

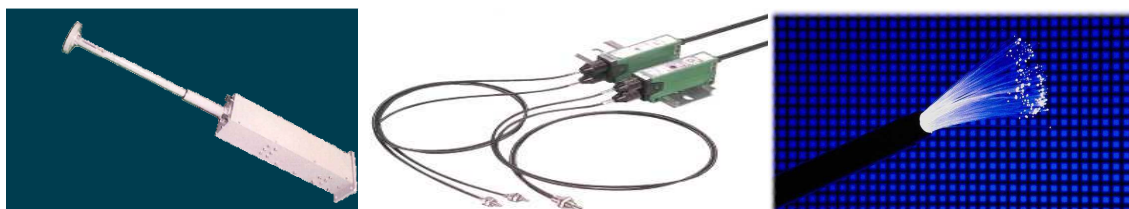
ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ

ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ  
ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ**



**Επιβλέπων καθηγητής: Κ. ΚΟΥΔΟΥΜΑΣ**

**Σπουδαστής : ΔΙΑΛΕΚΤΟΣ ΜΙΧΑΗΛ-ΣΑΒΒΑΣ**

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2012

# Περιεχόμενα

<b>Εισαγωγή</b> .....	4
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b>	
<b>Οπτικές ίνες - Θεωρητική προσέγγιση των οπτικών ινών</b> .....	6
1.1 Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας.....	7
1.2 Τρόποι εκπομπής και μετάδοσης στις οπτικές ίνες.....	8
1.3 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις.....	10
1.4 Τύποι οπτικών ινών.....	11
1.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	13
1.6 Γενικές χρήσεις – Παραδείγματα.....	14
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup></b>	
<b>LASER - Αρχή λειτουργίας, είδη, χαρακτηριστικά και εφαρμογές</b> .....	16
2.1 Εισαγωγή.....	16
2.2 Βασικές αρχές της λειτουργίας των laser.....	19
2.3 Ενεργό μέσο ή υλικό .....	19
2.4 Οπτικό αντηχείο.....	20
2.5 Τύποι laser.....	25
2.6 Ιδιότητες Ακτινοβολίας laser.....	28
2.7 Εφαρμογές των laser .....	30

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>**

<b>Αισθητήρες και αισθητήρες οπτικών ινών.....</b>	<b>33</b>
3.1 Τα Μέρη ενός Αισθητήρα .....	34
3.2 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων.....	36
3.2.1 Στατικά χαρακτηριστικά.....	37
3.2.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά.....	39
3.3 Εφαρμογές Αισθητήρων.....	41
3.4 Αισθητήρες των οπτικών ινών.....	43
3.4.1 Ενδογενείς αισθητήρες (Intrinsic Sensors).....	44
3.4.2 Εξωγενείς αισθητήρες (Extrinsic Sensors) .....	44
3.5 Πλεονεκτήματα αισθητήρων οπτικών ινών.....	45
3.6 Τρόπος κατασκευής και λειτουργίας FBG αισθητήρων.....	48

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

<b>Εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών.....</b>	<b>49</b>
4.1 Αρχή λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών.....	49
4.1.2 Απλοί αισθητήρες οπτικών ινών.....	50
4.2 Σύζευξη Μεταξύ Δύο Μη-Παράλληλων Οπτικών Ινών Βυθισμένων Σε Υγρό Οπτικό Μέσο.....	54
4.2.1 Περιγραφή πειραμάτων.....	55
4.2.2 Αποτελέσματα – Παρατηρήσεις.....	57
4.2.3. Συμπεράσματα – Σχολιασμός.....	59
4.2.4 Εφαρμογές.....	60
4.3 Μελέτη Ίνας Επικεκαλυμμένης με Μέταλλο.....	61
4.3.1 Συμπεράσματα – Σχολιασμός.....	62
4.4 Αισθητήρες οπτικών ινών για την ανίχνευση υδρογόνου.....	63
4.5 Τεχνολογία Οπτικών Αισθητήρων FBG.....	65

4.6 Οπτικές ίνες και ενδοσκόπιο.....	66
4.6.1 Εφαρμογές του οπτικού αγωγού στην ιατρική.....	68
4.6.2 Ενδοσκόπιο .....	69
4.7 Βιοαισθητήρες και οπτικές ίνες.....	73
4.7.1 Ενζυμικός βιοαισθητήρας (enzyme biosensor).....	76
4.8 Χρήση οπτικών αισθητήρων στην Χημεία – Βιοχημεία.....	79
4.9 Χρήσεις οπτικών αισθητήρων στις κατασκευές.....	80
4.10 Ασφάλεια στα Φωτοβολταϊκά Πάρκα.....	82
4.11 Χρήσεις αισθητήρων Πλαστικών Ινών στον Ρουχισμό.....	83
4.12 Περιοδικές διατάξεις σε οπτικές ίνες (Long Period Fiber Grating-LPFG).....	85
4.12.1 Γενικά.....	85
4.12.2 Διαδικασία κατασκευής.....	85
4.12.3 Χρήσεις – Εφαρμογές.....	86
4.12.4 Αισθητήρας κάμψης.....	87
4.12.5 Αισθητήρας στρέψης.....	88
4.12.6 Αισθητήρας εγκάσιου φορτίου.....	89
4.13 Αισθητήρες οπτικών ινών για την προστασία της Ακρόπολης.....	91
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup></b>	
<b>Συμπεράσματα - Σχόλια .....</b>	<b>92</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>95</b>

## Εισαγωγή

Συχνά, σε διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως η βιοϊατρική, η μετεωρολογία, ή η γεωλογία, εμφανίζεται η ανάγκη να ανακαλύψουμε την παρουσία και τη σύσταση αερίων, υγρών και στερεών ουσιών στο εσωτερικό ενός ζωντανού οργανισμού, σε μεγάλα βάθη μέσα στη γη ή σε άλλα δυσπρόσιτα μέρη. Είναι φανερό ότι αυτή η ανίχνευση και αναγνώριση ουσιών είναι δυσχερής κυρίως μέχρι να προσεγγίσουμε το σημείο όπου βρίσκονται αυτές. Για παράδειγμα, η εξέταση μιας ουσίας στο εσωτερικό ενός ανθρώπινου σώματος για ιατρικούς λόγους πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά, με απόλυτο σεβασμό στην ανθρώπινη ζωή και αξιοπρέπεια, αλλά και με μεγάλη ακρίβεια, αφού ένα ιατρικό λάθος είναι δυνατό να έχει ανεπανόρθωτες συνέπειες για τον ασθενή. Έτσι, χρειαζόμαστε ιατρικές συσκευές μικρών διαστάσεων και μεγάλης ακρίβειας, που να εισέρχονται σχετικά ακίνδυνα και ανώδυνα στον ευαίσθητο ζωντανό οργανισμό και να κάνουν σωστές μετρήσεις ή διαγνώσεις. Από την άλλη, υπάρχουν περιπτώσεις όπου θέλουμε να ανιχνεύσουμε τι υπάρχει σε μεγάλο βάθος μέσα στη γη ή κάτω από τη θάλασσα, αν κάπου υπάρχει αποθηκευμένο νερό, πετρέλαιο, ή τίποτα. Στις περιπτώσεις αυτές θα ήταν χρήσιμη μία συσκευή που να μπορεί να προωθηθεί σε μεγάλο βάθος και να μας φέρνει στην επιφάνεια της γης όπου βρισκόμαστε σωστές πληροφορίες για το τι υπάρχει από κάτω μας. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει εμφανές ότι οι οπτικές ίνες και οι αισθητήρες τους οποίους μπορούμε να αναπτύξουμε με αυτές αποτελούν την ιδανική λύση για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις.

Σημαντική είναι η ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων που να συσχετίζουν τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά των οπτικών ινών με τις οπτικές ιδιότητες του μέσου που τις περιβάλλει. Τέτοιες μέθοδοι είναι πιθανό να επιτρέψουν τη δημιουργία συσκευών – αισθητήρων ικανών να αναγνωρίσουν και να ταυτοποιήσουν το περιβάλλον τους. Ο λόγος για τον οποίο στραφήκαμε στις οπτικές ίνες είναι ότι έχουν κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες ιδιότητες που ευνοούν το στόχο μας. Έτσι, για παράδειγμα, ενώ γνωρίζουμε ότι το φως διαδίδεται μόνο ευθεία, οι οπτικές ίνες μπορούν να καθοδηγήσουν τη μετάδοσή του προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση. Αυτό είναι χρήσιμο κυρίως για τη βιοϊατρική, αφού είναι αδύνατον να εισχωρήσουμε βαθιά

στο ανθρώπινο σώμα ακολουθώντας ευθεία πορεία. Επίσης, οι οπτικές ίνες έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας, πιο αξιόπιστα και γρήγορα από άλλους κυματοδηγούς και μάλιστα την μεταφέρουν σωστά, χωρίς απώλειες, για μεγαλύτερες αποστάσεις, ιδιότητες πολύ θετικές και για τη χρήση τους σε μεγάλα βάθη. Τέλος δε μας περιορίζει το μέγεθός τους αφού είναι πολύ λεπτές και ευέλικτες.

Η εργασία περιλαμβάνει τα εξής κεφάλαια:

- 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο : Οπτικές ίνες - Εφαρμογές οπτικών ινών
- 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο : LASER - Αρχή λειτουργίας, είδη, χαρακτηριστικά και εφαρμογές
- 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο : Αισθητήρες οπτικών ινών
- 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο : Εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών
- 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο : Συμπεράσματα - Σχόλια

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### Οπτικές ίνες - Θεωρητική προσέγγιση των οπτικών ινών

Μια οπτική ίνα είναι μια γυάλινη ή πλαστική ίνα που μεταφέρει το φως κατά μήκος της. Υπάρχει ιδιαίτερος κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με έρευνα για της δυνατότητες και εφαρμογές των οπτικών ινών. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε δίκτυα επικοινωνιών, και επιτρέπουν την μετάδοση σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε υψηλότερου εύρους ζώνης (ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων) 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 δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για φωτισμό, οπότε είναι σε δέσμες, ενώ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εικόνων, επιτρέποντας έτσι την προβολή σε στενούς χώρους. Ειδικά σχεδιασμένες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται και για πολλές άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων.

Το φως κατά την διέλευση του παραμένει στον πυρήνα της οπτικής λόγω του φαινομένου της ολικής ανάκλασης. Αυτό οδηγεί την ίνα να λειτουργήσει ως κυματοδηγός. Οι ίνες οι οποίες υποστηρίζουν πολλές συχνότητες διερχόμενου φωτός ονομάζονται πολύτροπες (multi-mode fibers, MMF), ενώ εκείνες που μπορούν να μεταφέρουν φως μιας μόνο συχνότητας ονομάζονται μονότροπες (single-mode fibers, SMF). Οι πολύτροπες έχουν γενικά μεγαλύτερη διάμετρο πυρήνα, και χρησιμοποιούνται για τις υποθαλάσσιες συνδέσεις επικοινωνίας μεγάλων αποστάσεων και για εφαρμογές όπου υπάρχει ανάγκη μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων. Συνήθως οι μονότροπες ίνες χρησιμοποιούνται σε ζεύξεις επικοινωνιών μεγάλων αποστάσεων.

Η ένωση οπτικών ινών είναι πιο πολύπλοκη απ'ότι η ένωση συρμάτων ή καλωδίων. Τα άκρα των ινών πρέπει να είναι κομμένα με προσοχή, και στη συνέχεια, συγκολλημένα μαζί με μηχανική πίεση ή με σύντηξη χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό τόξο. Ειδικοί ακροδέκτες χρησιμοποιούνται στις συνδέσεις. [1]

## 1.1 Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας

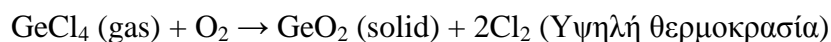
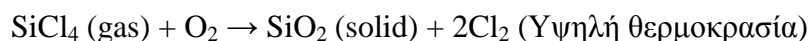
Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 1. Στο κέντρο του καλωδίου υπάρχει η οπτική ίνα, η οποία κατασκευάζεται από γυαλί ικανό να μεταφέρει φωτεινή δέσμη συγκεκριμένου μήκους κύματος με πολύ λίγες απώλειες. Την οπτική ίνα περιβάλλει ειδική επίστρωση υλικού με μικρότερο δείκτη διάθλασης από το υλικό της ίνας, το οποίο ονομάζεται cladding ή buffer. Το υλικό αυτό βοηθά στη συνεχή ανάκλαση της φωτεινής δέσμης, η οποία θα εισέλθει μέσα στην οπτική ίνα, εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής διότι σε άλλη περίπτωση θα έχουμε διάθλαση στην εξωτερική επίστρωση -cladding (σχήμα 1.1). Με αυτό τον τρόπο η οπτική ίνα εγκλωβίζει τη δέσμη του φωτός και την οδηγεί στην άκρη της.[2]



**Σχήμα 1.1** Η κατασκευή καλωδίου οπτικής ίνας

Την επίστρωση περιβάλλει δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία της ίνας από πιθανά τραβήγματα, όπου είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της ίνας. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό περίβλημα όμοιο με αυτό των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών.

Η βασική χημική αντίδραση από την οποία παράγεται το οπτικό γυαλί είναι:





Υπάρχουν επίσης οπτικές ίνες, οι οποίες κατασκευάζονται από πλαστικό. Προς το παρόν δεν είναι μέσα στις προδιαγραφές, που καθορίζονται από τα διεθνή πρότυπα. Οφείλουμε, όμως, να σημειώσουμε, ότι καταβάλλονται προσπάθειες για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά τους και ειδικά η πολύτροπη, graded index πλαστική ίνα ενδέχεται να αποτελέσει αξιόπιστο μέσο μετάδοσης εφάμιλλο της γυάλινης ίνας

## 1.2 Τρόποι εκπομπής και μετάδοσης στις οπτικές ίνες

Η εκπομπή του οπτικού σήματος σε οπτική ίνα γίνεται από πηγή LED (light Emmiting Diode) ή LASER (Light Amplification by Stimulated Emission off Radiation), και τα μήκη κύματος του φωτός, που η οπτική ίνα είναι σχεδιασμένη να μεταφέρει, ποικίλουν από 800nm μέχρι 1500nm.

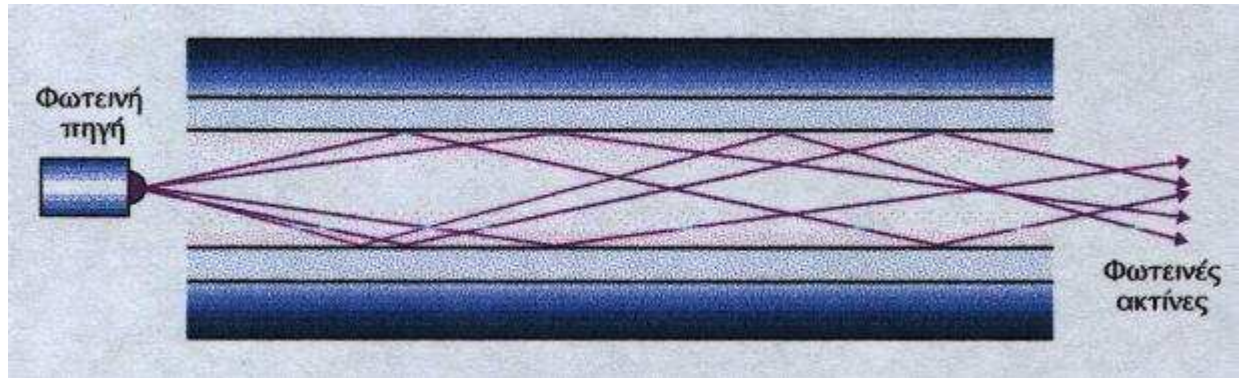
Οι οπτικές ίνες διαφοροποιούνται, καταρχήν, από τον τρόπο μετάδοσης του σήματος σε αυτές. Η πρώτη βασική διάκριση είναι μεταξύ των πολύτροπων και μονότροπων οπτικών ινών. [6]

### - Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics)

Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι να αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα (γυαλιού) και στη συνέχεια τη διάμετρο της επίστρωσης (cladding). Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε  $10^{-6}$  μέτρα. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50μm/125μm, 62,5/125, 85/125 ή 100/140. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί, είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm. Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες, όπως φαίνεται στα σχήματα 2,3. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode), επειδή έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index).

### Οπτική ίνα διακριτού δείκτη (step index)

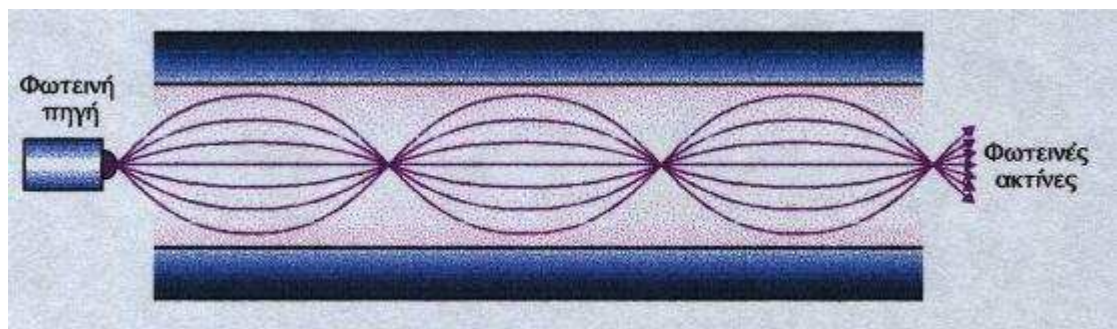
Στις ίνες αυτές συμβαίνει απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του υλικού επίστρωσης. Στην περίπτωση αυτή, η πορεία των ακτινών εμφανίζεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Οπτική ίνα διακριτού δείκτη

### Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη (graded index)

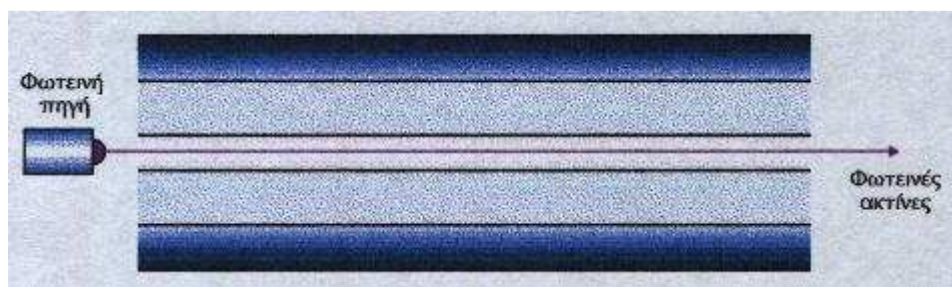
Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας. Δηλαδή έχουμε μια βαθμιαία μείωση στο δείκτη διάθλασης όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια ίνα είναι αυτή, που φαίνεται στο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3 Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη

### - Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics).

Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου τις διαστάσεις του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια οπτική ίνα φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5μm έως 10μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm.[6], [7]



Σχήμα 1.4 Μονότροπη οπτική ίνα

### 1.3 Χαρακτηριστικά και 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 3Km, ενώ οι μονότροπες οπτικές ίνες μπορούν να υπερβούν τα 10 Km.

