LED παρουσιάζουν από τη φύση τους μη γραμμικότητες. Το γεγονός αυτό τείνει να περιορίσει την απόδοση των αναλογικών συστημάτων εκτός και αν γίνει ιδιαίτερη πρόβλεψη για την χρήση

κατάλληλων κυκλωμάτων αντιστάθμισης. Σε πολλές τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις όπου ένα μόνο αναλογικό σήμα διαβιβάζεται είναι ανεκτά κάποια όρια παραμόρφωσης πλάτους και φάσης, πράγμα που δεν συμβαίνει στα συστήματα πολυπλεξίας με διαίρεση συχνότητας στα οποία είναι αναγκαίος ένας υψηλός βαθμός γραμμικότητας ώστε να ξεπεραστεί η αλληλοπαρεμβολή μεταξύ γειτονικών καναλιών που οφείλεται σε νέες φασματικές συνιστώσες λόγω αναδιαμόρφωσης.

4α.5 Σύζευξη της LED με την οπτική ίνα και εισαγωγή (launching) του φωτός μέσα στην ίνα.

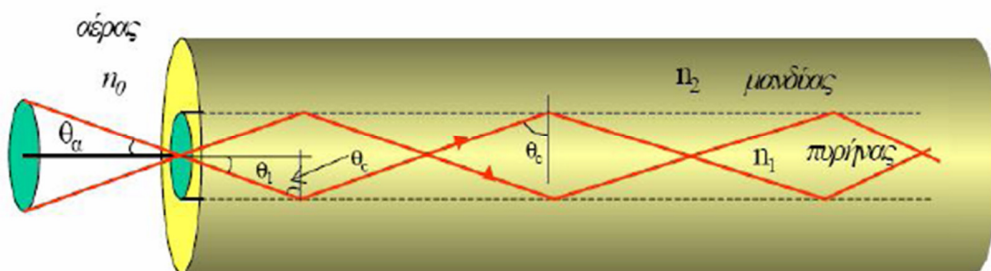
Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης είναι ο καθοριστικός λόγος για την τεχνολογική αξιοποίηση των οπτικών ινών ως κυματοδηγών φωτεινών σημάτων στις τηλεπικοινωνίες. Για να συμβεί ολική ανάκλαση απαιτούνται δύο προϋποθέσεις. Πρώτον να έχουμε μετάβαση από οπτικά πυκνό σε οπτικά αραιό μέσο δηλαδή ο δείκτης διάθλασης του μέσου από το οποίο ξεκινάει μια φωτεινή δέσμη φωτός να είναι μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης του μέσου στο οποίο καταλήγει η φωτεινή δέσμη φωτός ($n_1 > n_2$) και δεύτερον, η γωνία πρόσπτωσης να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία ($\theta_i > \theta_{cr}$). Ως κρίσιμη γωνία ορίζεται η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η διαθλωμένη ακτίνα γίνεται παράλληλη με την διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων (σχήμα 5β.6).



Σχήμα 4.3 Προσπίπτουσες ακτίνες φωτός από οπτικός πυκνότερο σε οπτικός αραιότερο μέσο.

Για να έχουμε κυματοδηγήση πρέπει να ισχύει η συνθήκη της ολικής ανάκλασης στην ίνα. Δηλαδή, η προσπίπτουσα ακτίνα στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας. Αυτό μπορούμε να το

παρατηρήσουμε καλύτερα με την βοήθεια του σχήματος 5β.7. Όταν η φωτεινή ακτίνα εισέλθει στην ίνα υπό γωνία μικρότερη της γωνίας θ_a . Ακτίνες φωτός που εισέρχονται στην ίνα εκτός του κώνου που καθορίζεται από την θ_a , προσπίπτουν στην ενδοεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα υπό γωνία μικρότερη της κρίσιμης γωνίας θ_c και δεν μπορούν να συνεχίσουν τη διάδοσή τους κατά μήκος της ίνας. Αυτές οι ακτίνες προοδευτικά διαφεύγουν εκτός της οπτικής ίνας. Η γωνία θ_a είναι η μέγιστη γωνία που επιτρέπεται να έχει μια εισερχόμενη ακτίνα φωτός με τον άξονα της ίνας, ώστε να πληρεί τη συνθήκη της ολικής ανάκλασης και να περιοριστεί στο εσωτερικό της ίνας. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία αποδοχής της ίνας. Ο αντίστοιχος τρισδιάστατος κώνος που σχηματίζεται από την θ_a ονομάζεται κώνος αποδοχής ή κρίσιμος κώνος. Ο κώνος αποδοχής είναι σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία της σύζευξης (εισαγωγής) του φωτός στην ίνα.



Σχήμα 4.4. Εισαγωγή φωτός μέσα στην οπτική ίνα.