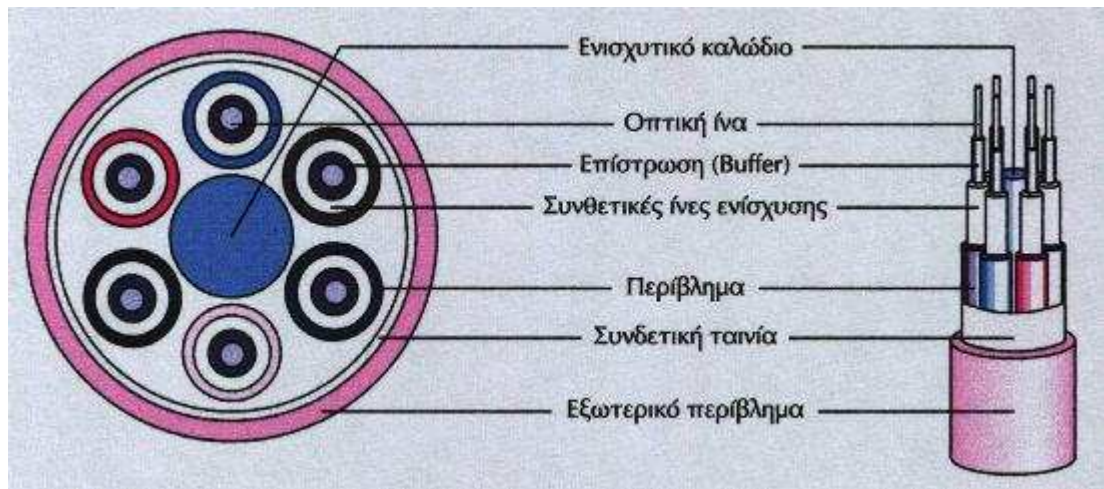
Υπάρχουν, όμως, και άλλοι παράγοντες, οι οποίοι περιορίζουν τις παραπάνω αποστάσεις μετάδοσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι το εύρος ζώνης της πηγής και του δέκτη, και η χρωματική διασπορά του μεταδιδόμενου σήματος μέσα στην οπτική ίνα, η οποία διασπορά αυξάνεται με την απόσταση και εξασθενίζει το σήμα. 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. Τυπική τιμή εξασθένισης σήματος για μια 62,5/125 πολύτροπη οπτική ίνα είναι 3,5 dB/Km για σήμα με μήκος κύματος 850 nm και 1.0 dB/Km για μήκος κύματος 1300nm. Τυπικό μέγεθος εξασθένισης σήματος για μονότροπη οπτική ίνα είναι 0,5 dB/Km στα 1310 nm και 0,4 dB/Km στα 1550nm.[3]

#### **1.4 Τύποι οπτικών ινών**

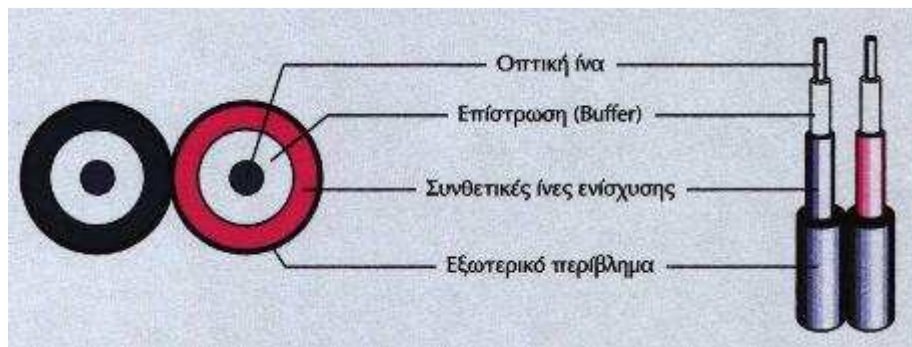
Τα καλώδια οπτικών ινών περιέχουν από 1 έως 36 οπτικές ίνες. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα καλώδια με ζυγό αριθμό οπτικών ινών για την επικοινωνία των full-duplex κυκλωμάτων. Θα ξεχωρίσουμε δυο τύπους οπτικών ινών ως προς την κατασκευή τους.

Στην πρώτη περίπτωση, έχουμε σε κάθε οπτική ίνα και εξωτερικά από την επίστρωση συνθετικές ίνες και εξωτερικό μονωτικό περίβλημα. Μέσα στο καλώδιο υπάρχουν πολλές τέτοιες ίνες, όπου η κάθε ίνα αποτελεί και ένα ξεχωριστό καλώδιο. Μέσα στο καλώδιο περιέχονται εκτός από καλώδια οπτικών ινών και καλώδια, τα οποία χρησιμεύουν για ενίσχυση και στρογγυλοποίηση του όλου σχήματος. Όλα αυτά τα καλώδια, τέλος, περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα. Αυτή η κατασκευή είναι γνωστή σαν Tight Buffer. Στο Σχήμα 1.5 εμφανίζεται ανάλογη κατασκευή καλωδίου οπτικών ινών.



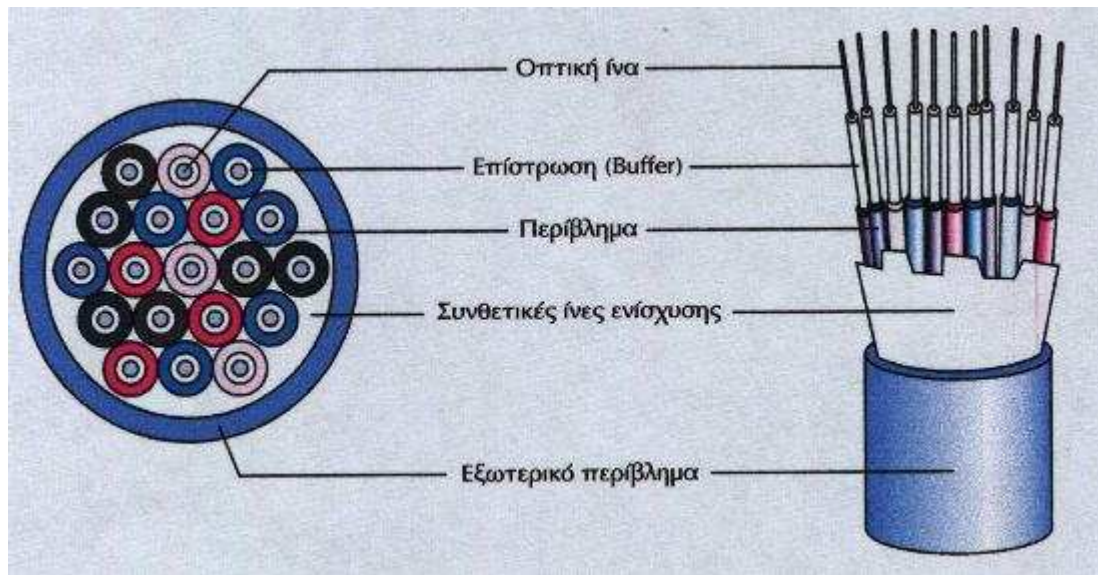
**Σχήμα 1.5** Καλώδιο οπτικών ινών ( Tight Buffer )

Παρόμοιας κατασκευής είναι τα εύκαμπτα καλώδια, που χρησιμοποιούμε για τη σύνδεση με τον ενεργό εξοπλισμό (Optical patch cords). Αυτά αποτελούνται από δυο καλώδια ενωμένα στο εξωτερικό τους, το κάθε ένα από τα οποία περιέχει οπτική ίνα από πλαστικό. Στο σχήμα 1.6 εμφανίζεται ένα οπτικό καλώδιο σύνδεσης.



**Σχήμα 1.6** Οπτικό Patch cord

Στην δεύτερη περίπτωση, έχουμε τις οπτικές ίνες με την επίστρωση τους να είναι τοποθετημένες ελεύθερα μέσα στο καλώδιο και περικλείονται από εξωτερικό περίβλημα, αφού πρώτα τοποθετηθεί μέσα στο καλώδιο επίστρωση από συνθετικές ίνες για την ανθεκτικότητα του. Αυτή η κατασκευή είναι γνωστή σαν Loose Buffer. Στο Σχήμα 1.7 εμφανίζεται ανάλογη κατασκευή καλωδίου οπτικών ινών.



**Σχήμα 1.7** Καλώδιο οπτικών ινών ( Loose Buffer )

### 1.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Οι οπτικές ίνες φαίνεται να είναι σήμερα η καλύτερη λύση στα μέσα μετάδοσης και αυτό γιατί τα πλεονεκτήματα, που παρουσιάζουν, σε σχέση με τα άλλα μέσα είναι ιδιαίτερα σημαντικά.

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες μετάδοσης (της τάξης των Gbps). Συνήθεις ταχύτητες μετάδοσης είναι αυτές των 2 και 10 Gbps, ενώ έχουν επίσης αναπτυχθεί συστήματα των 20, 40 και 50 Gbps. Σε περίπτωση πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος, οι ταχύτητες φθάνουν στα μερικά Tbps. Επίσης, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, με αποτέλεσμα να συνιστάται η χρήση τους σε βιομηχανικό περιβάλλον και σε χώρους με υψηλό θόρυβο. Η εξασθένηση των σημάτων είναι μικρότερη από ότι στα χάλκινα και ομοαξονικά καλώδια, με αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταξύ ενισχυτών ή άλλων ενεργών στοιχείων να κυμαίνονται από μερικά μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα, ανάλογα με τη τεχνική και το ρυθμό μετάδοσης. Η υποκλοπή ή η παρεμβολή πληροφορίας είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν, με αποτέλεσμα οι οπτικές ίνες να συνιστούν πολύ ασφαλές μέσο μετάδοσης. Επίσης, το βάρος και ο όγκος τους είναι σημαντικά μικρότερος από τα αντίστοιχα μεγέθη των άλλων αγωγών. Αξίζει να αναφέρουμε, σαν παράδειγμα, ότι χάλκινο καλώδιο με 1000 ζεύγη και μήκος 500 μέτρων ζυγίζει

περίπου 4000 κιλά, ενώ οπτική ίνα του ίδιου μήκους, που περιέχει τον ίδιο αριθμό καναλιών, ζυγίζει μόνο 45 κιλά. Επιπλέον, δεν είναι ευαίσθητη σε υγρό περιβάλλον, όπου τα χάλκινα καλώδια μπορεί να δημιουργήσουν βραχυκυκλώματα. Επειδή η οπτική ίνα δεν μεταφέρει ηλεκτρικό σήμα, προτιμάται σε περιοχές υψηλού κίνδυνου εκρήξεων από σπινθήρες (χώροι καυσίμων, εύφλεκτων αερίων κλπ.).

Συμπερασματικά, θα πρέπει να αναφέρουμε, ότι τα καλώδια οπτικών ινών παρουσιάζουν ίδιες μηχανικές ιδιότητες με τα ομοαξονικά, αλλά είναι ελαφρότερα σε βάρος, μικρότερα σε διάμετρο και οι αποστάσεις μεταξύ των επαναληπτών είναι μεγαλύτερες. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες, είναι η δυσκολία υλοποίησης συνδέσεων, επειδή απαιτείται υψηλή προσαρμογή και ευθυγράμμιση της φωτεινής πηγής, για να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. 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.[6], [7]

## **1.6 Γενικές χρήσεις – Παραδείγματα**

Τα καλώδια οπτικών ινών, τα οποία, συνήθως περιέχουν δεσμίδες οπτικών ινών, χρησιμοποιούνται, κυρίως, από τους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς για επίγειες και υποθαλάσσιες συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων, αντικαθιστώντας τόσο τις γραμμές ομοαξονικών καλωδίων, όσο και τις επίγειες και δορυφορικές μικροκυματικές ζεύξεις. Τα τελευταία χρόνια έχουν ποντισθεί πολλά καλώδια οπτικών ινών, με χωρητικότητα, η οποία ξεπερνά τα 30.000 κυκλώματα φωνής, για τη διασύνδεση ηπείρων. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν το καλώδιο BSFOCS, που εκτείνεται στην περιοχή της Μαύρης θάλασσας και συνδέει τη Βουλγαρία, Ουκρανία και Ρωσία, το καλωδιακό σύστημα SEA - ME - WE 3 (South East Asia - Middle East - West Europe), που ξεκινά από τη Δυτική Ευρώπη (Γερμανία, Μεγ. Βρετανία), περνά από τα στενά του Γιβραλτάρ στη Μεσόγειο (Ιταλία, Ελλάδα, Κύπρος) συνεχίζει από τα στενά του Σουέζ προς την Ασία (Ινδία, Σιγκαπούρη) και χωρίζεται σε δύο

μέρη, με το ένα άκρο να καταλήγει στην Ιαπωνία και το άλλο στην Αυστραλία και το καλώδιο ADRIA-1, που συνδέει την Ελλάδα (Κέρκυρα), την Αλβανία (Durrës) και την Κροατία (Dubrovnik).

Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται, επίσης, από ιδιωτικές εταιρίες σε τοπικά δίκτυα, σε πανεπιστημιακά δίκτυα κορμού, σε δίκτυα ευρείας περιοχής, σε δίκτυα καλωδιακής τηλεόρασης, σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ασφάλεια μετάδοσης, όπως οι στρατιωτικές και, τέλος, σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπου υπάρχει υψηλός βιομηχανικός θόρυβος, στον οποίο οι οπτικές ίνες παρουσιάζουν ανοσία.

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί η χρήση των οπτικών ινών ως αισθητήρων και θα αναφερθούν σε ξεχωριστό κεφάλαιο εφαρμογές που συνδέονται με τους αισθητήρες οπτικών ινών. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι θα εξετάσουμε πώς επηρεάζεται η σύζευξη μεταξύ δύο μη παράλληλων οπτικών ινών σε επαφή, από το υγρό μέσο στο οποίο βυθίζεται το σημείο επαφής τους. Επίσης θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά μίας επιμεταλλωμένης ίνας, δηλαδή μιας ίνας χωρίς το προστατευτικό περίβλημα η οποία έχει μία λεπτή επίστρωση μετάλλου πάνω στην επένδυσή της. Το μέταλλο προκαλεί μερική διαρροή του πεδίου από το εσωτερικό της ίνας προς το περιβάλλον της, γεγονός της επιτρέπει να λειτουργήσει ως αισθητήρας, αφού το πεδίο που κυματοδηγεί έρχεται σε επαφή με το οπτικό μέσο που την περιβάλλει. Θα αναφερθούμε και σε άλλα ακόμη παραδείγματα και εφαρμογές.

Επειδή το φως που εισάγεται σε μία οπτική ίνα και κυματοδηγείται προέρχεται στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων από Laser, θεωρείται σκόπιμο να αναφερθούν σε ιδιαίτερο κεφάλαιο η αρχή λειτουργίας, τα είδη, τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές των Lasers.



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### LASER - Αρχή λειτουργίας, είδη, χαρακτηριστικά και εφαρμογές

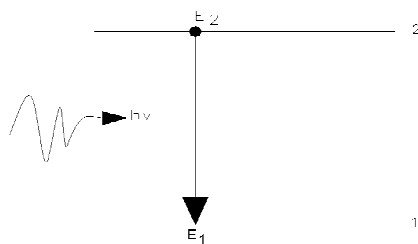
#### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική παρουσίαση της αρχής λειτουργίας του λέιζερ καθώς και των διαφόρων τύπων lasers και των εφαρμογών τους.

Η λέξη laser είναι ακρωνύμιο του "light amplification by stimulated emission of radiation" που σημαίνει ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Η λειτουργία των laser βασίζεται σε τρία βασικά φαινόμενα που συμβαίνουν όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό. Πρόκειται για τα φαινόμενα της αυθόρμητης εκπομπής, της απορρόφησης και της εξαναγκασμένης εκπομπής.

Όπως γίνεται λοιπόν αντιληπτό, το laser είναι ένας ενισχυτής φωτός. Ιστορικά αναφέρεται ότι ο Albert Einstein είχε αποδείξει τη δυνατότητα ύπαρξης της «εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας» από το 1917. Το 1958 υποδείχθηκε η αρχή λειτουργίας του laser από τους C. H. Towns (Τάουνς) και A. L. Schawlow (Σάλοου). Το 1960 κατασκευάστηκε από τον T. H. Maiman (Μέιμαν) το πρώτο laser ρουμπινιού (ρουβιδίου).

Ας θεωρήσουμε το απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα του σχήματος 2.1.:



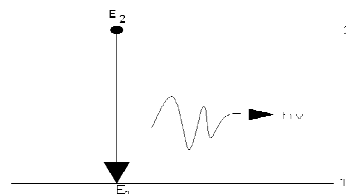
**Σχήμα 2.1** – Απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα

Τα άτομα του προτύπου υλικού χαρακτηρίζονται από δύο ενεργειακές στάθμες, τη βασική στάθμη  $E_1$  και τη μοναδική διεγερμένη στάθμη  $E_2$  (ενεργειακά  $E_1 < E_2$ ), που απέχουν μεταξύ τους απόσταση που αντιστοιχεί σε ενέργεια  $E = E_2 - E_1$  ή σε συχνότητα  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ . Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$  περάσει μέσα στο υλικό, άτομα της στάθμης  $E_1$  απορροφούν ενέργεια και διεγείρονται στην στάθμη  $E_2$ . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **απορρόφηση**. Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει με τα άτομα που θα βρεθούν στη στάθμη  $E_2$ . Παράλληλα με τη διαδικασία απορρόφησης, δρα γρήγορα ή αργά και μια διαδικασία εκπομπής (από τη στάθμη  $E_2$ ), η οποία έχει σαν αποτέλεσμα να επανέλθουν τα άτομα στη στάθμη  $E_1$ . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **απορρόφηση**. Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει με τα άτομα στη στάθμη  $E_2$ . Παράλληλα με τη διαδικασία απορρόφησης, δρα γρήγορα μια διαδικασία εκπομπής (από τη στάθμη  $E_2$ ) ξαναγεμίζοντας τη στάθμη  $E_1$  με άτομα. Η διαδικασία αυτή της επιστροφής των διεγερμένων ατόμων στη στάθμη  $E_1$  μπορεί να γίνει είτε αυθόρμητα είτε εξαναγκασμένα:

### Αυθόρμητη εκπομπή

Έστω ότι ένα άτομο (ή μόριο) του υλικού βρίσκεται αρχικά στη στάθμη 2. Δεδομένου ότι ισχύει  $E_1 < E_2$ , το άτομο θα αποδιεγερθεί μεταπίπτοντας στη στάθμη 1 ώστε να αποκτήσει χαμηλότερη ενέργεια. Η διαδικασία αυτή συνοδεύεται με την απελευθέρωση ενέργειας  $E_2 - E_1$  που μπορεί να αποδοθεί με την μορφή Η.Μ. κύματος και ονομάζεται αυθόρμητη εκπομπή. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.2 και η συχνότητα του ακτινοβολούμενου κύματος δίνεται από την σχέση:

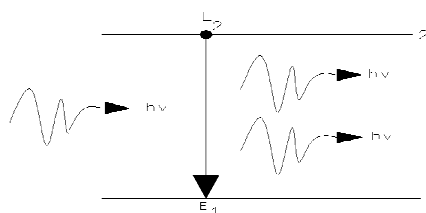
$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (2.1) \text{ όπου } h \text{ σταθερά του Plank.}$$



**Σχήμα 2.2** – Αυθόρμητη εκπομπή

### Εξαναγκασμένη εκπομπή

Αν το άτομο βρίσκεται αρχικά στη στάθμη 2 και ένα Η.Μ. κύμα συχνότητας  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$  προσπέσει στο υλικό, τότε υπάρχει μια πεπερασμένη πιθανότητα το άτομο να μεταπέσει στη στάθμη 1. Η επιπλέον απελευθέρωση ενέργειας  $E_2 - E_1$  εκλύεται με την μορφή Η.Μ. κύματος όμοιου με το προσπίπτον και με τον τρόπο αυτό ενισχύεται το προσπίπτον κύμα. Όλα αυτά φαίνονται καλύτερα στο σχήμα 2.3.