Θεωρώντας ότι η οπτική ίνα είναι κυλινδρική χωρίς ατέλειες και αποκλίσεις στη σύνθεσή της, η συμμετρία της γεωμετρίας του σχήματος επιβάλλει η φωτεινή ακτίνα να εξέρχεται από το άλλο άκρο της ίνας με την ίδια γωνία με την οποία εισέρχεται. Με άλλα λόγια το φως εξέρχεται της οπτικής ίνας υπό μορφή κώνου με άνοιγμα ίσο με αυτό του κρίσιμου κώνου της ίνας. Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη γωνία σύζευξης του φωτός (γωνία αποδοχής) θα θεωρούμε ότι το φως εισέρχεται από τον αέρα (δείκτης διάθλασης $n_0 = 1$) στον πυρήνα της οπτικής ίνας (δείκτης διάθλασης n_1). Ο νόμος του Snell και η γεωμετρία του σχήματος μας δίνουν:

$$n_0 \cdot \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_1$$

Λόγω του ορθογωνίου τριγώνου που σχηματίζετε στο παραπάνω σχήμα προκύπτει ότι $\vartheta_1 = 90 - \vartheta_c$. Επομένως θα έχουμε:

$$\sin \vartheta_\alpha = \frac{n_1}{n_0} \cos \vartheta_c = \frac{n_1}{n_0} \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \vartheta_c}$$

Εν συνεχεία θέτοντας $\sin \vartheta_c = \frac{n_1}{n_2}$ θα έχουμε: $NA = n_0 \cdot \sin \vartheta_\alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$.

Η παράμετρος NA είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της οπτικής ίνας. Ονομάζεται αριθμητικό άνοιγμα της ίνας και ουσιαστικά εκφράζει την ικανότητα σύζευξης φωτός στην οπτική ίνα αφού συνδέεται άμεσα με την γωνία αποδοχής θ_α στην σχέση 2. Περιγράφει δηλαδή την δυνατότητα συλλογής φωτός της ίνας ή της δέσμης οπτικών ινών. Όσο μεγαλύτερο το NA τόσο πιο εύκολη η εισαγωγή του φωτός στην ίνα άρα μεγαλύτερη και η ποσότητα φωτός που μεταφέρεται με αυτήν.

Για την εισαγωγή του φωτός μιας φωτεινής πηγής μέσα στην ίνα απαιτείται η χρήση μικροφακών. Δηλαδή φακών πολύ μικρών διαστάσεων και κατάλληλης καμπυλότητας ώστε να συλλέγουν τις αποκλίνουσες ακτίνες που εκπέμπονται από τη φωτεινή πηγή (laser ή LED) και να τις μετατρέπουν σε συγκλίνουσες με NA μικρότερο από το NA της ίνας. Επειδή το NA των πηγών LED είναι αρκετά μεγαλύτερο από αυτό των πηγών laser οι πρώτες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μονότροπες ίνες που έχουν μικρή διάμετρο πυρήνα και άρα μικρό NA.

4α.6 Πλεονεκτήματα των LED

Απόδοση: Τα LED παράγουν περισσότερο φως ανά Watt από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Αυτό είναι σημαντικό σε συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας ή συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρίες.

Χρώμα: Τα LED μπορούν να εκπέμψουν φως στο χρώμα της προτίμησής μας χωρίς τη χρήση φίλτρων χρωματισμού που απαιτούνται στις παραδοσιακές

μεθόδους φωτισμού. Αυτό είναι πιο αποδοτικό και μπορεί να μειώσει το αρχικό κόστος.

Μέγεθος: Τα LED μπορεί να είναι πολύ μικροί και μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν πάνω σε τυπωμένα κυκλώματα.

Χρόνος On / Off: Τα LED ανάβουν πολύ γρήγορα. Μια χαρακτηριστική κόκκινη ενδεικτική λυχνία LED επιτυγχάνει πλήρη φωτεινότητα σε μικροδευτερόλεπτα. Λυχνίες LED που χρησιμοποιούνται σε συσκευές επικοινωνίας μπορούν να έχουν και ακόμη ταχύτερους χρόνους απόκρισης

Συχνή χρήση: Τα LED είναι ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές που υπόκεινται σε συχνή on-off χρήση, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού που καίγονται πιο γρήγορα όταν εναλλάσσονται συχνά, ή HID λαμπτήρες που απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την επανέναρξη.

Dimming: Τα LED μπορούν πολύ εύκολα να μετριάσουν τη φωτεινότητά τους, είτε με διαφοροποίηση του παλμικού εύρους είτε μειώνοντας το ρεύμα.

Αντοχή σε κραδασμούς: Τα LED, όντας συμπαγή, είναι δύσκολο να καταστραφούν με εξωτερικούς κραδασμούς, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού και τους λαμπτήρες πυρακτώσεως που είναι εύθραυστοι.

Τοξικότητα: Τα LED δεν περιέχουν υδράργυρο, σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού.

4α.7 Μειονεκτήματα των LED

Υψηλό κόστος. Οι LED σήμερα είναι ακριβότερες στην αγορά από τις κοινές τεχνολογίες φωτισμού. Όμως μπορούμε να πούμε ότι το κόστος αυτό αντισταθμίζεται με την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που έχουν οι LED συγκριτικά με τους υπόλοιπους λαμπτήρες.