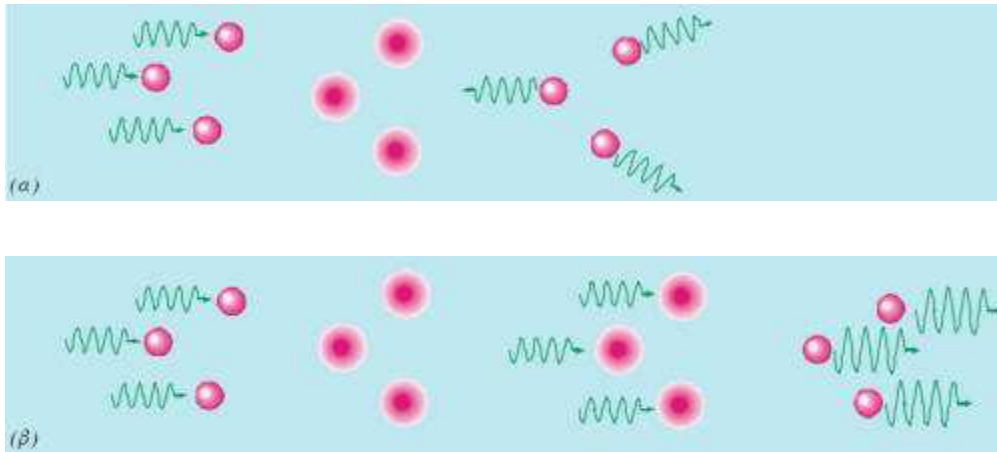


Σχήμα 2.3 Εξαναγκασμένη εκπομπή



Στους λαμπτήρες πυρακτώσεως, στο πυρακτωμένο νήμα βολφραμίου, τα ενεργειακά άλματα (αποδιεγέρσεις) των ατόμων γίνονται με τυχαίο τρόπο και σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Αυτού του τύπου η αποδιέγερση και εκπομπή ακτινοβολίας είναι η αυθόρμητη (σχήμα 2.4α).

Για να προκληθεί εξαναγκασμένη αποδιέγερση και εκπομπή ακτινοβολίας, πρέπει ένα διεγερμένο άτομο να «φωτιστεί» από φωτόνιο ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά δύο ενεργειακών σταθμών. Τότε εκπέμπεται από το άτομο ένα φωτόνιο πανομοιότυπο με αυτό που του προκάλεσε την αποδιέγερση. Το φωτόνιο που προκάλεσε την αποδιέγερση και αυτό που εκπέμφθηκε κατά την αποδιέγερση προστίθενται και δημιουργούν κατά την έξοδο τους ακτινοβολία διπλάσιας έντασης από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε για τη διέγερση (σχήμα 2.4β). Έτσι έχουμε ενίσχυση της ακτινοβολίας. [9], [11].



**Σχήμα 2.4** Αλληλεπίδραση ατόμου ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. α) Διέγερση και αυτόματη εκπομπή. β) Διέγερση και εξαναγκασμένη εκπομπή.

## 2.2 Βασικές αρχές της λειτουργίας των laser

Υπάρχουν πολλοί τύποι laser. Ο καθένας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και τις δικές του κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Όμως για όλους αυτούς τους τύπους, για να δημιουργηθεί ακτινοβολία laser, πρέπει να ικανοποιηθούν ορισμένες βασικές αρχές.

Πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει ένα ενεργό υλικό ή μέσο που να μπορεί, αν διεγερθεί να εκπέμψει ακτινοβολία σε μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ώστε να ενισχύεται η δέσμη laser. επίσης, πρέπει να υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας μιας κατάστασης, που είναι γνωστή σαν αναστροφή πληθυσμών, μέσα από μια διαδικασία διέγερσης που αναφέρεται σαν άντληση. Τέλος για να δημιουργηθούν συνθήκες για ταλάντωση laser πρέπει να υπάρχει κάποιο οπτικό αντηχείο. Χωρίς το οπτικό αντηχείο τα laser θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο σαν ενισχυτές φωτός και όχι σαν γεννήτριες μονοχρωματικής ακτινοβολίας.[11]

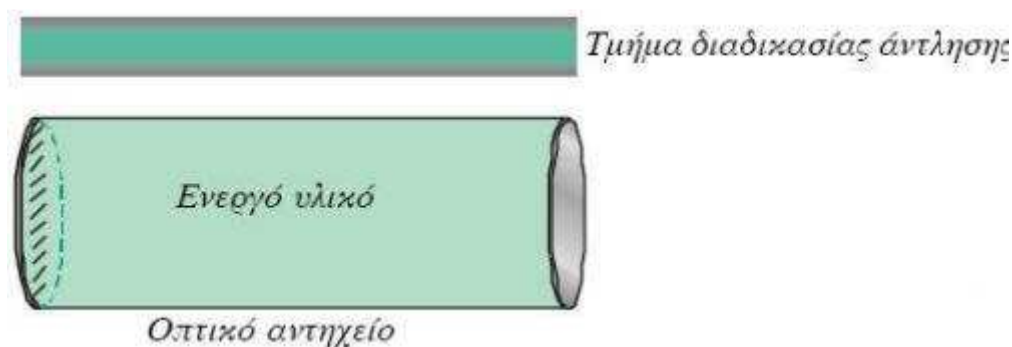
## 2.3 Ενεργό μέσο ή υλικό

Το ενεργό υλικό σε μια κοιλότητα laser θεωρείται μια συλλογή ατόμων, μορίων ή ιόντων κάποιου αερίου, υγρού ή στερεού, που μπορεί να παρέχει τις ενεργειακές του στάθμες, για τις μεταπτώσεις ηλεκτρονίων. Το υλικό αυτό περιορίζεται σε μια οπτική κοιλότητα που ονομάζεται «οπτικό αντηχείο».

## 2.4 Οπτικό αντηχείο

Στα περισσότερα laser η ακτίνα ταξιδεύει μπρος-πίσω πολλές φορές μέσα στο ενεργό υλικό χάρη σ' ένα ζευγάρι κάτοπτρα που τοποθετούνται κάθετα στον οπτικό άξονα του laser. Με ένα τέτοιο σύστημα κατόπτρων το ενεργό φαινομενικό μήκος του ενισχυτικού μέσου πολλαπλασιάζεται. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ένα laser με ένα κάτοπτρο ανακλαστικότητας 100% στο ένα άκρο του και ένα κάτοπτρο ανακλαστικότητας 98% στο άλλο άκρο του, έχει ένα φαινομενικό μήκος 50 φορές του πραγματικού του, ως προς το ενεργό μέσο. Το σύστημα αυτό των δύο κατόπτρων, ενός ολικά και ενός μερικά ανακλαστικού, αποτελεί το σύστημα οπτικής ανατροφοδότησης του laser και σε πολλές άλλες περιπτώσεις τον επιλογέα της συχνότητας λειτουργίας του

Ένα κλασικό οπτικό αντηχείο φαίνεται στο σχήμα 2.5. Πιθανόν όμως ένα τέτοιο αντηχείο να δώσει πολυχρωματική ακτινοβολία. Η σωστή λειτουργία του laser και οι ανάγκες των πειραμάτων απαιτούν αυστηρά μονοχρωματική ακτινοβολία. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να επέμβουμε στη λειτουργία του laser και με χρησιμοποίηση κατάλληλου επιλογέα συχνότητας λειτουργίας, να περιορίσουμε ή να επιλέξουμε το μήκος κύματος εκπομπής του. Ένας τέτοιος επιλογέας μπορεί να είναι π.χ. ένα φράγμα ανάκλασης που θα αντικαταστήσει το κάτοπτρο ανακλαστικότητας 100%, ένα πρίσμα ή ένα στοιχείο μη γραμμικής απορρόφησης κλπ.



Σχήμα 2.5 Σχηματική παράσταση οπτικού αντηχείου

Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά τι συμβαίνει μέσα στο οπτικό αντηχείο του laser. Απαραίτητη προϋπόθεση λειτουργίας ενός συστήματος laser είναι οι συνολικές απώλειες της δέσμης του laser να είναι μικρότερες από την ενίσχυση του σήματος. Γίνεται η παραδοχή ότι η δέσμη του laser καλύπτει όλο το ενεργό υλικό,

δηλαδή γίνεται 100% εκμετάλλευση του ενεργού μέσου. Παρακολουθώντας στο σχήμα 2.6 τη δέσμη καθώς ταξιδεύει μέσα στο οπτικό αντηχείο, ξεκινώντας από το πρώτο κάτοπτρο  $M_1$ , (ανακλαστικότητα  $R_1$ ) και πηγαίνοντας στο δεύτερο  $M_2$ , (ανακλαστικότητα  $R_2$ ), διαπιστώνεται ότι η ένταση της δέσμης αυξάνει από  $I_0$  σε  $I_1$ .



**Σχήμα 2.6** – Απλοποιημένο διάγραμμα Οπτικού αντηχείου Laser

Αν μετά από ένα μεγάλο αριθμό ανακλάσεων, η δέσμη laser παραμένει κοντά στον οπτικό του άξονα, τότε το οπτικό αντηχείο είναι σταθερό, ενώ αν η δέσμη απομακρύνεται από τον οπτικό άξονα τότε το αντηχείο είναι ασταθές.

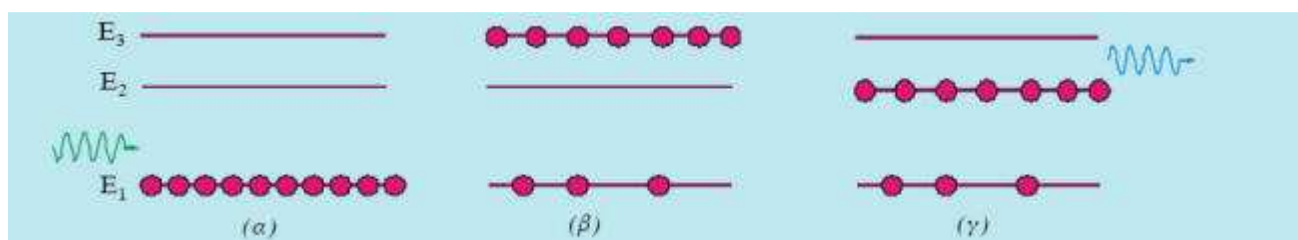
Τέλος, καθώς ένα επίπεδο Η.Μ. κύμα κινείται μεταξύ των κατόπτρων, ενισχύεται σε κάθε διέλευση από το ενεργό υλικό που υπάρχει εκεί και μπορεί έτσι να εξαχθεί μια δέσμη εάν ένα από τα δύο κάτοπτρα είναι μερικά διαπερατό.

Με τη βοήθεια της διάταξης laser ρουβιδίου θα προσπαθήσουμε να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας οποιασδήποτε διάταξης laser και το ρόλο κάθε τμήματός της.

Το ενεργό υλικό σ' αυτό τον τύπο laser είναι το ρουβίδιο, δηλαδή το τριοξείδιο του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ) με προσμείξεις χρωμίου. Οι ενεργειακές στάθμες του ρουβιδίου που προσφέρονται για την παραγωγή ακτινών lasers είναι τρεις.

Σε συνηθισμένες συνθήκες τα περισσότερα άτομα βρίσκονται στη θεμελιώδη στάθμη ( $E_1$ ). Φωτίζοντας το ρουβίδιο με πράσινο φως, τα ιόντα του διεγείρονται και ανέρχονται στη στάθμη  $E_3$ . Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **άντληση**. Στη στάθμη  $E_3$  παραμένουν απειροελάχιστο χρόνο και μεταπίπτουν αυθόρμητα στην  $E_2$ , που είναι στάθμη χαμηλότερης ενέργειας. Η διάρκεια παραμονής τους στην  $E_2$  είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στην  $E_3$ . Τέλος επιστρέφουν στη θεμελιώδη  $E_1$ .

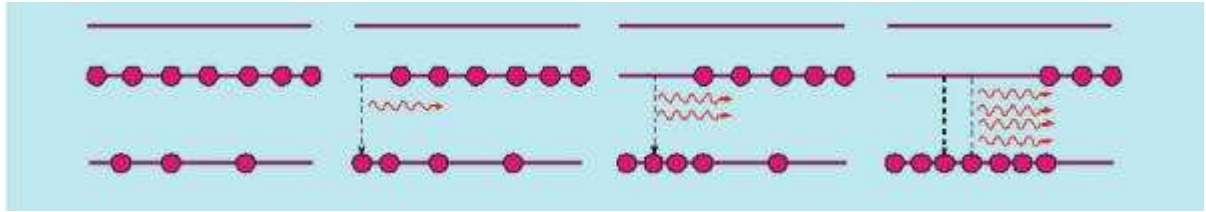
Η μεγάλη σχετικά διάρκεια παραμονής των ατόμων στην  $E_2$  έχει ως αποτέλεσμα να βρίσκονται στην ενεργειακή αυτή κατάσταση περισσότερα άτομα από ότι στη θεμελιώδη. Η κατάσταση αυτή είναι αντίθετη από τη φυσιολογική, λέγεται **αντιστροφή πληθυσμών** και συντηρείται με την αδιάκοπη άντληση από τη στάθμη  $E_1$  στη στάθμη  $E_2$ .



**Σχήμα 2.7** (α), (β) Διαδικασία άντλησης και (γ) αντιστροφή πληθυσμών.

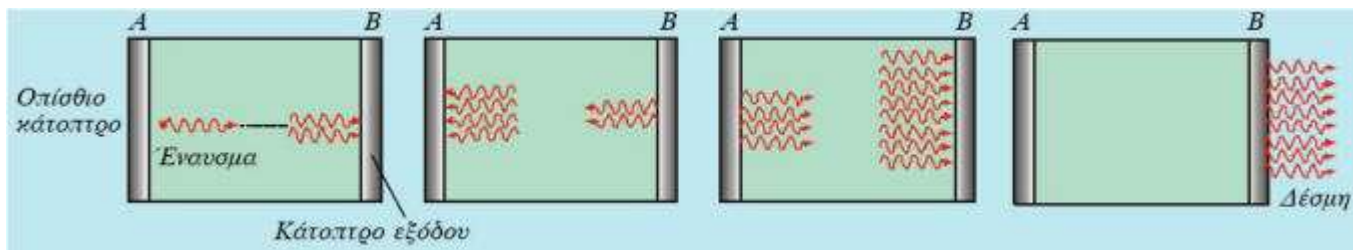
Όταν ένα άτομο μεταπίπτει από τη στάθμη  $E_2$  στην  $E_1$ , εκπέμπει φωτόνιο συχνότητας  $f$  ή  $\nu$  όπου  $\nu = (E_2 - E_1)/h$ . Το φωτόνιο αυτό στην πορεία του συγκρούεται με ένα άλλο άτομο, που βρίσκεται στη στάθμη  $E_2$ . Το άτομο αυτό με τη σειρά του εκπέμπει ένα πανομοιότυπο φωτόνιο και μεταπίπτει στη θεμελιώδη στάθμη  $E_1$ . Τα δύο φωτόνια τώρα συγκρούονται με άλλα δύο άτομα, οπότε εκπέμπονται νέα φωτόνια κ.ο.κ.

Η διαδικασία λοιπόν αποδιέγερσης από τη στάθμη  $E_2$  στη στάθμη  $E_1$  μοιάζει με χιονοστιβάδα και η ενέργεια που χάνουν τα άτομα μεταφέρεται από το εκπεμπόμενο φως. Από τις ακτίνες αυτού του φωτός άλλες ακολουθούν πορεία κατά μήκος της ράβδου ρουβιδίου και άλλες όχι, βγαίνοντας τελικά από τη ράβδο.



**Σχήμα 2.8** Σχηματική παράσταση της εξαναγκασμένης αποδιέγερσης και δημιουργίας φωτός laser.

Η ράβδος ρουβιδίου τοποθετείται μεταξύ δύο επίπεδων κατόπτρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9. Η επιλογή των επίπεδων κατόπτρων είναι τέτοια, ώστε το οπίσθιο (A) να αντανακλά όλα τα φωτόνια, ενώ το εμπρόσθιο (B) (κάτοπτρο εξόδου) να είναι ημιπερατό και να επιτρέπει την έξοδο ενός ποσοστού φωτονίων. Το σύστημα των δύο αυτών κατόπτρων ονομάζεται **οπτικό αντηχείο**.



**Σχήμα 2.9** Σχηματική παράσταση της διαδικασίας παραγωγής φωτός laser.

Οι ακτίνες που ακολουθούν πορεία κατά μήκος της ράβδου, φτάνοντας στο κάτοπτρο B, ανακλώνται και γυρίζουν πίσω. Στο δρόμο τους αποδιεγείρουν και άλλα άτομα και η δέσμη τους γίνεται πιο ισχυρή. Φτάνοντας στο κάτοπτρο A ανακλώνται και, ακολουθώντας πορεία προς το κάτοπτρο B, αποδιεγείρουν στο δρόμο τους πολλαπλάσια άτομα. Έτσι η ισχύς της δέσμης μεγαλώνει τόσο, ώστε ένα μέρος της καταφέρνει να διαπεράσει το ημιδιαφανές κάτοπτρο (B). Η δέσμη του φωτός που εξέρχεται από το κάτοπτρο (B) είναι το **φως laser**.

### Διαδικασία άντλησης



Ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha$  ενός υλικού (με βάση το παράδειγμα του σχήματος 2.7) είναι ουσιαστικά ανάλογος του πρόσημου  $N_1 - N_2$  των πληθυσμών, στις ενεργειακές στάθμες  $E_1, E_2$ . Έτσι το υλικό, εάν  $N_2 < N_1$ , συμπεριφέρεται σαν



**απορροφητής** και επομένως η ακτινοβολία που περνά μέσα στο υλικό απορροφάται από αυτό. Ενώ, εάν  $N_2 > N_1$ , το υλικό συμπεριφέρεται σαν **ενίσχυτής**. Όμως η συνθήκη  $N_1 - N_2 < 0$  (ή  $N_2 > N_1$ ) δεν πραγματοποιείται σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας, επειδή σύμφωνα με την κατανομή Boltzmann, το  $N_2$  μπορεί μιν να πλησιάζει το  $N_1$ , αλλά δεν μπορεί ποτέ να το υπερβεί. Ο μόνος τρόπος για να έχουμε  $N_2 > N_1$  είναι να εξωθήσουμε τα άτομα του ενεργού υλικού σε κατάσταση μη θερμικής ισορροπίας, χρησιμοποιώντας μια εξωτερική πηγή ενέργειας (π.χ. οπτική, ηλεκτρική) στα άτομα ή μόρια του ενεργού μέσου. Η διεργασία με την οποία τα άτομα διεγείρονται ή αντλούνται και εξωθούνται σε κατάσταση μη θερμικής ισορροπίας ονομάζεται **διαδικασία άντλησης**, η δε κατάσταση  $N_2 > N_1$  ονομάζεται **αναστροφή πληθυσμών** και είναι απαραίτητη για τη συντήρηση των ταλαντώσεων μέσα στο αντηχείο, παρά την ύπαρξη απωλειών. Η αναστροφή πληθυσμών έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση της φωτεινής ακτινοβολίας με τη διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής.

Η αναστροφή πληθυσμών δεν είναι τίποτα άλλο από μια αντιστροφή των αναλογιών των ατόμων (μορίων) ανά μονάδα όγκου, σε κάθε μια από τις δύο ενεργειακές στάθμες (από τον άπειρο αριθμό των ενεργειακών σταθμών του υλικού), που συνοδεύεται από το φαινόμενο της εξαναγκασμένης ταλάντωσης και καταλήγει στην ενίσχυση του σήματος. Οι απώλειες μπορεί να είναι είτε μη αναμενόμενες (παρασιτικές απώλειες λόγω ενεργού υλικού) είτε προβλέψιμες (π.χ. απώλειες από το κάτοπτρο εξόδου).

Όπως αναφέρεται πιο πάνω στη διαδικασία της άντλησης, η ενεργειακή είσοδος που εδώ εκφράζεται με την ενέργεια της άντλησης, παρέχεται με τη μορφή είτε οπτικής πηγής εισόδου είτε ηλεκτρικού ρεύματος εισόδου και στην έξοδο εμφανίζεται οπτική ενέργεια. Τα δεδομένα της πληροφορίας αποτυπώνονται πάνω στο φωτεινό σήμα διαμορφώνοντας ένα από τα παρακάτω χαρακτηριστικά του: το πλάτος, τη συχνότητα, τη φάση και την πόλωση. Βέβαια για να αποτυπωθούν τα δυαδικά δεδομένα με on-off (OOK-On Off Keying) διαμόρφωση, αρκεί να μεταβάλλουμε απλά την άντληση μεταξύ δύο τιμών, που εκφράζεται με το αν υπάρχει ή δεν υπάρχει φωτεινό σήμα (on ή off).

## 2.5 Τύποι laser

Το μέγεθος και η μορφή των laser ποικίλουν. Μπορεί να είναι μικρά σαν τα εκπαιδευτικά laser He-Ne (ισχύς μερικών mW), ή να αποτελούν συστήματα πολύ μεγάλων διαστάσεων, όπως τα laser Shiva των εργαστηρίων Lawrence Livermore της Αμερικής (ισχύος 1TW).

Γενικά, η ισχύς των laser ποικίλει και μπορεί να είναι οποιασδήποτε τάξης: από  $\mu\text{W}$ , όπως είναι τα laser οπτικής άντλησης μακρινού υπέρυθρου συνεχούς λειτουργίας που εκπέμπουν στην περιοχή από  $\lambda=40\mu\text{m}\div 2000\mu\text{m}$  έως TW, που είναι μεγάλα συστήματα laser που χρησιμοποιούνται σε προγράμματα θερμοπυρηνικής σύντηξης, με ενεργό υλικό laser το Nd:YAG ή Nd:Glass ή CO<sub>2</sub>.

Μπορούμε να κατατάξουμε τα laser σε κατηγορίες σύμφωνα με το είδος του ενεργού υλικού τους (στερεό, υγρό, αέριο), την περιοχή εκπομπής τους (υπεριώδη, ορατή, υπέρυθρη, μακρινό υπέρυθρο) ή την ισχύ τους (από mW έως TW). Ένας συνηθισμένος διαχωρισμός τους είναι με βάση τον τρόπο διέγερσης τους και έχουμε τις ακόλουθες κατηγορίες:

**Laser οπτικής άντλησης:** στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα laser στερεού, με βασικούς εκπροσώπους τα laser Nd:YAG και Nd:Glass. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι η αναστροφή των πληθυσμών επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της οπτικής άντλησης, δηλαδή με τον έντονο φωτισμό του ενεργού μέσου. Άλλα χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή ισχύς εξόδου τους (τάξης MW σε παλμική λειτουργία) και η δυνατότητα παραγωγής παλμών μικρής χρονικής διάρκειας της τάξης των nsec.

**Laser ηλεκτρικής εκκένωσης:** στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα laser των ατομικών, μοριακών και ιοντικών αερίων. Μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς ή παλμικά. Η περιοχή εκπομπής τους αρχίζει από το υπεριώδες και φθάνει μέχρι το μακρινό υπέρυθρο. Αντιπροσωπευτικά laser της κατηγορίας αυτής είναι τα N<sub>2</sub>, He-Ne, CO<sub>2</sub>, κλπ. Στα laser αυτά, η διέγερση είναι αποτέλεσμα μιας ηλεκτρικής εκκένωσης (αυτή είναι και η βασική τους αρχή). Ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από μία μεγάλη διαφορά δυναμικού, συγκρούονται με τα άτομα, μόρια ή ιόντα του ενεργού αερίου και τα διεγείρουν.

**Χημικά laser:** στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα laser της σειράς του HF και του CO. Η αναστροφή των πληθυσμών στην περίπτωση αυτή, είναι άμεσο ή έμμεσο αποτέλεσμα μίας σειράς εξώθερμων χημικών αντιδράσεων. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των χημικών laser και ιδιαίτερα του HF είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν συνεχώς

ή παλμικά με ηλεκτρική απόδοση μεγαλύτερη του 100%. Αυτό βέβαια οφείλεται στο ότι σαν ηλεκτρική απόδοση ορίζεται ο λόγος της φωτεινής ενέργειας που παράγεται από το laser, προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το laser.

**Laser δέσμης ηλεκτρονίων:** σε αυτά τα laser έχουμε μια κατευθυνόμενη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα, πέρα από την υψηλή ενέργειά τους, είναι η ισχύς τους. Προς το παρόν, η χρήση τους περιορίζεται κυρίως σε ενεργά υλικά CO<sub>2</sub>, HF και DF.

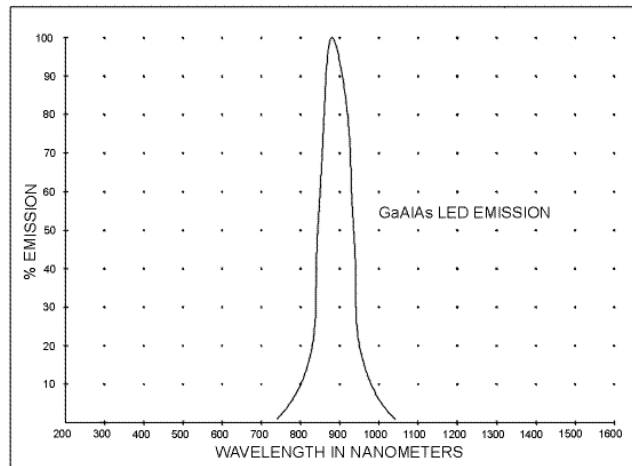
**Laser διεγερμένων διμερών:** πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα κατηγορία laser (π.χ. ArF με  $\lambda=193\text{nm}$ ), που εκπέμπουν στην περιοχή του υπεριώδους. Οι διεργασίες άντλησης και δημιουργίας αναστροφής πληθυσμών αυτών των laser είναι πολύπλοκες. Ο συνήθης τρόπος διέγερσης είναι η ηλεκτρική εκκένωση, πολλές φορές όμως, όταν απαιτείται μεγάλη ισχύς laser, χρησιμοποιούνται και δέσμες ηλεκτρονίων.

**Laser φωτολυτικής άντλησης:** στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένα φλας για να διασπάσει μία χημική ένωση και να δημιουργήσει το διεγερμένο ενεργό υλικό. Τα πιο γνωστά laser της κατηγορίας αυτής είναι το laser ιωδίου, που εκπέμπει στα 1315 $\mu\text{m}$ .

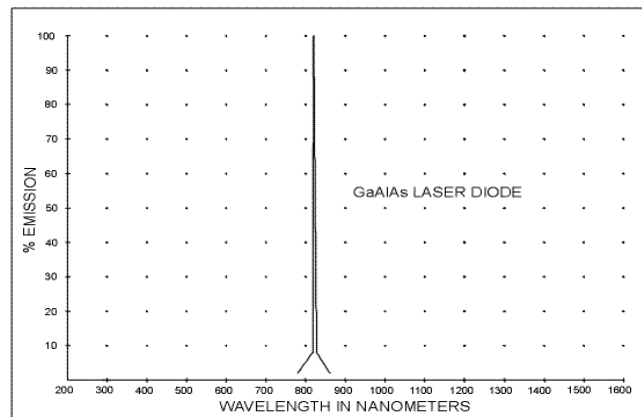
**Laser ημιαγωγών:** είναι τα πιο μικρά σε διαστάσεις laser και παράγονται μαζικά με τεχνολογία και μεθόδους κατασκευής διόδων και τρανζίστορ. Λόγω του μικρού τους μεγέθους και της υψηλής απόδοσης τους, είναι πιο κατάλληλες πηγές για συστήματα τηλεπικοινωνιακών οπτικών ινών. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη σήμερα είναι η κρυσταλλοδίοδος GaAlAs η οποία εκπέμπει στα 0,82 $\mu\text{m}$  και αποτελεί ιδανική φωτεινή πηγή για οπτικές επικοινωνίες.

Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, τότε εκπέμπει ακτινοβολία, ενέργειας ίσης με αυτήν του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού και μήκους κύματος που συνήθως βρίσκεται στην περιοχή του ορατού ή του εγγύς υπερύθρου. Αν δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμών τότε η εκπομπή θα είναι εξαναγκασμένη και θα έχουμε εκπομπή laser. Αν η εκπομπή είναι αυθόρμητη τότε θα έχουμε εκπομπή φωτοδίοδου (L.E.D.) και όχι εκπομπή laser. Το μήκος κύματος εκπομπής ορίζεται σαφώς ως το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Οι περισσότερες φωτοδιόδοι εκπέμπουν κόκκινο ή πορτοκαλί χρώμα. Για να μετατραπεί μια φωτοδίοδος σε δίοδο laser πρέπει να υπάρχουν απαραίτητες συνθήκες laser. Το ενεργό υλικό βρίσκεται στην περιοχή επαφής της δίοδου και η αύξηση του ρεύματος διέγερσης οδηγούν σε δημιουργία αναστροφής πληθυσμών. Δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερικά κάτοπτρα,

γιατί εξασφαλίζεται μεγάλη ανακλαστικότητα λόγω των μεγάλων δεικτών διάθλασης αυτών των ημιαγωγών. Οι δίοδοι, που μπορούν να λειτουργήσουν σαν laser ή σαν φωτοδίοδοι, παρουσιάζουν διαφορετικό εύρος φάσματος εκπομπής, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα 2.10.



**Σχήμα 2.10α** - Φάσμα εκπομπής δίοδου L.E.D



**Σχήμα 2.10** - Φάσμα εκπομπής laser

## 2.6 Ιδιότητες Ακτινοβολίας laser

Η σημερινή εξέλιξη των laser οφείλεται στις μοναδικές ιδιότητες της ακτινοβολίας τους (μονοχρωματικότητα, κατευθυντικότητα, λαμπρότητα, χωρική-χρονική συμφωνία, πόλωση). Συγκεκριμένα:

### Μονοχρωματικότητα

Αν και καμία φωτεινή πηγή δε δίνει απόλυτα μονοχρωματικό φως, τα laser δίνουν την καλύτερη δυνατή-υπαρκτή προσέγγιση προς το ιδανικό μονοχρωματικό φως. Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες:

i) Μόνο ένα Η.Μ. κύμα (συχνότητας  $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ , όπου  $h$  σταθερά του Plank,  $E_1$  και  $E_2$  οι ενεργειακές στάθμες) μπορεί να ενισχυθεί.

ii) Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, το αντηχείο του laser δεν είναι τίποτα άλλο από έναν ταλαντωτή με μικρές απώλειες.

Άρα, το σύστημα των δυο κατόπτρων σχηματίζει μια κοιλότητα συντονισμού και η ταλάντωση/ενίσχυση μπορεί να συμβεί μόνο στις συχνότητες συντονισμού αυτής της κοιλότητας.

### Κατευθυντικότητα

Κριτήριο για την κατευθυντικότητα της δέσμης laser είναι το άνοιγμα της που ορίζεται σαν το διπλάσιο της γωνίας, που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης, με την κεντρική ακτίνα και εκφράζεται συνήθως σε mrad. Για ένα κλασικό μικρό laser (π.χ. NdYAG), το άνοιγμα δέσμης του είναι 1 mrad, που αντιστοιχεί σε αύξηση διαμέτρου της δέσμης laser κατά 1mm ανά m διαδρομής της ή αντίστοιχα κατά 1m ανά Km διαδρομής της. Μια συμβατική πηγή φωτός (π.χ. λάμπα πυράκτωσης) εκπέμπει ακτινοβολία σε όλες τις διευθύνσεις με ανόμοια χωρική κατανομή φωτοβολίας. Αντίθετα η ακτινοβολία ενός laser είναι αυστηρά περιορισμένη σε μια λεπτή δέσμη μικρής εγκάρσιας διατομής διαμέτρου  $D$  ( $\text{mm}^2$ ). Με αυτή την ιδιότητα είναι δυνατή η σκόπευση αντικειμένων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια.

## **Λαμπρότητα**

Ορίζουμε λαμπρότητα μιας δεδομένης πηγής Η.Μ. κυμάτων σαν την ισχύ που εκπέμπει ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα στερεάς γωνίας. Τα laser είναι πηγές ακτινοβολίας μεγάλης λαμπρότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λαμπρότητα της δέσμης του εκπαιδευτικού laser He-Ne, που έχει ισχύ συνήθως 1mW, είναι τουλάχιστον 100 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ήλιου.

## **Χωρική-χρονική συμφωνία**

Όταν το φως κάποιας πηγής είναι απόλυτα σύμφωνο και διατηρεί την συμφωνία αυτή ως προς τον χώρο και τον χρόνο, τότε υπάρχει απόλυτη συσχέτιση των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου του φωτεινού σήματος σε κάποιο σημείο του χώρου με τις αντίστοιχες μεταβολές του σήματος σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του χώρου. Εάν οι μεταβολές αυτές έχουν μετρηθεί και στα δύο σημεία κάποια χρονική στιγμή, τότε με απόλυτη βεβαιότητα μπορούμε να πούμε ποια είναι κατάσταση του ηλεκτρικού πεδίου στο δεύτερο σημείο μετρώντας απλά το πεδίο στο πρώτο σημείο. Αυτό φαίνεται από τη μορφή που παίρνει το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου στις περιπτώσεις της πλήρους συμφωνίας. Μπορεί να αποδειχθεί ότι μόνο το μονοχρωματικό φως είναι απόλυτα σύμφωνο ως προς τον χώρο και τον χρόνο. Έτσι οι πηγές laser χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό χωρικής και χρονικής συμφωνίας, σε αντίθεση με άλλες πηγές οπτικής ακτινοβολίας. Ως χωρική συμφωνία ορίζεται η μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων του μετώπου κύματος ενός Η.Μ. κύματος, για κάθε χρονική στιγμή. Ενώ, χρονική συμφωνία σημαίνει ότι για δεδομένο σημείο, η διαφορά φάσης του μετώπου κύματος ενός Η.Μ. κύματος παραμένει σταθερή για κάθε  $t$ .

## **Πόλωση**

Το φως των κλασικών πηγών (π.χ. λαμπτήρας πυρακτώσεως, φθορισμού κλπ.) δεν είναι συνήθως ολικά ή μερικά πολωμένο. Αντίθετα, πολλά laser παράγουν πολωμένο φως εξαιτίας είτε της φύσης τους είτε της γεωμετρίας του ενεργού υλικού τους είτε επειδή έχουν προστεθεί οπτικά πολωτικά στοιχεία στο οπτικό αντηχείο τους, όπως π.χ. πρίσματα, πλακίδια Brewster, φράγματα ανάκλασης κλπ. [10], [11], [14].

## 2.7 Εφαρμογές των laser

Οι εφαρμογές των laser στην επιστήμη και στην τεχνολογία είναι πάρα πολλές. Μερικές από αυτές εφαρμόζονται στο χώρο της Φυσικής και της Χημείας.

Συγκεκριμένα ο κλάδος της Φυσικής και της Χημείας βοήθησε στην ανακάλυψη και εξέλιξη των laser. Όπως ήταν φυσικό επακόλουθο επωφελήθηκε πρώτος από τη χρήση των laser. Αυτό φάνηκε, τόσο στο χώρο της φασματοσκοπίας και της οπτικής, όσο και στο χώρο της φωτοχημείας. Οι επιστήμες αυτές ευνοήθηκαν από τη δυνατότητα να εξετάζουν σε βάθος διάφορα φαινόμενα, ακόμα και πολύ γρήγορα, αφού τα laser μπορούσαν να παράγουν παλμούς πολύ μικρής χρονικής διάρκειας, τάξεως μικρότερης του 0.1psec. Υπενθυμίζουμε ότι μια κλασική πηγή ακτινοβολίας μπορεί να δημιουργήσει φωτεινούς παλμούς μέχρι 1nsec.

Εφαρμογή είχαμε και στον κλάδο της *Βιολογίας και της Ιατρικής*, όπου το laser χρησιμοποιήθηκε τόσο στη μικροχειρουργική, όσο και στη μελέτη των βιομορίων, καθώς και σε πολλές άλλες περιπτώσεις, δίνοντας εντυπωσιακά αποτελέσματα.