Εξάρτηση από την θερμοκρασία. Η λειτουργία της LED έχει ισχυρή εξάρτηση από της θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν στον χώρο που της περιβάλλει. Σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, οι LED μπορούν να υπερθερμανθούν και να υποστούν βλάβη.

Ευαισθησία στην τάση. Οι LED είναι αρκετά ευαίσθητες στην τάση και κατ' επέκταση στο ρεύμα που της τροφοδοτεί. Έτσι πολλές φορές είναι αναγκαίο να

χρησιμοποιούνται σειρές αντιστάσεων ή πηγές ελέγχου του ρεύματος το οποίο όμως έχει ως συνέπεια αύξηση στο κόστος υλοποίησης.

Ποιότητα φωτός. Οι περισσότερες LED λευκού φωτός, έχουν φάσμα που διαφέρει σημαντικά από αυτό ενός ακτινοβόλου μελανού σώματος όπως ο ήλιος ή ο λαμπτήρας πυρακτώσεως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι το χρώμα κάποιων αντικειμένων μπορεί να φαίνεται διαφορετικό κάτω από μια LED λευκού χρώματος σε σχέση με το πώς θα φαινόταν κάτω από το φως του ήλιου ή κάτω από μια λάμπα πυρακτώσεως.

4β. Laser Ημιαγωγών

4β.1 Εισαγωγή

Η ιστορία των laser ξεκίνησε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα όταν, το 1917, ο Albert Einstein διατύπωσε την υπόθεση της ύπαρξης διαδικασίας της εξαναγκασμένης εκπομπής. Αυτός ήταν που έδειξε πως η διαδικασία της επαγομένης ή εξαναγκασμένης εκπομπής θα πρέπει να υπάρχει ώστε να εξισορροπεί σε θερμοδυναμική ισορροπία τις διαδικασίες της απορρόφησης και της αυτογενούς εκπομπής. Αυτή άλλωστε, είναι η βάση για ένα laser. Η λέξη laser είναι ακρωνύμιο για τις λέξεις : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, δηλαδή ενισχυμένο φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Έτσι, η λέξη laser αναφέρεται τόσο στο φαινόμενο της ενίσχυσης της επαγομένης ακτινοβολίας όσο και στις αντίστοιχες διατάξεις.

Η πρώτη διάταξη laser με ορατό μήκος κύματος, ερυθρό για την ακρίβεια, ήρθε στο φως το 1960 όταν ο T.H. Maiman πραγματοποίησε ένα στερεάς κατάστασης laser ρουβιδίου. Αργότερα, μετά από μισό περίπου χρόνο, εμφανίστηκε και διάταξη laser He-Ne (ήλιο-νέο) από τον A.Javan. Το He-Ne laser με μήκος κύματος 1,15 μm ξεκίνησε έναν καινούριο κλάδο στην επιστήμη και στην τεχνολογία, τα laser αερίου ενεργού μέσου. Στις μέρες μας πολλοί τύποι laser είναι γνωστοί. Σύμφωνα με το ενεργό μέσο που ενισχύει την επαγόμενη ακτινοβολία κατηγοριοποιούνται σε laser αερίου, στερεάς κατάστασης (κρυστάλλων), ημιαγωγών, ρευστής χρωστικής ουσίας και ελευθέρων

ηλεκτρονίων. Τα μήκη κύματος αυτών των laser καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα από μικρά μήκη κύματος ~100 nm στο μακρινό υπεριώδες έως ~1 mm στο μικροκυματικό εύρος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να προστεθεί πως και η ισχύς τους καλύπτει ένα πλατύ εύρος, από τα μW σε μικρά laser ημιαγωγών έως τα terawatt σε μεγάλες διατάξεις laser που χρησιμοποιούνται σε πειράματα πυρηνικής σύντηξης.

Αξίζει να σημειώσουμε πως το ακρωνύμιο laser υποδηλώνει ότι αναφέρεται σε μία διάταξη ενισχυτή. Μία τέτοια παρατήρηση όμως δεν θα ήταν τόσο ακριβής όσο ο χαρακτηρισμός της ως ταλαντωτής που είναι πιο επεξηγηματικός ως προς τον τρόπο ενίσχυσης. Ωστόσο, μία πιο πλήρης περιγραφή θα ήταν δυνατή σε συνδυασμό με τα κύρια συστατικά στοιχεία ενός laser που είναι το ενεργό μέσο, η πηγή και ο τρόπος διέγερσης καθώς και το οπτικό αντηχείο και η σύνδεση του τελευταίου με την ενίσχυση και τις ιδιότητες της ακτινοβολίας. Αυτές όμως οι βασικές έννοιες για ένα laser θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Μία αυστηρή και ακριβής ανάλυση της φυσικής των laser είναι σχετικά δύσκολη, γι αυτό και η παρουσίασή της στο παρόν κεφάλαιο είναι απλοποιημένη.