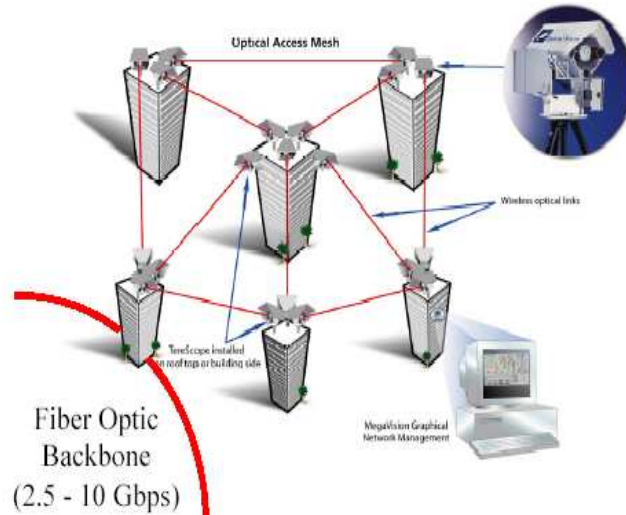
Πολλές εφαρμογές επίσης βρίσκουν και στις *οπτικές επικοινωνίες* που τα τελευταία χρόνια σημειώνουν μεγάλη εξέλιξη.

Οι δυσκολίες, που προκύπτουν από τη διάδοση των οπτικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα (η απόδοση του συστήματος προφανώς θα επηρεάζεται από ατμοσφαιρικές διαταραχές όπως βροχή, ομίχλη, κλπ.), οδήγησαν τους ερευνητές στη χρήση των οπτικών κυματοαγωγών (οπτική ίνα), που καθοδηγούν τη δέσμη laser και επιπλέον είναι εύκολο και οικονομικά προσιτό να κατασκευασθούν σήμερα.

Η χρήση των laser στις επικοινωνίες, χωρίς μέσο διάδοσης την οπτική ίνα, περιορίστηκε σε δύο μόνο εφαρμογές:

i) κυρίως στις επικοινωνίες μεταξύ δορυφόρων ή δορυφόρου και σταθμού εδάφους και

ii) κατά δεύτερο λόγο στις επικοινωνίες μεταξύ σημείων με οπτική επαφή, για μικρές αποστάσεις π.χ. μεταφορά δεδομένων από κτίριο σε κτίριο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Στην περίπτωση αυτή προτιμούνται τα laser των ημιαγωγών. [12], [13], [14].



**Σχήμα 2.11** – Οπτική Επικοινωνία από κτίριο σε κτίριο

Ο κατάλογος εφαρμογών των lasers είναι μεγάλος και εμπλουτίζεται με εντυπωσιακή ταχύτητα. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από αυτές:

- **Μέτρηση αποστάσεων.** Με τη βοήθεια του laser μετράμε αποστάσεις πολύ μεγάλες (Γη - Σελήνη, διάμετρος Γης, μέγεθος ενός αστεριού) ή πολύ μικρές (μέγεθος ατόμου) κτλ.
- **Στη βιομηχανία.** Χρησιμοποιούνται ως εργαλεία κοπής και διάτρησης εξαιρετικής λεπτότητας για πολύ σκληρά υλικά, όπως ο χάλυβας και τα διαμάντια, αλλά και στη συγκόλληση.
- **Στην Ιατρική.** Οι γιατροί χρησιμοποιούν νυστέρια lasers στις «λεπτές» εγχειρήσεις (συγκόλληση αμφιβληστροειδούς, πλαστική χειρουργική κτλ.). Η λεπτή δέσμη laser παρέχει μεγάλη ακρίβεια στη χρήση και επιτρέπει αναίμακτες τομές. Επίσης χρησιμοποιούν το laser στα ενδοσκόπια, στη φωτοθεραπεία αλλά και για την απαλλαγή των δοντιών από την «πέτρα».



**Σχήμα 2.12** Με τη βοήθεια lasers οι μηχανές των καταστημάτων "διαβάζουν" τις τιμές των εμπορευμάτων.



- **Στην πυρηνική σύντηξη.** Η μελλοντική κατασκευή των lasers σύντηξης, που θα προκαλέσουν την πυρηνική σύντηξη ελαφρών στοιχείων, όπως το δευτέριο και το τρίτιο (ισότοπα του υδρογόνου), θα απαλλάξει την ανθρωπότητα από τα πυρηνικά απόβλητα και τον κίνδυνο πυρηνικού ατυχήματος στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



*Σχήμα 2.13.* Συσκευή μέτρησης αποστάσεων με ακτίνες lasers.

- **Στη στρατιωτική τεχνολογία.** Χρησιμοποιούνται για σκόπευση, καταστροφή στόχων, καθοδήγηση βλημάτων κτλ.
- **Στη μουσική και στην τηλεόραση.** Εγγράφουν και παίζουν μουσική (CD) και προγράμματα βίντεο.
- **Στις τηλεπικοινωνίες.** Η δέσμη laser παρουσιάζει μια ξεχωριστή ικανότητα να μεταφέρει μεγάλο πλήθος πληροφοριών.
- **Στην οπτική ολογραφία.** Με τη βοήθεια των lasers επιτυγχάνουμε τρισδιάστατη απεικόνιση αντικειμένων σε φωτοευαίσθητες επιφάνειες ειδικών φιλμ.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Αισθητήρες και αισθητήρες οπτικών ινών

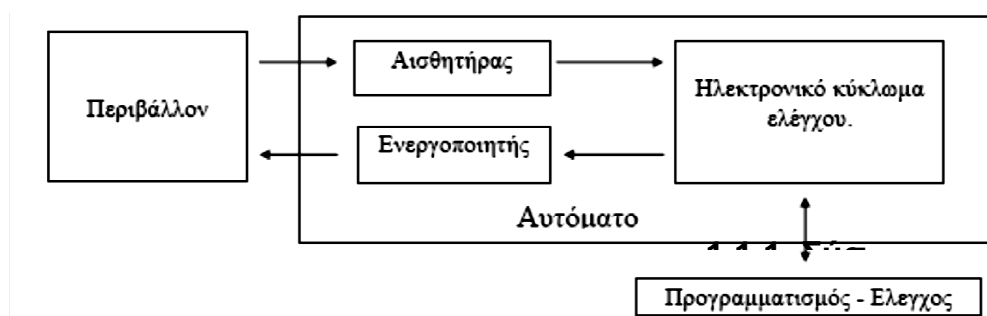
Η ραγδαία κι εκτεταμένη ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από την επαφή μας με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, μεταβάλλει και το περιβάλλον μας, σε προσωπικό αλλά και μακροσκοπικό επίπεδο. Πλέον με όλο κι αυξανόμενη συχνότητα συναντάμε πολύπλοκα συστήματα ελέγχου και λήψεως αποφάσεων, όχι μόνον στη βιομηχανία, όπου οι αυτοματισμοί αποτελούν νευραλγικό γρανάζι στη σύγχρονη παραγωγική μηχανή, αλλά και στην απλή καθημερινότητά μας.

Για την υλοποίηση των αυτοματισμών απαιτείται ένα κύκλωμα ελέγχου (Control Unit) το οποίο λαμβάνει δεδομένα από τον εξωτερικό χώρο (περιβάλλον), τα επεξεργάζεται και προβαίνει σε κατάλληλες ενέργειες, ανάλογα με τον προγραμματισμό του. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο κύκλωμα ελέγχου σαν στοιχεία του προγραμματισμού του, είτε συλλέγονται αυτόνομα. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε απλά μια μηχανή η οποία εκτελεί μια αλληλουχία συγκεκριμένων βημάτων, ενώ στη δεύτερη έχουμε ένα Αυτόματο Σύστημα, ένα σύστημα ικανό να δράσει αυτόνομα, σύμφωνα με τα δεδομένα που επικρατούν στο περιβάλλον του. Ο αυτοματισμός θα πρέπει να κατασκευαστεί με όσο το δυνατόν μικρότερες ανοχές ώστε να μην παρεκκλίνει από την αλληλουχία των βημάτων του, ενώ το αυτόματο σύστημα έχει την ικανότητα να ελέγχει και να προβαίνει σε διορθώσεις.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον ενός αυτόματου συστήματος είναι η παρουσία ενός ορισμένου πλήθους αισθητήρων (Sensors). **Αισθητήρας** είναι μια συσκευή η οποία ανιχνεύει ένα μακροσκοπικό φυσικό μέγεθος και το μετατρέπει σε ένα μετρήσιμο μέγεθος συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Είναι η συσκευή που συνδέει τον κόσμο των ηλεκτρονικών με το φυσικό περιβάλλον.

Η συσκευή εκείνη η οποία θα αλληλεπιδράσει στο περιβάλλον, ώστε να το τροποποιήσει, μετατρέποντας ένα είδος ενέργειας ή κάποιο φυσικό γνώρισμα σε άλλο για διάφορους σκοπούς, όπως για μέτρηση ή μεταφορά πληροφορίας επί παραδείγματι στους αισθητήρες πίεσης ονομάζεται **Ενεργοποιητής** (Actuator). Ο ενεργοποιητής μπορεί να είναι μια συσκευή, συνήθως ηλεκτρική, ηλεκτρονική, ηλεκτρομηχανική, ηλεκτρομαγνητική, φωτονική ή φωτοβολταϊκή η οποία μετατρέπει

μια μορφή ενέργειας (ή ένα φυσικό χαρακτηριστικό) σε μια άλλη (σ'ένα άλλο) για διάφορους σκοπούς, όπως μετρήσεις ή μεταφορά πληροφορίας. Στην ουσία, είναι μία διάταξη που τροφοδοτείται συνήθως από ένα ηλεκτρικό σήμα και το μετατρέπει σε μία άλλη μορφή ενέργειας, εκτελώντας παράλληλα μία συγκεκριμένη ενέργεια. Ενεργοποιητής μπορεί να είναι ένας ηλεκτροκινητήρας, ένας κινούμενος βραχίονας ή οτιδήποτε μπορεί να προκαλέσει μια ενέργεια. [7], [8].



**Σχήμα 3.1** Γενικό διάγραμμα λειτουργίας ενός αυτόματου συστήματος.

Οι αισθητήρες βέβαια, δεν χρειάζονται μόνο στα συστήματα ελέγχου αλλά και στα συστήματα μέτρησης

### 3.1 Τα μέρη ενός αισθητήρα

Ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή η οποία θα μετατρέψει ένα μακροσκοπικό φυσικό μέγεθος ή χημική ποσότητα (φως, δύναμη, πίεση, θερμοκρασία κ.λ.π.) σε κάποιο μετρήσιμο μέγεθος με ορισμένα χαρακτηριστικά. Ένας αισθητήρας αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα:

- το πρώτο, είναι αυτό που αντιλαμβάνεται και μετατρέπει τη μετρήσιμη φυσική ή χημική ποσότητα σε ηλεκτρικά μετρήσιμο σήμα κι ονομάζεται *Μετατροπέας* (Transducer)
- το δεύτερο, ηλεκτρονικό τμήμα, είναι αυτό που μετατρέπει το σήμα του μετατροπέα σε κάποιο τυποποιημένης μορφής σήμα κι ονομάζεται *Κύκλωμα Οδήγησης* (Driving Circuit).

Ο μετατροπέας είναι το δυσκολότερο και πιο κρίσιμο μέρος ενός αισθητήρα. Από την ποιότητα καθώς και από την αρχή κατασκευής του θα καθοριστούν και τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα (περιοχή λειτουργίας, ακρίβεια). Για να γίνει δυνατή

η κατασκευή ενός μετατροπέα κάποιου μακροσκοπικού μεγέθους, θα πρέπει να υλοποιηθεί μια δομή σύμφωνα με την οποία είναι δυνατόν μεταβολές του μακροσκοπικού μεγέθους να επιφέρουν μεταβολή σε ένα ηλεκτρικά μετρήσιμο μέγεθος.

Οι αισθητήρες κατασκευάζονται για να συλλέγουν πληροφορίες από απομακρυσμένα και πολλές φορές επικίνδυνα σημεία του περιβάλλοντος χώρου. Πρόκειται συνήθως για συμπαγείς μονάδες, οι οποίες θα τοποθετηθούν τις περισσότερες φορές μακριά από τη μονάδα ελέγχου-συλλογής δεδομένων (π.χ. κινητήρας μηχανής οχήματος, βιομηχανία). Θα πρέπει λοιπόν το σήμα να μπορεί να διανύσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερες αποστάσεις με την ελάχιστη δυνατή παραμόρφωση. Το κύκλωμα οδήγησης ενός μετατροπέα επιβάλλεται αρχικά να μετατρέψει το συνήθως ευαίσθητο σήμα του (μια χωρητικότητα ή μια μικρή τάση) σε κάποιο ηλεκτρικό σήμα πιο σταθερής μορφής, πρόκειται λοιπόν για ένα μεταλλάκτη σε συνδυασμό ίσως με κάποια ενισχυτική διάταξη.

Ένας μετατροπέας από μόνος του δεν αποτελεί μια ιδιαίτερα αξιόπιστη λύση σαν αισθητήρας. Τα ηλεκτρικά σήματα τα οποία συνήθως δίνει είναι πολύ μικρής έντασης και τις περισσότερες φορές δύσκολα μετρήσιμα. Σαν μια ελάχιστη διαμόρφωση θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ένα μετατροπέα μαζί με ένα μεταλλάκτη, ώστε να έχουμε ένα πιο σταθερό σήμα, αλλά εάν λάβουμε υπόψη μας τις διακυμάνσεις της τάσης ή την μεταβολή της θερμοκρασίας θα δούμε ότι ούτε αυτό είναι αρκετό. Συνεπώς σαν ελάχιστη διαμόρφωση θα πρέπει να θεωρηθεί ο μετατροπέας και το κύκλωμα οδήγησης το οποίο πρέπει να συμπεριλαμβάνει κάποια υποκυκλώματα σταθεροποίησης, έτσι ώστε ο αισθητήρας τελικά να μπορεί να εργαστεί με προβλεπόμενο τρόπο και χαρακτηριστικά μέσα στην περιοχή λειτουργίας του.

Το τελευταίο χαρακτηριστικό ενός αισθητήρα είναι το περίβλημα (package) μέσα στο οποίο θα συναρμολογηθεί. Το περίβλημα ενός αισθητήρα καθορίζεται από τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί. Τις περισσότερες φορές συνιστά όχι μόνο το φορέα του αισθητήρα αλλά και το μέσο προστασίας του από το περιβάλλον (υψηλή θερμοκρασία, διαβρωτική ατμόσφαιρα, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές). Κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά του περιβλήματος ενός αισθητήρα δύναται να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση του ίδιου του αισθητήρα, ιδίως στον χρόνο απόκρισής του. Τελικό κριτήριο για την τελική διαμόρφωση του αισθητήρα είναι το περιβάλλον μέσα στο οποίο θα τοποθετηθεί και η κρισιμότητα των μετρήσεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν.

Αξίζει ακόμη να αναφερθεί ότι το ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα συχνά χρειάζεται να τροποποιηθεί πριν μπορέσει να αξιοποιηθεί, όπως π.χ. για την απεικόνιση πληροφορίας σε κάποιον χειριστή, την καταγραφή του ή τη μετάδοσή του. Τα περισσότερα σήματα που προέρχονται από ένα αισθητήριο στοιχείο είναι από τη φύση τους αναλογικά και απαιτείται ως εκ τούτου αναλογική επεξεργασία. Ως *επεξεργαστή* εννοούμε οποιαδήποτε διάταξη που τροποποιεί το προερχόμενο από έναν αισθητήρα ηλεκτρικό σήμα χωρίς να αλλάζει τη μορφή της ενέργειας του σήματος.

### **3.2 Χαρακτηριστικά Αισθητήρων**

Οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με τη λειτουργία που επιτελούν (όπως για παράδειγμα τη μέτρηση της πίεσης, θερμοκρασίας κλπ) ή τη φυσική αρχή στην οποία στηρίζεται η λειτουργία τους (όπως για παράδειγμα η μαγνητική αντίσταση, τα οπτικά ηλεκτρονικά κλπ). Οι αισθητήρες δεν χρειάζονται μόνο στα συστήματα ελέγχου αλλά και στα συστήματα μέτρησης. Η συνηθέστερη μέθοδος ταξινόμησης των αισθητήρων στην εποχή μας εξετάζει την κύρια μορφή ενέργειας που μεταφέρει το σήμα τους. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό διακρίνουμε τους παρακάτω τύπους [2,3]:

- Μηχανικοί
- Θερμικοί
- Ηλεκτρικοί
- Μαγνητικοί
- Ακτινοβολίας
- (Βιο)χημικοί

Η σχέση μεταξύ μιας μετρήσιμης φυσικής ποσότητας  $X$  και της μεταβλητής  $Y$  του σήματος εξόδου του αισθητήρα είναι θεμελιώδης για τη λειτουργία του. Βάση αυτής της σχέσης καθορίζονται τα χαρακτηριστικά και γίνεται η βαθμονόμηση του αισθητήρα. Οι αισθητήρες βαθμονομούνται με εφαρμογή γνωστών φυσικών μεγεθών και καταγραφή της απόκρισης του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα καθορίζουν την απόδοση του, τη σταθερότητα της λειτουργίας του και την ταχύτητα της απόκρισης του στα ερεθίσματα που δέχεται. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να είναι είτε στατικά, είτε δυναμικά. [7],[8].

### 3.2.1 Στατικά χαρακτηριστικά

Τα στατικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα καθορίζουν την απόδοσή του σε μια σταθερή κατάσταση και είναι τα ακόλουθα:

#### ➤ **Ακρίβεια**

Η ακρίβεια είναι η ικανότητα ενός συστήματος να δίνει αποτελέσματα ταυτόσημα με την πραγματική τιμή της μετρήσιμης ποσότητας. Ως ανακρίβεια ορίζεται η απόκλιση της μέτρησης του αισθητήρα από την πραγματική τιμή του εξωτερικού ερεθίσματος. Είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα άλλων χαρακτηριστικών όπως της υστέρησης και των σφαλμάτων βαθμονόμησης. Μπορεί να εκφρασθεί σαν απόλυτη τιμή του σφάλματος μέτρησης, ποσοστό της κλίμακας εισόδου ή ποσοστό της κλίμακας εξόδου.

#### ➤ **Διακριτική Ικανότητα**

Ορίζεται ως η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας που χρειάζεται για να παρατηρηθεί ανιχνεύσιμη μεταβολή στο σήμα εξόδου. Η ελάχιστη μεταβολή της μετρήσιμης ποσότητας από το μηδέν ορίζεται ως όριο της διακριτικής ικανότητας.