Καταλήγοντας, παρόλο που οι εφαρμογές των laser είχαν ένα "αργό ξεκίνημα", μία μεγάλη ποικιλία εφαρμογών είναι πλέον ευρέως γνωστή στις μέρες μας. Από την μαζική επέλαση των laser εγγραφής και αναπαραγωγής ήχου έως τις εφαρμογές του στην βιομηχανία και την ιατρική (π.χ. νυστέρι YAG ή επέμβαση διόρθωσης της μυωπίας). Στις διάφορες αυτές εφαρμογές καθοριστικό ρόλο ορθής εφαρμογής έχουν διάφορες παράμετροι όπως είναι το μήκος κύματος λειτουργίας ενός laser, ο τρόπος λειτουργίας (συνεχής ή παλμικός) και κυριότερα η ισχύς που συνδέεται με τα ανωτέρω. Θα μπορούσε, λοιπόν, εύκολα να παρατηρηθεί ότι τα laser κατέχουν σήμερα ηγετικό ρόλο στην έρευνα, την τεχνολογία, την επιστήμη και σε πολλές άλλες εκφάνσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας.

4β.2 Βασικές αρχές λειτουργίας των LASER

Στις συνηθισμένες θερμοκρασίες τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου βρίσκονται κυρίως στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή στάθμη, δηλαδή το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή το άτομο μπορεί να διεγερθεί, δηλ. κάποιο από τα ηλεκτρόνια του να μεταβεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη απορροφώντας ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με τη διαφορά ενέργειας των σταθμών μεταξύ των οποίων γίνεται η μετάβαση. Η διεργασία αυτή λέγεται εξαναγκασμένη απορρόφηση. Αν με κάποιο τρόπο ένα άτομο βρεθεί σε μια διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, το άτομο αυτό έχει κάποια πιθανότητα να εκπέμψει ένα φωτόνιο και να μεταβεί σε ενεργειακά χαμηλότερη κατάσταση. Η διεργασία αυτή λέγεται αυθόρμητη αποδιέγερση. Τα φωτόνια που εκπέμπονται με αυθόρμητη αποδιέγερση έχουν τυχαίες διευθύνσεις. Συνήθως ένα άτομο παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση περίπου 10^{-8} sec. Αν κατά τη διάρκεια παραμονής του ηλεκτρονίου στη διεγερμένη κατάσταση προσκρούσει με αυτό ένα φωτόνιο ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά διεγερμένης-θεμελιώδους στάθμης, το φωτόνιο αυτό αναγκάζει το άτομο να αποδιεγερθεί, εκπέμποντας ένα δεύτερο φωτόνιο, το οποίο έχει ίδια κατεύθυνση και φάση με το φωτόνιο που υποκίνησε την αποδιέγερση. Η διαδικασία αυτή λέγεται εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulated emission) και αποτελεί τη βάση της λειτουργίας του Laser.

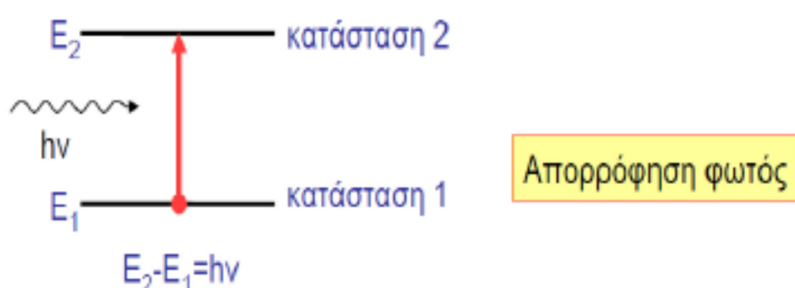
Αρχικά θα παρατεθούν οι βασικές αρχές που διέπουν την λειτουργία των laser. Η βασική ιδέα, λοιπόν, ενός laser είναι η ενίσχυση φωτός μέσω της αλληλεπίδρασής του με το μέσο μέσα στο οποίο ταξιδεύει. Ακολουθώντας την ανάλυση κατά Einstein που ασχολείται με την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, διαχωρίζονται τρεις βασικοί κβαντικοί μηχανισμοί της ακτινοβολίας σε ένα απλό υποθετικό μοντέλο ατόμου δύο ενεργειακών σταθμών: Απορρόφηση, Αυτογενής Εκπομπή και Εξαναγκασμένη Εκπομπή. Ένα μέσο αποτελείται από σωματίδια, π.χ. άτομα ή μόρια, καθένα από τα οποία κατέχει ένα μεγάλο αριθμό διακριτών ενεργειακών σταθμών. Θα θεωρήσουμε ένα σύστημα με μόνο δύο ενεργειακά επίπεδα. Έστω (E1) η θεμελιώδης κατάσταση με ενέργεια E1 και (E2) η διεγερμένη ανώτερη στάθμη με ενέργεια E2, όπου φυσικά $E2 > E1$. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των δύο αυτών επιπέδων είναι ανάλογη της συχνότητας, ν , ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu,$$

όπου h είναι η σταθερά του Planck. Στο υποθετικό αυτό σύστημα θεωρούμε ότι ο πληθυσμός των καταστάσεων είναι κατανεμημένος στα δύο επίπεδα, όπου στο χρόνο t υπάρχουν N_1 άτομα ανά μονάδα όγκου στη θεμελιώδη κατάσταση (E_1) και N_2 αντίστοιχα στη διεγερμένη κατάσταση (E_2). Γενικά όταν ένα σωματίδιο (άτομο ή μόριο) βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση (E_1) μπορεί να διεγερθεί αν κάποιο εξωτερικό ερέθισμα εφαρμοστεί πάνω του στην ανώτερη στάθμη (E_2) προσλαμβάνοντας ενέργεια $E_2 - E_1$. Αλλιώς όταν βρίσκεται στη διεγερμένη κατάσταση (E_2) τείνει να επιστρέψει στη θεμελιώδη σύμφωνα με τον νόμο του Boltzmann ελευθερώνοντας την ίδια ενέργεια.

4β.3 Απορρόφηση φωτός

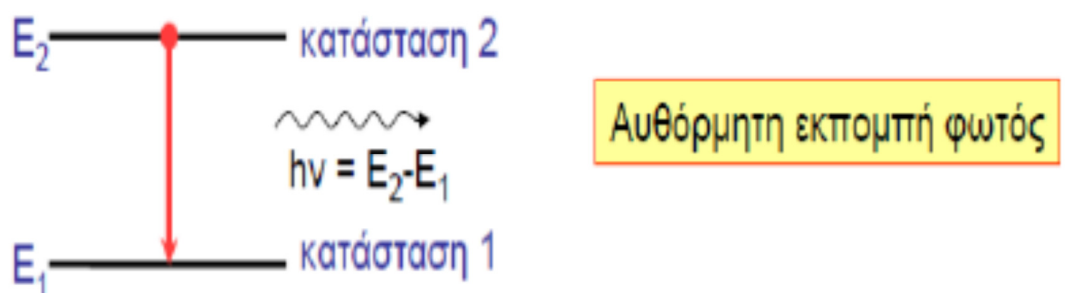
Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (φωτόνιο) με ενέργεια $E_{ph} = h\nu$ μπορεί να απορροφηθεί από ένα άτομο του πληθυσμού N_1 επάγοντας σε αυτό μετάβαση στη διεγερμένη κατάσταση. Θεωρώντας πως η ενεργειακή διάφορα $E_2 - E_1$ που απαιτείται για την μετάβαση παρέχεται από την ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τότε υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα το άτομο να διεγερθεί στην ανώτερη στάθμη όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5γ. 8.



Σχήμα 4.5. Μετάβαση ατόμου σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη λόγω απορρόφησης ενέργειας.

4β.4 Αυθόρμητη εκπομπή φωτός

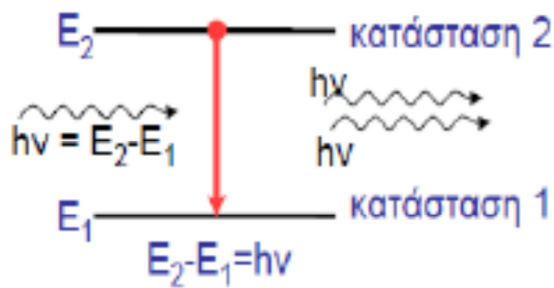
Το φαινόμενο κατά το οποίο ένα σωματίδιο (άτομο ή μόριο) σε διεγερμένη κατάσταση επιστρέφει στη θεμελιώδη αποβάλλοντας την αντίστοιχη ενεργειακή διαφορά υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος, δηλαδή εκπέμποντας φως, περιγράφεται ως αυτογενής εκπομπή. Τα σωματίδια του πληθυσμού N₂ διαμένουν διεγερμένα για ορισμένο χρονικό διάστημα (διάρκεια ζωής) και στη συνέχεια αποδιεγείρονται αυτογενώς εκπέμποντας φως με συγκεκριμένη πιθανότητα εκπομπής όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5γ. 9.



Σχήμα 4.6 Μετάβαση ατόμου σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη αποβολή ενέργειας.

4β.5 Εξαναγκασμένη ή Επαγομένη Εκπομπή φωτός

Έστω ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας ν προσπίπτει στο υποθετικό μας σύστημα. Αφού αυτό το κύμα έχει την ίδια συχνότητα με την ατομική συχνότητα, υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα ότι αυτό το κύμα θα εξαναγκάσει άτομο του πληθυσμού N₂ να αποδιεγερθεί μέσω της μετάβασης 2→1, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5γ. 10. Η ενεργειακή διαφορά $E_2 - E_1$ που ελευθερώνεται αποδίδεται με την μορφή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προστίθεται στο προσπίπτον με καλά καθορισμένες ιδιότητες. Η διαδικασία αυτή καλείται εξαναγκασμένη ή επαγομένη εκπομπή επειδή εξαρτάται από την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μέσω του όρου $u(\nu_{12})$.



Επαγόμενη ή εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός

Σχήμα 4.7 Μετάβαση ατόμου σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη αποβολή ενέργειας, μέσω του μηχανισμού της εξαναγκασμένης εκπομπής.