#### ➤ **Επαναληψιμότητα**

Είναι η ικανότητα ενός μετρητικού συστήματος να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα όταν μετρά την ίδια φυσική ποσότητα υπό τις ίδιες συνθήκες. Σχετίζεται με τη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων.

#### ➤ **Ικανότητα αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων**

Είναι η πιστότητα των μετρήσεων σε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, ή σε διαφορετικά εργαστήρια, ή χρησιμοποιώντας διαφορετικό εξοπλισμό.

#### ➤ **Ευαισθησία**

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα είναι η παράγωγος της συνάρτησης μεταφοράς ως προς τη μετρήσιμη φυσική ποσότητα για μια ορισμένη τιμή της ποσότητας αυτής. Για μια γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, η ευαισθησία του αισθητήρα είναι σταθερή. Ένας αισθητήρας με ιδανικά χαρακτηριστικά έχει μεγάλη και σταθερή ευαισθησία.

#### ➤ **Μονοτονικότητα**

Η μονοτονικότητα της συνάρτησης μεταφοράς ενός αισθητήρα σημαίνει ότι η καμπύλη της συνάρτησης μεταφοράς είναι πάντα αύξουσα ή πάντα φθίνουσα ως προς την αύξηση της μετρήσιμης ποσότητας.

➤ **Πλήρης κλίμακα εισόδου**

Ορίζεται ως η μέγιστη μεταβολή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας την οποία μπορεί να μετρήσει ο αισθητήρας με σχετική ακρίβεια.

➤ **Πλήρης κλίμακα εξόδου**

Ορίζεται ως η αλγεβρική διαφορά μεταξύ των τιμών εξόδου ενός αισθητήρα που αντιστοιχούν στην μέγιστη και την ελάχιστη ανιχνεύσιμη τιμή της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας.

➤ **Υστέρηση**

Είναι η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων του αισθητήρα, όταν η μετρήσιμη φυσική ποσότητα προσεγγίζεται από αντίθετες κατευθύνσεις.

➤ **Σφάλμα μη γραμμικότητας**

Ορίζεται μόνο για αισθητήρες με γραμμική συνάρτηση μεταφοράς, η οποία στην πράξη δεν είναι τελείως γραμμική. Για να έχει νόημα το σφάλμα αυτό, πρέπει να ορίσουμε την ευθεία γραμμή σε σχέση με την οποία θα το μετρήσουμε. Μια συνήθης επιλογή είναι η ευθεία που προκύπτει την ανάλυση των τιμών των μετρήσεων με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων. Το σφάλμα μη γραμμικότητας υπολογίζεται ως ποσοστό της μέγιστης τιμής εισόδου.

➤ **Σφάλματα βαθμονόμησης**

Τα σφάλματα βαθμονόμησης οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση του αισθητήρα. Έτσι αν η βαθμονόμηση δεν γίνει αναλυτικά (για κάθε σημείο της συνάρτησης μεταφοράς) αλλά για λίγα μόνο αντιπροσωπευτικά σημεία, προκύπτει ένα συστηματικό σφάλμα. Τα σφάλματα βαθμονόμησης μπορεί επίσης να σχετίζονται με την ανακρίβεια στη γνώση της μετρήσιμης φυσικής ποσότητας κατά τη βαθμονόμηση ή την λανθασμένη καταγραφή της απόκρισης του αισθητήρα στην αλλαγή αυτής της ποσότητας.

➤ **Συστηματικά σφάλματα**

Τα συστηματικά σφάλματα είναι αποτέλεσμα διάφορων παραγόντων όπως:

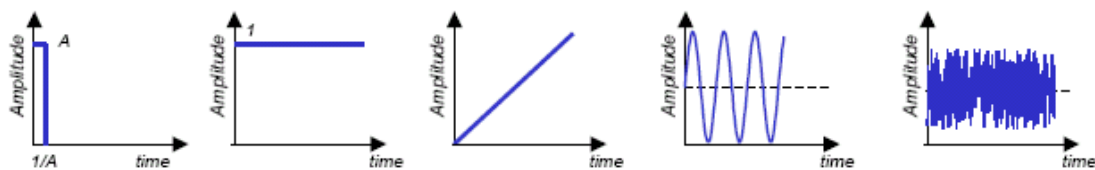
- Μεταβλητές που επηρεάζουν τη λειτουργία του αισθητήρα (π.χ. θερμοκρασία)
- Αλλαγές στη χημική σύνθεση ή μηχανική τάση εξαρτημάτων του αισθητήρα
- Επίδραση της μετρητικής διαδικασίας στη μετρήσιμη φυσική ποσότητα
- Φαινόμενα εξασθένησης του σήματος
- Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να διορθωθούν με τεχνικές αντιστάθμισης όπως η ανάδραση και το φιλτράρισμα.

➤ **Τυχαία σφάλματα**

Τα τυχαία σφάλματα, γνωστά και ως "θόρυβος" είναι ένα σήμα που δε μεταφέρει δεδομένα. Πραγματικά τυχαία σφάλματα όπως ο "λευκός θόρυβος" περιγράφονται από μια γκαουσιανή κατανομή. Μπορεί να οφείλονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες ή να σχετίζονται με τη μετρητική διαδικασία και τη μετάδοση του σήματος. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις τους, θα πρέπει ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο να είναι πολύ μεγαλύτερος της μονάδας.

**3.2.2 Δυναμικά χαρακτηριστικά**

Η απόκριση ενός αισθητήρα σε ένα μεταβλητό σήμα εισόδου είναι διαφορετική από την απόκριση σε ένα σταθερό σήμα εισόδου. Η απόκριση χαρακτηρίζεται από μια δυναμική συμπεριφορά που δε μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο λόγος για αυτή τη δυναμική συμπεριφορά είναι η παρουσία εξαρτημάτων που συσσωρεύουν ενέργεια όπως μάζες, πυκνωτές, επαγωγικά ή θερμικά στοιχεία κ.α. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα προσδιορίζονται εξετάζοντας την απόκριση του σε διάφορες κυματομορφές του σήματος εισόδου. Αυτές μπορεί να είναι κυματομορφές ώθησης, βήματος, γραμμικές, ημιτονοειδείς ή θορύβου (σχήμα 5) [7], [8].



**Σχήμα 3.2** Κυματομορφές σήματος εισόδου

Χαρακτηριστικά	Ιδανική τιμή
Απόκριση $\Delta y$	Γραμμική και χωρίς "θόρυβο".
Αρχική τιμή εξόδου $y_0$	Σημείο Μηδέν



Χρόνος απόκρισης $\tau$	Μηδενικό για στιγμιαία απόκριση
Εύρος συχνοτήτων	Άπειρο
Χρόνος ως το 90 % της τελικής τιμής, $t_{90}$	Μηδέν για στιγμιαία απόκριση
Ένδειξη πλήρους κλίμακας, $y_{\max}$	Βαθμονομημένη μέγιστη έξοδος
Περιοχή λειτουργίας, $y_{\max} - y_{\min}$	Άπειρη
Ευαισθησία, $S$	Υψηλή και σταθερή καθόλη την περιοχή λειτουργίας
Διακριτική ικανότητα	Άπειρη

**Πίνακας 3.1** Επιθυμητά χαρακτηριστικά αισθητήρα [16], [17],[18],[19]

Σε ένα πραγματικό αισθητήρα η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του πάντα αποκλίνουν από τον ιδανικό (πίνακας 1). Οι αιτίες είναι τόσο τα κατασκευαστικά προβλήματα που προκύπτουν όσο και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία του. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που συνοδεύει έναν αισθητήρα μπορεί επίσης να επιβάλλει περιορισμούς στη λειτουργία του. [16], [17]

Χαρακτηριστικό	Σημασία
Μη γραμμικότητα	Η απόκριση δεν είναι ανάλογη προς το σήμα εισόδου.
Αργή απόκριση	Η έξοδος αργεί να φτάσει στην τιμή μόνιμης κατάστασης (δηλαδή μεγάλη τιμή του $\tau$ ).
Μικρή περιοχή λειτουργίας	Η περιοχή λειτουργίας περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό.
Χαμηλή ευαισθησία	Ο αισθητήρας αποκρίνεται μόνο σε μεγάλα σήματα εισόδου (δηλαδή μικρό $S$ ).
Ολίσθηση της ευαισθησίας	Η έξοδος μεταβάλλεται με το χρόνο π.χ. μεταβάλλεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
Ολίσθηση της αναφοράς	Η έξοδος μεταβάλλεται με το χρόνο.

Αντιστάθμιση (Offset)	Συστηματικό λάθος στην έξοδο του αισθητήρα.
Ολίσθηση αντιστάθμισης	Μετατόπιση αντιστάθμισης με το χρόνο π.χ. λόγω γήρανσης.
Γήρανση	Η έξοδος του αισθητήρα μεταβάλλεται με το χρόνο.
Παρεμβολή	Η έξοδος είναι ευαίσθητη στις εξωτερικές συνθήκες π.χ. παρασιτική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, υγρασία.
Υστέρηση	Συστηματικά σφάλμα στην καμπύλη εισόδου – εξόδου.
Θόρυβος	Η έξοδος περιλαμβάνει ένα ανεπιθύμητο τυχαίο σήμα.

**Πίνακας 3.2** Ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά αισθητήρα

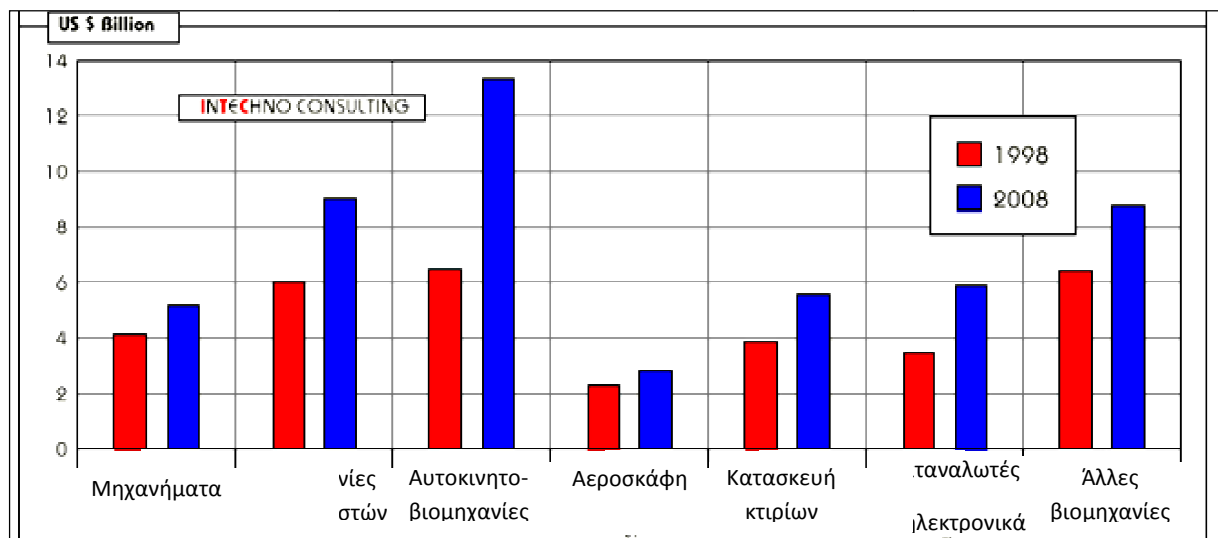
### 3.3 Εφαρμογές Αισθητήρων

Οι αισθητήρες γενικά και ειδικότερα οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν ποικίλες εφαρμογές. Οι εφαρμογές δεν περιορίζονται μόνο στη διαγνωστική, τη φαρμακευτική, τη βιοτεχνολογία και την περιβαλλοντολογική τεχνολογία, αλλά και σε εμπορικά ηλεκτρονικά, χημικές βιομηχανίες και βιομηχανίες αυτοκινήτων και τροφίμων. Συνοπτικά οι εφαρμογές των αισθητήρων κατηγοριοποιούνται ως εξής:

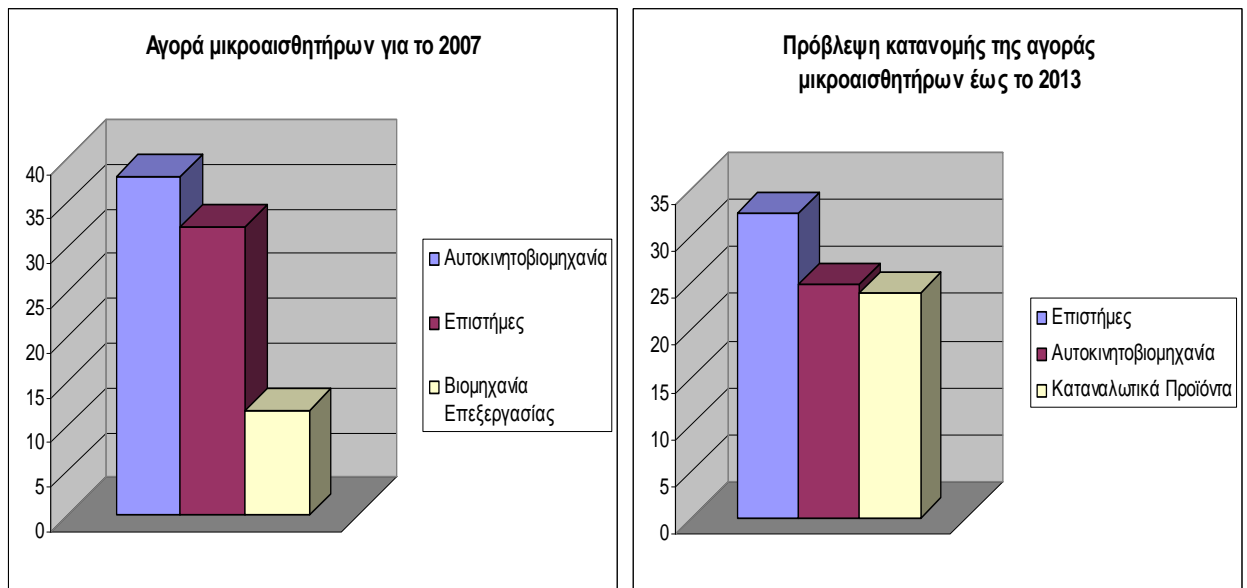
- Διαγνωστική
  - ολοκληρωμένα συστήματα ανάλυσης
- Φαρμακευτική
  - ανίχνευση και έλεγχος φαρμάκων
- Ιατρική
  - παροχή φαρμάκων, διαγνωστική in vivo
- Βιομηχανία τροφίμων και αγροτική οικονομία
  - διαγνωστική τροφίμων
- Βιοτεχνολογία
  - ψηφίδες DNA, ψηφίδες πρωτεϊνών, ψηφίδες κυττάρων
- Χημεία
  - lab-on-a-chip, μικροαντιδράσεις
- Τεχνολογία περιβάλλοντος

- μετρήσεις αποβλήτων, ποιότητας του νερού και του αέρα
- Αυτοκινητοβιομηχανία
  - έλεγχος της ποιότητας των καυσίμων, ανάλυση αερίων, αερόσακοι
- Εμπορικά ηλεκτρονικά
  - εκτυπωτές μελάνης, συστήματα ισχύος ρευστών

Στο σχήμα 1.3 καταγράφεται η ανάπτυξη στην παγκόσμια αγορά αισθητήρων, για τους κυριότερους τομείς εφαρμογών, η οποία παρουσιάστηκε το 2008 σε σχέση με το 1998 [8]. Ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης της παγκόσμιας αγοράς αισθητήρων για το διάστημα 1998-2008 υπολογίζεται περίπου 4.5%.



**Σχήμα 3.3** Τάση της παγκόσμιας αγοράς των αισθητήρων μέχρι το 2008.



**Σχήμα 3.4** Κατανομή αγοράς μικροαισθητήτων του έτους 2007 και πρόβλεψη μέχρι το έτος 2013 [7]

Σύμφωνα δε με πρόσφατες τεχνοοικονομικές μελέτες [7] η αγορά μικροαισθητήρων αναμένεται με βάση τα σημερινά δεδομένα να διευρύνεται σταθερά με προβλεπόμενο ετήσιο ρυθμό της τάξης του 21,3%.

### 3.4 Αισθητήρες των οπτικών ινών

Οι αισθητήρες των οπτικών ινών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους: τους ενδογενείς, οι οποίοι χρησιμοποιούν τις οπτικές ίνες σαν το στοιχείο αίσθησης και τους εξωγενείς όταν η οπτική ίνα είναι το μέσο για την μεταφορά των σημάτων σε αισθητήρα ηλεκτρονικό που επεξεργάζεται τα σήματα.

Οι ίνες έχουν πολλές χρήσεις σε καταναμημένα δίκτυα αισθητήρων αλλά και στην παρακολούθηση αισθητήρων από μεγάλες αποστάσεις, ειδικά, λόγω του μικρού τους μεγέθους και του γεγονότος ότι δεν χρειάζονται ηλεκτρική παροχή στην απομακρυσμένη θέση τους.

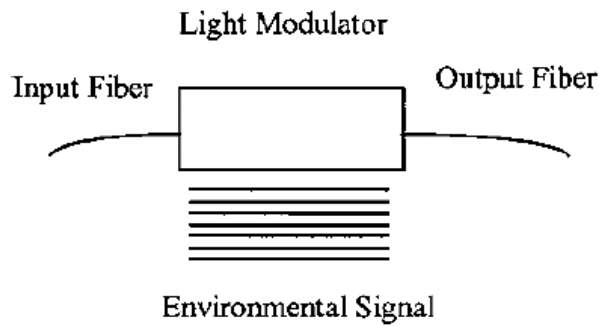
### 3.4.1 Ενδογενείς αισθητήρες (Intrinsic Sensors)

Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν πίεση, φόρτιση βάρους, θερμοκρασία, μηχανική τάση και άλλες φυσικές και χημικές ποσότητες με την διαμόρφωση των ιδιοτήτων της δέσμης φωτός που διαδίδεται μέσα από την ίνα. Έτσι, κάθε αλλαγή της έντασης, της φάσης, της πόλωσης, του μήκους κύματος ή του χρόνου μετάδοσης του φωτός στην ίνα, που προκαλείται από την υπό μέτρηση ποσότητα καταγράφεται και από αυτή προκύπτει με ακρίβεια η μέτρηση της ποσότητας. Οι πιο απλοί αισθητήρες είναι αυτοί στους οποίους αλλάζει η ένταση του φωτός. Χρειάζονται μόνο μία πηγή και ένας ανιχνευτής φωτός. Μία σημαντική λειτουργία που επιτρέπουν είναι ότι μπορούν να παρέχουν πληροφορία κατανεμημένη σε πολύ μεγάλες αποστάσεις [7], [8].

Η θερμοκρασία, η μετατόπιση, η πίεση μπορούν να υπολογιστούν με την χρήση μιας ίνας.