Ένα σύστημα laser αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Το ενεργό μέσο
- Το οπτικό αντηχείο
- Το μηχανισμό εξόδου
- Τρόποι άντλησης του ενεργού υλικού

Το ενεργό μέσο

Το ενεργό μέσο μπορεί να είναι στερεό, υγρό ή αέριο. Αποτελείται από ένα πλήθος ατόμων ή μορίων, τα οποία διεγείρονται σε μια ανώτερη ενεργειακά κατάσταση. Μέσω του μηχανισμού εξαναγκασμένης εκπομπής μπορούν να εκπέμψουν ακτινοβολία.

Το οπτικό αντηχείο

Το οπτικό αντηχείο, το οποίο αποτελείται από δυο κάτοπτρα, εξασφαλίζει και τον κλάδο ανάδρασης, μια απαραίτητη παράμετρο για την ύπαρξη δράσης laser. Το ένα από τα δυο κάτοπτρα έχει ανακλαστικότητα 100% και το άλλο <100% ώστε να επιτρέπει την έξοδο της ακτινοβολίας. Το μέρος της ακτινοβολίας που διαφεύγει από το δεύτερο καθρέπτη αποτελεί την ακτινοβολία laser. Τα δυο κάτοπτρα αναγκάζουν τα φωτόνια να εκτελούν πολλαπλές διαδρομές μέσα στην κοιλότητα και να εξαναγκάζουν τα άτομα που βρίσκονται σε διεγερμένες καταστάσεις να αποδιεγερθούν. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η ακτινοβολία που κυκλοφορεί μέσα στη κοιλότητα και βγαίνει τελικά από αυτήν ενισχυμένη.

Μηχανισμός εξόδου

Το σύστημα εξόδου αποτελεί το ένα από τα δυο κάτοπτρα της κοιλότητας και συγκεκριμένα αυτό με τη μικρότερη ανακλαστικότητα <100%. Το μέρος της ακτινοβολίας που δεν ανακλάται εξέρχεται από τη κοιλότητα και αποτελεί την ακτινοβολία laser. Στα συνεχούς λειτουργίας laser το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας παραμένει μέσα στη κοιλότητα και ελευθερώνεται μόνο ένα μικρό ποσοστό, ενώ στα παλμικά laser το μεγαλύτερο μέρος εξέρχεται από τη κοιλότητα σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή με τη μορφή ενός παλμού.

Τρόποι άντλησης του ενεργού μέσου

Η διέγερση του ενεργού μέσου συχνά αναφέρεται και ως άντληση. Η διαδικασία της άντλησης είναι καθοριστικής σημασίας για την δημιουργία του φαινομένου laser αφού μέσω αυτής παρέχεται η απαιτούμενη ενέργεια ώστε τα άτομα του ενεργού μέσου να διεγερθούν και να προκληθεί η επιθυμητή αντιστροφή πληθυσμού. Αυτό επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους, οι οποίοι παρουσιάζονται στο σημείο αυτό.

- **Οπτική άντληση:** Η προσφερόμενη ενέργεια είναι υπό μορφή φωτονίων, τα οποία μπορεί να προέρχονται από λυχνίες ή από άλλο laser.
- **Ηλεκτρική διέγερση αερίου:** Η ηλεκτρική διέγερση χρησιμοποιείται συνήθως στις περιπτώσεις που το ενεργό μέσο είναι αέριο. Σε αυτή την περίπτωση ο ρόλος των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι μείζονος σημασίας. Αρχικά εφαρμόζεται υψηλή τάση στα άκρα του ενεργού μέσου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να επιταχύνονται λόγω του υψηλού δυναμικού. Κατά την κίνηση τους αυτή συγκρούονται με άτομα του αερίου και τα διεγείρουν, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η αναστροφή πληθυσμών.
- **Διέγερση μέσω κρούσεων:** διεγείρεται το ένα είδος ατόμων και μετά αποδίδει την ενέργεια του στο άλλο μέσω κρούσεων.
- **Χημική διέγερση:** Κατά τη διέγερση αυτή η απαραίτητη ενέργεια προσφέρεται από χημική αντίδραση μεταξύ των ατόμων του μορίου.
- **Διέγερση με ηλεκτρικό ρεύμα:** Είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται στα laser ημιαγωγών. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το ενεργό μέσο προκαλεί την επιθυμητή αντιστροφή πληθυσμών.

4β.6 Κυκλώματα οδήγησης των LASER

Ο σκοπός των κυκλωμάτων οδήγησης είναι να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στην οπτική πηγή και να διαμορφώνουν την έξοδο του φωτός, σύμφωνα με το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί. Τα κυκλώματα αυτά είναι πιο περίπλοκα για οπτικούς πομπούς υψηλού ρυθμού bit, οι οποίοι χρησιμοποιούν λέιζερ ημιαγωγούς σαν οπτική πηγή. Οι λέιζερ ημιαγωγού πολώνονται κοντά στο επίπεδο κατωφλίου και κατόπιν διαμορφώνονται μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος εξαρτάται από τον χρόνο. Επομένως το κύκλωμα οδήγησης έχει σχεδιαστεί να παρέχει ένα σταθερό ρεύμα πόλωσης καθώς κι λένα διαμορφωμένο ηλεκτρικό σήμα.