### 3.4.2 Εξωγενείς αισθητήρες (Extrinsic Sensors)

Οι εξωγενείς αισθητήρες χρησιμοποιούν οπτική ίνα, συνήθως πολύτροπη, για να μεταφέρουν το φως είτε μέσω ενός διαμορφωτή που επηρεάζεται από ένα υπό μέτρηση εξωτερικό παράγοντα είτε από ένα μη οπτικό (π.χ. ένα ηλεκτρονικό αισθητήρα) συνδεδεμένο με οπτικό πομπό. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα τους να φτάσουν σε μέρη που είναι δύσκολη η πρόσβαση σε κλασικούς αισθητήρες. Ένα παράδειγμα είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας μέσα στην μηχανή αεροπλάνων που χρησιμοποιούν τεχνολογία jet, όπου χρησιμοποιείται ίνα για να μεταδώσει την ακτινοβολία σε ένα μετρητή που βρίσκεται έξω από την μηχανή. Επίσης χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο σε ηλεκτρικούς μετατροπείς ή σε σημεία όπου η ακτινοβολία είναι μεγάλη και είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί με άλλο τρόπο.



**Σχήμα 3.5 :** Εξωγενής Αισθητήρας με δύο ίνες και μία διάταξη όπου μέσα το φως αλλάζει με βάση τις αλλαγές στο περιβάλλον.

Οι εξωγενείς αισθητήρες προσφέρουν μεγάλη προστασία στα σήματα μέτρησης από τα παράσιτα του θορύβου. Δυστυχώς πολλοί απλοί αισθητήρες παράγουν μόνο ηλεκτρικά σήματα στις εξόδους, που πρέπει να μετατραπούν σε οπτικά σήματα για να χρησιμοποιηθούν σε οπτικές ίνες. Για παράδειγμα τα θερμομέτρα με αντίσταση λευκόχρυσου όπου οι αλλαγές στην θερμοκρασία μεταφράζονται σε αλλαγές των αντιστάσεων .

Οι εξωγενείς αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν δόνηση, περιστροφή, αλλαγή θέσης, ταχύτητα, επιτάχυνση και καμπυλότητα (εξοχές).

### 3.5 Πλεονεκτήματα αισθητήρων οπτικών ινών

Βελτίωση των τρεχόντων αισθητήρων οπτικών ινών αναμένεται να οδηγήσει σε καλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη αξιοπιστία και μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών. Επίσης, αναμένεται βελτίωση της ακρίβειας και της ανθεκτικότητας λόγω της μελέτης νέων υλικών. Τέλος, νέοι σχεδιασμοί συνδυασμένοι με την υπάρχουσα τεχνολογία (lab-on-a-chip, συστοιχίες αισθητήρων), θα προκαλέσουν την αύξηση του ενδιαφέροντος και τη διεύρυνση της αγοράς των αισθητήρων.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση των αισθητήρων οπτικών ινών και μικροαισθητήρων συνοπτικά είναι:

- Μικρότερο μέγεθος, χαρακτηριστικό κρίσιμο σε αρκετές εφαρμογές (εμφυτεύματα).
- Μειωμένο κόστος κατασκευής (εξαρτώμενο από τον όγκο της παραγωγής).
- Ελαττωμένη κατανάλωση ενέργειας, χαρακτηριστικό κρίσιμης σημασίας για εφαρμογές όπου η διάρκεια λειτουργίας περιορίζεται από τη διάρκεια ζωής της ενεργειακής πηγής.
- Μικρότερες ποσότητες ακριβών χημικών αντιδραστηρίων όπως επίσης και σε περιπτώσεις στις οποίες το δείγμα δεν είναι διαθέσιμο σε αρκετά μεγάλες ποσότητες.
- Βελτιωμένη απόδοση.
- Μεγαλύτερη παραγωγή λόγω παράλληλων και ταχύτερων διαδικασιών.
- Ολοκλήρωση και πολυλειτουργικότητα.
- Αυτοματοποιημένη προετοιμασία δείγματος, σύνθεση σε ψηφίδα.
- Ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων ελέγχεται από συστήματα παρακολούθησης.
- Νέες λειτουργίες εξαιτίας νέων φαινομένων που προκύπτουν από τον παράγοντα σμίκρυνσης.
- Αυξημένη ασφάλεια.

Άλλα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των Οπτικών Αισθητήρων αναφέρονται επιγραμματικά ακολούθως: [16], [17], [18], [19]

- Μικρό Μέγεθος περίπου 250μm και βάρος
- Η ελαστικότητα των αισθητήρων επιτρέπει την κάλυψη και των πιο περίεργων κατασκευών
- Ανεπηρέαστο από ακτινοβολίες (EMI/RFI/radiation)
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας
- Συμβατοί με τα σεισμικά στάνταρντ
- Φιλικοί προς το περιβάλλον
- Βελτιστοποιούν τα αποτελέσματα οικονομικά και κοινωνικά των ιδιοκτητών των έργων
- Δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων, σε σημεία και διατάξεις αδύνατα να μετρηθούν με τους συμβατικούς αισθητήρες

- Μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων, δυνατότητα επανάληψης μέτρησης κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου (σεισμός, διέλευση μεγάλου οχήματος, ισχυροί άνεμοι, πλημμύρες κλπ.)
- Δυνατότητα απομακρυσμένης επιτήρησης
- Δεν χρειάζεται ρύθμιση μετά την τοποθέτηση
- Αντοχή στη διάβρωση
- Δεν δημιουργούν σπινθήρες
- Δεν χρειάζονται γειώσεις
- Ανεπηρέαστοι από μέτρηση σε μέτρηση
- Μείωση κόστους συντήρησης
- Μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής
- Δυνατότητες Πολυπλεξίας
- Δυνατότητα μετάδοσης χιλιόμετρα μακριά με απλά τηλεπικοινωνιακά καλώδια
- Τροφοδοτούνται με φως και δεν υπάρχει κίνδυνος σε εύφλεκτα περιβάλλοντα

Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες για να μετρήσουν την πίεση, τη θερμοκρασία, τη μετατόπιση και άλλες παραμέτρους. Το μικρό μέγεθος και το γεγονός ότι καμία ηλεκτρική δύναμη δεν απαιτείται στη μακρινή θέση δίνουν στην ίνα και τον οπτικό αισθητήρα ένα πλεονέκτημα πέρα από έναν συμβατικό ηλεκτρικό αισθητήρα σε ορισμένες εφαρμογές.

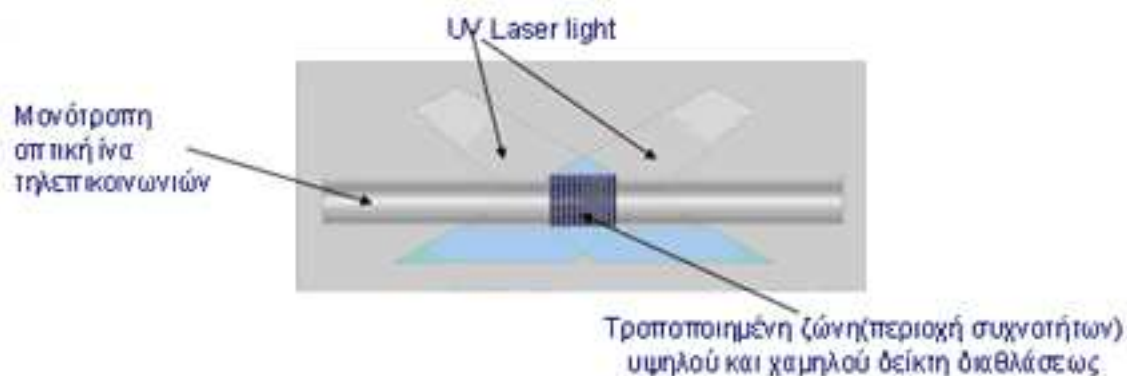
Οι ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως στις εφαρμογές φωτισμού. Επίσης προκειμένου να παρακολουθηθεί η δομική ακεραιότητα των κατασκευών χρησιμοποιούνται αισθητήρες οπτικών ινών και συγκεκριμένα οπτικοί FBG (Fibres Bragg Grating) αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, επιτάχυνσης, κλπ. Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα είναι ότι διαθέτουν δυνατότητα μεταξύ τους διασύνδεσης και πολυπλεξίας δημιουργώντας οπτικά δίκτυα και καλύπτοντας μεγάλες και δυσπρόσιτες επιφάνειες. Τα δίκτυα των αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να είναι επικολλημένοι ή και εμφυτευμένοι σε δομές διαφόρων ειδών, χρησιμοποιούνται για τη δυναμική και αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων και τη δημιουργία συστημάτων εποπτείας, ελέγχου και παρακολούθησης.



### 3.6 Τρόπος κατασκευής και λειτουργίας FBG αισθητήρων

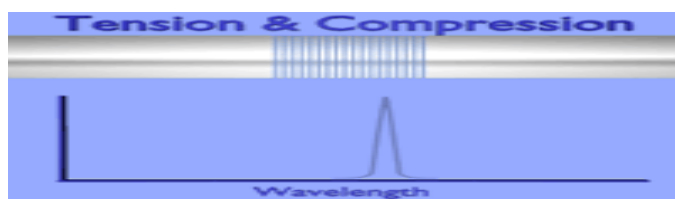
Ο τρόπος κατασκευής ενός οπτικού αισθητήρα είναι σχετικά απλός. Μια απλή τηλεπικοινωνιακή οπτική ίνα εκτίθεται σε συγκλίνουσες δέσμες UV laser light.

Οι δέσμες αυτές όταν διασταυρώνονται, μεταβάλλουν μέρος της δομής της οπτικής ίνας και αλλάζουν περιοδικά τον δείκτη διάθλασης δημιουργώντας διαφορετικές περιοχές υψηλού και χαμηλού δείκτη διαθλάσεως στον πυρήνα της ίνας.



Σχήμα 3.6

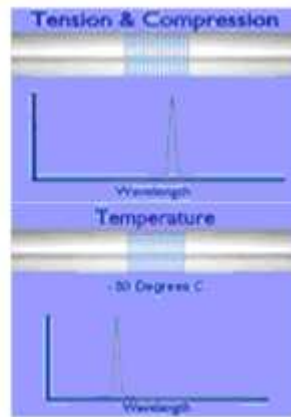
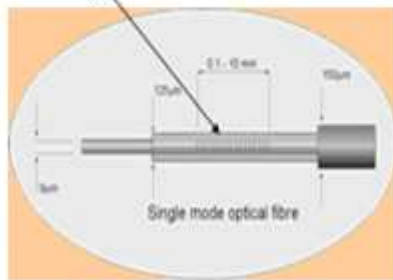
Η τροποποιημένη ζώνη της οπτικής ίνας λειτουργεί σαν οπτικό φίλτρο, αντανακλώντας μια ελάχιστη ποσότητα του ευρυζωνικού σήματος, συγκεκριμένου μήκους κύματος, επιτρέποντας παράλληλα στο υπόλοιπο φως να συνεχίσει την πορεία του μέσα στην ίνα.



Σχήμα 3.7

Αυτή η τροποποιημένη περιοχή είναι ευαίσθητη στις τάσεις εφελκυσμού και συμπίεσης και στις μεταβολές θερμοκρασίας [22].

Περιοχή τροποποίησης  
υψηλού και χαμηλού δείκτη  
διάθλασης



**Σχήμα 3.8**

Έτσι, όταν ασκηθεί σε ένα οπτικό αισθητήρα μια τάση ή όταν μεταβληθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος, μεταβάλλεται το μήκος κύματος του ανακλώμενου σήματος. Από την μετατόπιση αυτή του μήκους κύματος υπολογίζεται άμεσα η ασκούμενη τάση ή μεταβολή θερμοκρασίας. [39]

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>**

### **Εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών**

Οι αισθητήρες οπτικών βρίσκουν σήμερα εφαρμογή στους περισσότερους τομείς της τεχνολογίας καθώς σε πολλές περιπτώσεις είναι καλύτεροι συγκρινόμενοι με τους κλασσικούς αισθητήρες σε επίπεδο σταθερότητας, ταχύτητας, ακρίβειας, εμβέλειας όσο και σε επίπεδο μετρήσεων, πρόσβασης, ασφάλειας, προστασίας. [20-36].

#### **4.1 Αρχή λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών**

Για την κατανόηση της αρχής λειτουργίας των αισθητήρων οπτικών ινών θα μελετήσουμε την ανάπτυξη διαφόρων μεθόδων που συσχετίζουν τις ιδιότητες και τη

συμπεριφορά των οπτικών ινών με τις οπτικές ιδιότητες του μέσου που τις περιβάλλει. Τέτοιες μέθοδοι είναι πιθανό να επιτρέψουν τη δημιουργία συσκευών – αισθητήρων ικανών να αναγνωρίσουν και να ταυτοποιήσουν το περιβάλλον τους. Ο λόγος για τον οποίο στραφήκαμε στις οπτικές ίνες είναι ότι έχουν κάποιες πολύ ενδιαφέρουσες ιδιότητες που ευνοούν το στόχο μας. Έτσι, για παράδειγμα, ενώ γνωρίζουμε ότι το φως διαδίδεται μόνο ευθεία, οι οπτικές ίνες μπορούν να καθοδηγήσουν τη μετάδοσή του προς οποιαδήποτε επιθυμητή κατεύθυνση. Αυτό είναι χρήσιμο κυρίως για τη βιοϊτρική, αφού είναι αδύνατον να εισχωρήσουμε βαθιά στο ανθρώπινο σώμα ακολουθώντας ευθεία πορεία. Επίσης, οι οπτικές ίνες έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας, πιο αξιόπιστα και γρήγορα από άλλους κυματοδηγούς και μάλιστα την μεταφέρουν σωστά, χωρίς απώλειες, για μεγαλύτερες αποστάσεις, ιδιότητες πολύ θετικές και για τη χρήση τους σε μεγάλα βάθη. Τέλος δε μας περιορίζει το μέγεθός τους αφού είναι πολύ λεπτές και ευέλικτες.

Στη συνέχεια περιγράφουμε μεθόδους μέτρησης του κύματος (πεδίου) που μπορεί να «δραπετεύει» έξω από την οπτική ίνα και να την καθιστά με αυτό τον τρόπο αισθητήρα. Για να λειτουργήσει η ίνα ως αισθητήρας που αντιλαμβάνεται τι υλικό την περιβάλλει, θα πρέπει μέρος του κύματος που αυτή «οδηγεί» να μπορεί να έρθει σε επαφή με το υλικό που την περιβάλλει, δηλαδή να εξέλθει από αυτήν. Θα δούμε ότι στην περίπτωση που επικαλύπτουμε την ίνα με μέταλλο, έχουμε απώλεια κύματος από την ίνα, δηλαδή σημαντικό ποσοστό του κύματος «δραπετεύει» από τα όρια της ίνας και αρχίζει να μεταδίδεται έξω από αυτήν. Αυτό δείχνει ότι η επικάλυψη μετάλλου καθιστά την ίνα καλό αισθητήρα.

#### **4.1.2 Απλοί αισθητήρες οπτικών ινών**

Οι οπτικές ίνες διαθέτουν διάφορα χαρακτηριστικά, τη μεταβολή των οποίων εκμεταλλευόμαστε για να τις χρησιμοποιήσουμε ως αισθητήρες. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι οι μικροκάμψεις (micro bendings), συμβολομετρικά φαινόμενα, η μεταβολή του δείκτη διάθλασης, η αλλαγή της πόλωσης, η μεταβολή του μήκους κύματος, τα περιθλαστικά φράγματα καθώς και το φαινόμενο Sagnac το οποίο εφαρμόζεται για την ανίχνευση περιστροφικής κίνησης.

Ο μηχανισμός, δηλαδή, οπτικής διαμόρφωσης μπορεί να είναι: έντασης, φάσης, μήκους κύματος, πόλωσης.

Οι αισθητήρες οπτικών ιών με διαμόρφωση έντασης χρησιμοποιούνται συνήθως ως αισθητήρες απόστασης και δύναμης.

Οι αισθητήρες οπτικών ιών με διαμόρφωση φάσης χρησιμοποιούν συμβολόμετρα (Michelson, Mach-Zender, Fabry-Perot, Ring) και βρίσκουν εφαρμογές ως αισθητήρες δύναμης/τάσης, πίεσης, θερμοκρασίας, ρεύματος/τάσης κ.α.

Οι αισθητήρες οπτικών ιών με διαμόρφωση μήκους κύματος (Bragg grating) χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών όπως έλεγχο σωληνώσεων, ροή κίνησης, γεφυρών, σεισμών, πλοίων, αεροπλάνων, κ.α. Μπορούν να ανιχνεύσουν θερμοκρασία, επιτάχυνση, υγρασία, πίεση.

Γενικά το σήμα τάσης εξόδου από έναν αισθητήρα οπτικών ιών στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη θέση, μετατόπιση, πλάτος ταλάντωσης κτλ

Οι αισθητήρες οπτικών ιών διακρίνονται, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανάλογα με την περιοχή αίσθησης σε ενδογενείς (εσωτερικούς) και εξωγενείς (εξωτερικούς). Οι εσωτερικοί έχουν την περιοχή αίσθησης εντός της οπτικής ίνας και το φως ποτέ δεν βγαίνει έξω από την ίνα. Οι εξωτερικοί αφήνουν το φως να βγει από την οπτική ίνα, να φτάσει στην εξωτερική περιοχή αίσθησης και να επιστρέψει στην ίνα.

Γενικά, αλλαγές στις ιδιότητες του φωτός διαμορφώνουν τη βάση στην οποία στηρίζεται η τεχνολογία αισθητήρων οπτικών ιών.

Η θερμοκρασία, για παράδειγμα, υπολογίζεται έμμεσα αφού μετρηθούν μεταβολές μήκους κύματος ή διαφορές φάσης και μετατραπούν σε θερμοκρασία μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης αισθητήρων οπτικών ιών για λήψη αρκετών διαφορετικών μετρήσεων είναι οι κατασκευές. Με σύζευξη μιας οπτικής ίνας σε κατασκευή και παρακολουθώντας την αλλαγή στην ένταση του φωτός, τη

φάση ή το μήκος κύματος στην έξοδο, προκύπτει πληροφορία για τη δομική κατάσταση της κατασκευής.

Μετά από χρόνια χρήσης, πολλές κατασκευές από σκυρόδεμα, όπως γέφυρες, φράγματα και μονάδες παραγωγής ισχύος, επιδεικνύουν σημάδια φθοράς και γήρανσης. Για την διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας αυτών των κατασκευών αλλά και για τον ορθολογιστικό προγραμματισμό των εργασιών συντήρησής τους, υπάρχει ανάγκη παρακολούθησης της δομικής τους κατάστασης με την πάροδο του χρόνου.