Μια φωτοδίοδος παρακολουθεί την έξοδο του λέιζερ και δημιουργεί το σήμα ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του επιπέδου πόλωσης του λέιζερ. Η πίσω πλευρά του λέιζερ γενικά χρησιμοποιείται για έλεγχο. Σε μερικούς πομπούς το μπροστινό άκρο χρησιμοποιείται για να εκτρέψει ένα μικρό κλάσμα της ισχύος εξόδου στον ανιχνευτή. Ο έλεγχος του επιπέδου πόλωσης είναι ουσιαστικός, αφού το επίπεδο κατωφλίου του λέιζερ είναι ευαίσθητο στις θερμοκρασίες λειτουργίας. Το ρεύμα κατωφλίου επίσης αυξάνεται όσο φθείρεται ο πομπός λόγω της βαθμιαίας υποβάθμισης του λέιζερ ημιαγωγού.

Το κύκλωμα οδήγησης ρυθμίζει το επίπεδο πόλωσης αλλά αφήνει αμετάβλητο το ρεύμα διαμόρφωσης. Μια τέτοια προσέγγιση είναι αποδεκτή αν η απόδοση κλίσης του λέιζερ δεν μεταβάλλεται ανάλογα με την φθορά. Η απόδοση κλίσης του λέιζερ γενικά μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Συχνά χρησιμοποιείται ένας θερμοηλεκτρικός ψύκτης για την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του λέιζερ. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι να σχεδιάσουμε κυκλώματα οδήγησης που χρησιμοποιούν κυκλώματα ανάδρασης διπλού – βρόχου και ρυθμίζουν τόσο το ρεύμα πόλωσης, όσο και το ρεύμα διαμόρφωσης αυτόματα.

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα οδήγησης καθορίζουν τον ρυθμό με τον οποίο μπορεί να διαμορφωθεί η έξοδος του πομπού. Για οπτικούς πομπούς που λειτουργούν με ρυθμό bit πάνω από 1Gb/s

ηλεκτρικά παράσιτα που οφείλονται σε διάφορα τρανζίστορ και άλλα εξαρτήματα συχνά περιορίζουν την αποδοτικότητα του πομπού.

Για να πετύχουμε αξιόπιστη αναπαραγωγή του σήματος πληροφορίας κατά την αναλογική μετάδοση, το όλο οπτικό σύστημα θα πρέπει να διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

α) Να διαθέτει υψηλό βαθμό γραμμικότητας : Αυτό για μεν την οπτική πηγή σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ του οδηγούντος ρεύματος αυτής και της έντασης φωτός θα πρέπει να είναι γραμμική. Η προϋπόθεση αυτή ισχύει για την πηγή led καθώς διαθέτει μια σχεδόν γραμμική χαρακτηριστική που την καθιστά κατάλληλη για αναλογική μετάδοση. Η ισχύς εκπομπής όμως της led είναι σχετικά μικρή (ακόμα μικρότερη είναι τελικά η οπτική ισχύς που συζευγνύεται στην οπτική ίνα) με αποτέλεσμα η όλη μετάδοση να επηρεάζεται αρκετά από τον θόρυβο. Αντίθετα, για μια πηγή laser, αν θέλουμε να λειτουργήσει στο γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής της και πάνω από το “γόνατο”, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ειδικά κυκλώματα σταθεροποίησης που περιορίζουν το εύρος χρήσης των laser κατά την αναλογική μετάδοση. Τώρα, όσον αφορά την οπτική ίνα, αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά. Τέλος, είναι εφικτή η ύπαρξη οπτικών ανιχνευτών με σχεδόν γραμμική συμπεριφορά όπου η προκαλούμενη παραμόρφωση είναι μικρότερη του 1%.

β) Η απόκριση του όλου συστήματος (είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο των συχνοτήτων εξεταζόμενη) θα πρέπει να μπορεί να είναι αντίστοιχα συμβατή με τα πληροφοριακά σήματα που πρόκειται να μεταδοθούν.

γ) Στο όλο σύστημα θα πρέπει να εμφανίζεται χαμηλό επίπεδο θορύβου για την επίτευξη υψηλών τιμών Signal-to-Noise (S/N). Η απαίτηση αυτή μας υποχρεώνει να χρησιμοποιήσουμε τις πηγές led μόνο για μετάδοση σε μικρές αποστάσεις.

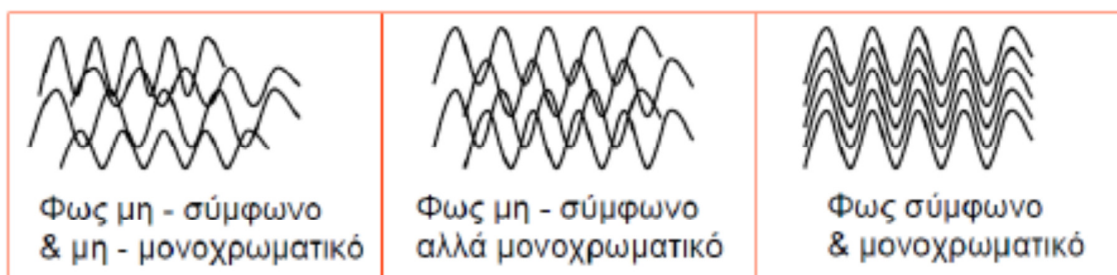
4β.7 Ιδιότητες της δέσμης laser

Μετά την σύντομη περιγραφή των βασικών φυσικών μηχανισμών που σχετίζονται με το φαινόμενο laser, θα εξεταστούν οι ιδιότητες της δέσμης. Η ακτινοβολία laser χαρακτηρίζεται από έναν υψηλό βαθμό:

- μονοχρωματικότητας
- συμφωνίας
- κατευθυντικότητα
- λαμπρότητας

Μονοχρωματικότητα: Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στις ακόλουθες δύο περιστάσεις: α. στο ότι μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f μπορεί να ενισχυθεί και β. αφού το σύστημα των δύο κατόπτρων σχηματίζει μία κοιλότητα συντονισμού, ταλάντωση μπορεί να συμβεί μόνο στις συχνότητες συντονισμού αυτής της κοιλότητας. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα εύρος γραμμής του laser που είναι συχνά πολύ στενότερο από το συνηθισμένο εύρος γραμμής της μετατόπισης $2 \rightarrow 1$ όπως αυτό παρατηρείται στην αυθόρμητη εκπομπή.

Συμφωνία: Εάν θεωρήσουμε μία ακτινοβολία που διαδίδεται υπό τύπο μίας δέσμης τότε μπορούμε να διακρίνουμε δύο τύπους συμφωνίας, τη χρονική και τη χωρική συμφωνία. Αναφερόμαστε σε χρονική συμφωνία όταν παίρνουμε σημεία με σταθερή διαφορά φάσης κατά μήκος της διάδοσης της φωτεινής δέσμης, ενώ μιλάμε για χωρική συμφωνία όταν παίρνουμε σημεία με σταθερή διαφορά φάσης επάνω στο μέτωπο κύματος της ακτινοβολίας και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης της φωτεινής δέσμης. Σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές φωτός, η δέσμη laser χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό συμφωνίας τόσο χωρικής όσο και χρονικής σχήμα 4.8



Σχήμα 4.8 Βαθμός συμφωνίας χωρικής και χρονικής.

Κατευθυντικότητα: Αυτή η ιδιότητα είναι άμεσο επακόλουθο του γεγονότος ότι ενεργό υλικό τίθεται σε μια κοιλότητα συντονισμού. Στην ουσία μόνο ένα κύμα διαδιδόμενο κατά μήκος της διεύθυνσης της κοιλότητας (ή σε μία διεύθυνση πολύ κοντά σε αυτή) μπορεί να διατηρείται στην κοιλότητα.

Λαμπρότητα: ορίζουμε την λαμπρότητα μια δεδομένης πηγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως την ισχύ που εκπέμπει ανά μονάδα επιφάνειας και στερεάς γωνίας. Γενικά τα laser συγκρινόμενα με τις συμβατικές πηγές φωτός σχηματίζουν εικόνες πολύ μεγαλύτερης λαμπρότητας λόγω της πολύ υψηλής πυκνότητας ενέργειας που μεταφέρεται από την πολύ υψηλής κατευθυντικότητας δέσμη τους. Αντίθετα, επειδή η ενέργεια μιας συμβατικής πηγής έχει ισότροπο χαρακτήρα, η ποσότητα που μπορούμε να συλλέξουμε σε καθορισμένη διεύθυνση είναι ανάλογη της στερεάς γωνίας που σχηματίζεται από την πηγή και την επιφάνεια πρόσπτωσης. Ο φωτισμός τους θα είναι πάντα μικρότερος ή το πολύ ίσος με την ισχύ εκπομπής της πηγής.

Καταλήγοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά της λαμπρότητας, της κατευθυντικότητας και της μονοχρωματικότητας των πηγών laser είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την υψηλή συμφωνία που παρουσιάζει η ακτινοβολία τους.

4β.8 Εφαρμογές των Laser

Οι τέσσερις ιδιότητες της ακτινοβολίας Laser την καθιστούν μοναδική σε μια πληθώρα εφαρμογών, καθώς δίνουν τη δυνατότητα ελεγχόμενης συμβολής (λόγω της καθορισμένης φάσης) και μεγάλης συγκέντρωσης ενέργειας σε μικρό χώρο. Ορισμένοι από τους τομείς όπου τα Laser χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

- Ιατρική (με εκμετάλλευση του γεγονότος ότι τα διαφορετικά μήκη κύματος απορροφώνται διαφορετικά από τους διάφορους ιστούς), για θεραπεία γλαυκώματος, κοπή και καυτηρίαση ιστών κοκ.
- Βιομηχανία, για μεγάλης ακρίβειας κατεργασία επιφανειών κλπ.
- Ευθυγράμμιση.
- Τηλεμετρία (επίγεια και μη).
- Τηλεπικοινωνίες.

- Μετεωρολογία και προστασία περιβάλλοντος (ανίχνευση ατμοσφαιρικών ρύπων).
- Ολογραφία (τρισεδιάστατη απεικόνιση).
- Πολεμική βιομηχανία.

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