Συνήθως η δομική παρακολούθηση περιλαμβάνει μετρήσεις των επιμηκύνσεων, μετατοπίσεων, περιστροφών ή/και επιταχύνσεων σε διάφορα σημεία πάνω στην κατασκευή. Τα συμβατικά όργανα που αποτελούν τη βάση της τεχνολογίας για αυτές τις μετρήσεις είναι οι ηλεκτρικοί αισθητήρες και οι διάφοροι μετατροπείς σήματος (επιμηκυνσιόμετρα, επιταχυνσιόμετρα, αποστασιόμετρα κλπ.). Τα τελευταία χρόνια, συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται σε αισθητήρες οπτικών ινών αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης μεγάλων κατασκευών από σκυρόδεμα.

Τα συμβατικά ηλεκτρικά όργανα που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα είναι αισθητήρες “σημειακού” τύπου. Αυτοί μπορούν να διαγνώσουν μεταβολές μόνο σε τοπικά σημεία της κατασκευής. Όμως, οι “σημειακές” μετρήσεις δεν είναι αποδοτικές και θα πρέπει να συνδυάζονται με παραδοχές και κατάλληλη μοντελοποίηση για την εκτίμηση της δομικής κατάστασης της κατασκευής. Η γήρανση μιας κατασκευής από σκυρόδεμα πραγματοποιείται σταδιακά με την ανάπτυξη και διάδοση τοπικών ρωγμών, οι οποίες λόγω της ανομοιογένειας του οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να αναπτύσσονται σε οποιοδήποτε τμήμα της. Για την αποδοτική και αξιόπιστη διάγνωση ρωγμών, τόσο καμπτικών (κάθετων στις ίνες εφελκυσμού) όσο και διαστρωματικών (παράλληλων στην επιφάνεια) σε μια κατασκευή από σκυρόδεμα, απαιτείται ένας “κατανεμημένος” αισθητήρας. Με άλλα λόγια χρειαζόμαστε έναν αισθητήρα ικανό να διαγιγνώσκει μεταβολές, οι οποίες πραγματοποιούνται σε οποιαδήποτε θέση εντός μιας ευρείας -υπό έλεγχο- ζώνης. Ιδανικά αντικείμενα για τη δημιουργία κατανεμημένων αισθητήρων είναι οι οπτικές ίνες.

Ο αισθητήρας SOFO (Surveillance d' Ouvrage par Fibres Optiques) αναπτύχθηκε στην Ελβετία (Federal Institute of Technology in Lausanne - EPFL) και ήδη

χρησιμοποιείται σε πολλές κατασκευές, όπως γέφυρες, σήραγγες και φράγματα. Αποτελείται από δύο ίνες, οι οποίες προσαρμόζονται μέσα σε ένα μεταλλικό σωλήνα, ο οποίος τοποθετείται στο υπό παρακολούθηση στοιχείο της κατασκευής. Η μία ίνα είναι συζευγμένη με την κατασκευή, ενώ η άλλη είναι ελεύθερη (η επιμήκυνσή της είναι πάντα μηδενική). Η φόρτιση του στοιχείου συνεπάγεται μεταβολή της επιμήκυνσης της μιας ίνας με αποτέλεσμα την αλλαγή της διαφοράς της οπτικής διαδρομής μεταξύ των δύο ινών. Η διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων που ανακλώνται από τους δύο καθρέπτες επίσης θα αλλάξει. Ο αποδιαμορφωτής του σήματος αποτελείται από δύο ίνες, εκ των οποίων η μία καταλήγει σε σταθερό καθρέπτη, ενώ η άλλη καταλήγει μπροστά σε ένα κινητό καθρέπτη. Με κατάλληλους χειρισμούς, η μέση επιμήκυνση του μεταλλικού σωλήνα μπορεί να συσχετιστεί με τη θέση του κινητού καθρέπτη (συμβολομετρία Michelson). Το μήκος του σωλήνα, το οποίο αποτελεί το μήκος αναφοράς για τη μέτρηση της επιμήκυνσης, μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με τις απαιτήσεις. Έτσι, ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιείται είτε ως σημειακός αισθητήρας σε βραχύ σωλήνα είτε ως ολοκληρωμένος αισθητήρας σε σωλήνα μεγάλου μήκους. Για την παρακολούθηση της επιμήκυνσης σε διάφορες θέσεις ένας αριθμός αισθητήρων SOFO μπορούν να συνδεθούν σειριακά, διαχωριζόμενοι από ημιπερατούς ανακλαστήρες/ φίλτρα (πολυπλεξία). Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοινός αποδιαμορφωτής σήματος, μειώνοντας το συνολικό κόστος δικτύωσης.

Άλλου τύπου αισθητήρες είναι οπτικές ίνες στις οποίες έχουν δημιουργηθεί ανάγλυφα φράγματα περιθλάσεως (Bragg gratings), που είναι περιοδικές μεταβολές του δείκτη περίθλασης κατά μήκος της ίνας σε κλίμακα μήκους οπτικού κύματος. (Η μεταβολή αυτή δημιουργείται με συμβολή δύο ισχυρών ακτινών laser, οι οποίες προσπίπτουν επάνω στην πλευρική επιφάνεια της ίνας σε αντίθετες γωνίες.) Φως μήκους κύματος ίδιου με της περιόδου του φράγματος ανακλάται έντονα. Όταν ένα σήμα ευρέως φάσματος περνάει μέσα από την ίνα, τότε το συγκεκριμένο μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην περίοδο μεταβολής του δείκτη διάθλασης, ανακλάται εντονότερα από τα άλλα μήκη κύματος, δίνοντας στην έξοδο και στη συγκεκριμένη συχνότητα εντονότερο σήμα. Όταν η ίνα επιμηκύνεται, οπότε αυξάνεται το βήμα των φραγμάτων περίθλασης, αντίστοιχα το μέγιστο στην έξοδο μετατοπίζεται σε μεγαλύτερο μήκος κύματος. Δημιουργώντας φράγματα περίθλασης με διαφορετικές περιόδους μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε διαφορετικά σημεία της οπτικής ίνας

μπορούμε να εντοπίσουμε τις τυχόν επιμηκύνσεις της ίνας, άρα και της κατασκευής, παρατηρώντας σε ποια μήκη κύματος έχουμε μετατόπιση του μεγίστου (ταυτοποίηση).

Εκτός από αισθητήρες για τον εντοπισμό μεταβολών μήκους έχουν αναπτυχθεί και αισθητήρες οπτικών ινών για εντοπισμό μεταβολών υγρασίας ή χημικού περιβάλλοντος (πχ. γλωριδίων). Οι δυνατότητες αυτές είναι πολύ χρήσιμες για την παρακολούθηση της στεγανότητας μεγάλων δεξαμενών ή της ανάπτυξης διαβρωτικού -για το σιδερένιο οπλισμό- περιβάλλοντος.

Οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν πολύ καλή προσαρμοστικότητα. Με διαφορετικές διαμορφώσεις, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις διαφόρων μεγεθών. Επίσης, είναι δυνατό να μετρηθούν ταυτόχρονα δύο μεγέθη (πχ. αξονικές και εγκάρσιες παραμορφώσεις) από τον ίδιο αισθητήρα. Επιπλέον, με τις οπτικές ίνες, μπορεί να σχεδιασθούν κατανεμημένοι αισθητήρες, οι οποίοι παρακολουθούν μεταβολές στην τιμή ενός μεγέθους κατά μήκος της οπτικής ίνας

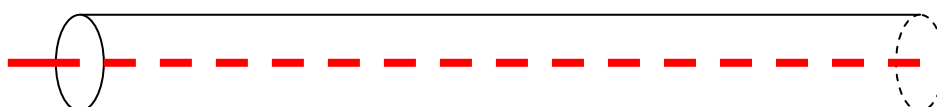
#### **4.2 Σύζευξη Μεταξύ Δύο Μη-Παράλληλων Οπτικών Ινών Βυθισμένων Σε Υγρό Οπτικό Μέσο**

Εξετάζουμε με αναφορά σε πειραματικά δεδομένα πώς επηρεάζεται η σύζευξη μεταξύ δύο μη παράλληλων οπτικών ινών σε επαφή, από το υγρό μέσο στο οποίο βυθίζεται το σημείο επαφής τους. Δοκιμάζονται διάφορα οπτικά μέσα γύρω από το σημείο σύζευξης, όπως αέρας, καθαρό νερό, κolloειδή χρυσού και υδατικά διαλύματα από quantum dots. Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η σύζευξη εξαρτάται σημαντικά τόσο από τον τύπο και τη συγκέντρωση της ανομοιογένειας στο υγρό μέσο, όσο και από το μήκος κύματος της διέγερσης. Η εισαγωγή κolloειδούς στα ομογενή μέσα έχει μικρή μόνο επίδραση στη σύζευξη. Τα quantum dots, αντίθετα, έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην αποτελεσματικότητα της σύζευξης.[37]

#### 4.2.1 Περιγραφή πειραμάτων

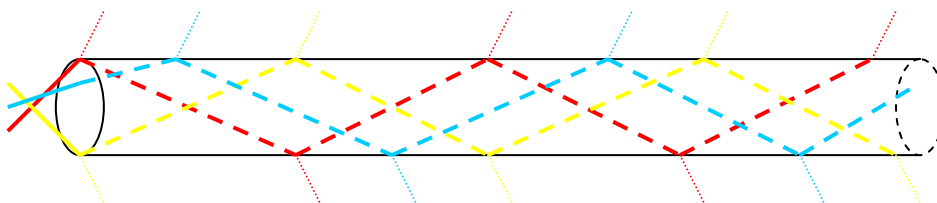
Σκοπός είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της σύζευξης μεταξύ δύο μη παράλληλων επαπτόμενων οπτικών ινών μέσα σε υγρό οπτικό μέσο. Σε αυτό το πείραμα χρησιμοποιούνται δύο γυμνωμένες πολυρυθμικές οπτικές ίνες (διαμέτρου 200 $\mu\text{m}$ ) σε επαφή και μετρήθηκε η ισχύς εξόδου τόσο της ίνας διέγερσης όσο και της ίνας σύζευξης. Η ίνα διέγερσης ήταν εκείνη που συνδέεται στο laser και παρέμενε σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ η ίνα σύζευξης βρισκόταν σε επαφή με την ίνα διέγερσης και ήταν δυνατόν να περιστρέφεται μεταβάλλοντας έτσι την γωνία μεταξύ των δύο ινών. Το σημείο επαφής ή αλλιώς σύζευξης βυθίστηκε σε διάφορα υγρά μέσα που περιείχαν ανομοιογένειες, όπως quantum dots και κolloειδή νανοσωματιδίων χρυσού. Και οι δύο ίνες συνδέθηκαν με οπτικούς φωρατές, για τη μέτρηση των ισχύων εξόδου τους. [37]

Σε μια μονορυθμική ίνα το φως κυματοδηγείται σχεδόν εξολοκλήρου στο εσωτερικό της και δεν παρατηρείται σημαντική ακτινοβολία εκτός αυτής.



**Σχήμα 4.1 :** Μονορυθμική ίνα (Single-mode Fiber)

Από την άλλη, μια πολυρυθμική ίνα επιτρέπει μέρος της ακτινοβολίας να ταξιδέψει έξω από τα όριά της.



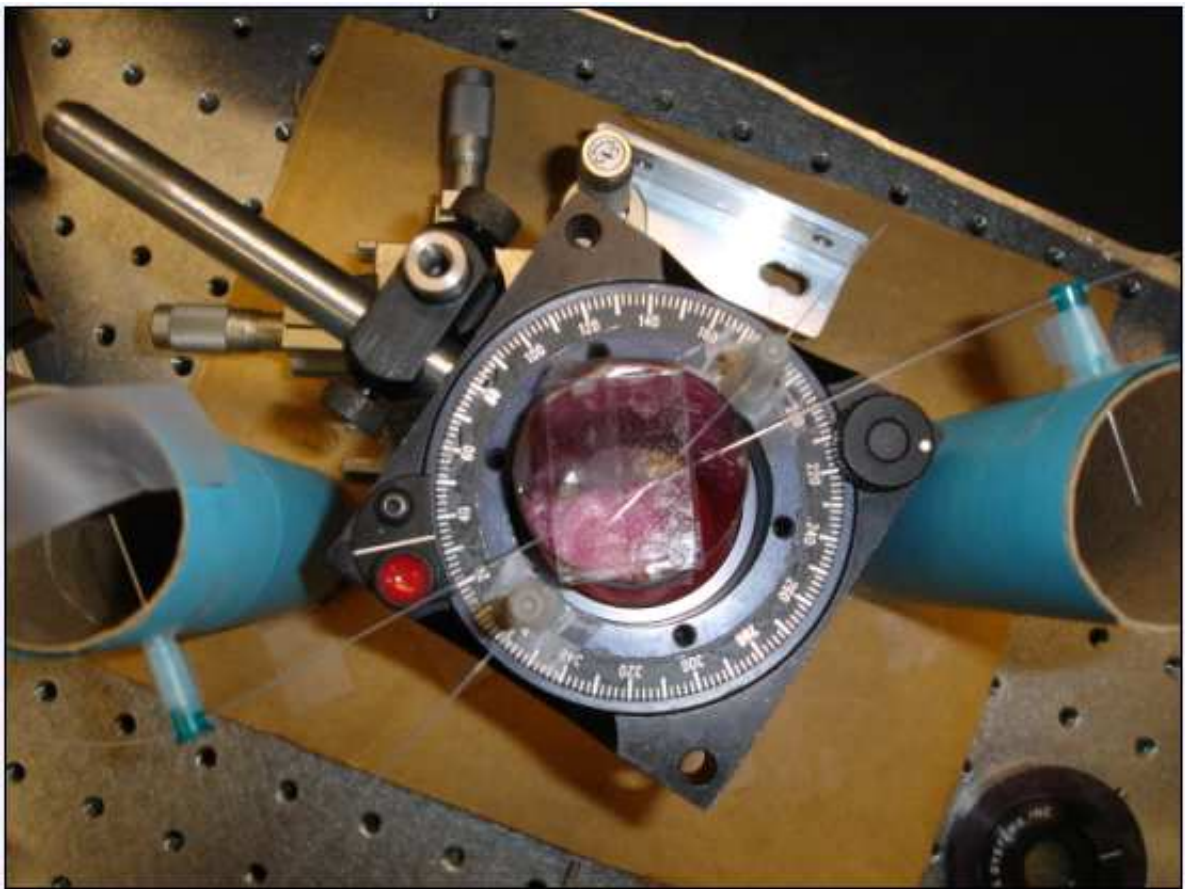
**Σχήμα 4.2 :** Πολυρυθμική ίνα (Multimode Fiber)

Έτσι, αν χρησιμοποιηθούν δύο πολυρυθμικές ίνες, θα παρατηρηθεί σαφέστερη αλληλεπίδραση μεταξύ τους, απ' ό τι στην περίπτωση μονορυθμικών ινών.



Προκειμένου να είναι εφικτή η διοχέτευση φωτός από το laser στην ίνα διέγερσης πρέπει να προσαρμοστεί ένας connector πάνω σε αυτήν. Το επόμενο βήμα είναι να γυμνωθούν οι ίνες. Το προστατευτικό περίβλημα και η επένδυση εμποδίζουν την οπτική διαρροή από τις ίνες. Συνεπώς, προκειμένου να επιτευχθεί σύζευξη του κύματος αποκοπής (evanescent wave) από την ίνα διέγερσης στην ίνα σύζευξης, έπρεπε και οι δύο να γυμνωθούν στο σημείο σύζευξης.

Η τελική διάταξη του πειράματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



**Σχήμα 4.3 :** Πειραματική Διάταξη [37]

Στερεώνεται η ίνα σύζευξης σε μια κυκλική βάση και η διεγερόμενη ίνα σε δύο στηρίγματα. Η βάση επιτρέπει τη μεταβολή της γωνιακής θέσης της ίνας σύζευξης

και έτσι τη σχετική γωνία μεταξύ των δύο κυματοδηγών. Επίσης έδινε τη δυνατότητα μετακίνησης της ίνας στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Αυτό είναι σημαντικό, διότι μπορεί να τοποθετηθεί η ίνα σύζευξης αρκετά ψηλά, ώστε οι δύο ίνες να τεντωθούν και να είναι σε ισχυρή επαφή, οπότε να μην αιωρείται η μία πάνω από την άλλη. Υψώνεται η ίνα σύζευξης, έως ότου η διεγερόμενη ίνα αρχίσει να λυγίζει λίγο εξαιτίας της πίεσης από την πρώτη, και έτσι οι δύο ίνες σταθεροποιούνται ακουμπώντας στέρεα η μια στην άλλη.

Κάτω από το σημείο σύζευξης προσαρμόζεται μία υδροφοβική επιφάνεια. πρέπει να εξασφαλίζεται ότι το σημείο επαφής και σύζευξης των ινών θα βρίσκεται συνεχώς βυθισμένο στο υγρό μέσο. Η υδροφοβική επιφάνεια συγκρατεί τη σταγόνα του υγρού συγκεντρωμένη πάνω από το σημείο σύζευξης και δεν της επιτρέπει να απλωθεί και να το αφήσει ακάλυπτο.

#### 4.2.2 Αποτελέσματα – Παρατηρήσεις

##### 1<sup>η</sup> Σειρά Πειραμάτων

Για αυτή τη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιείται κόκκινο laser (μήκος κύματος 640nm). Μετρούνται οι ισχύεις εξόδου των δύο ινών για  $\theta=5^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$  και κάθε  $\theta$  μεταξύ  $10^\circ$  και  $90^\circ$  με βήμα  $10^\circ$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται από τις δύο ίνες στο σημείο επαφής τους. Χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά οπτικά μέσα στο σημείο σύζευξης, αέρα, νερό και κολλοειδές διάλυμα. Το τελευταίο είναι ένα κοκκινόχρωμο υδατικό διάλυμα που περιέχει νανοσωματίδια χρυσού.

Παρατηρείται να υπάρχει μια πτωτική σχέση ανάμεσα στη μεταβίβαση ισχύος και στη γωνία, δηλαδή, όταν αυξάνεται η γωνία  $\theta$ , η μεταφορά ισχύος από την πρώτη ίνα στη δεύτερη μειώνεται.

Παρατηρείται επίσης ότι το νερό είναι πολύ καλύτερο οπτικό μέσο από τον αέρα, διότι έχουμε μεγαλύτερη μεταφορά φωτός από τη μία ίνα στην άλλη.

Οι συμπεριφορές των δύο υγρών είναι ουσιαστικά ίδιες και ότι το κολλοειδές δεν είναι κατάλληλο για το σκοπό του πειράματός, που είναι η εύρεση των διαφορών στα

ποσοστά ισχύος που μεταφέρονται από τη μία ίνα στην άλλη για διαφορετικά υγρά οπτικά μέσα.

## 2<sup>η</sup> Σειρά Πειραμάτων

Για αυτή τη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιείται μπλε laser (μήκος κύματος 475nm). Μετρούνται οι ισχύεις εξόδου των δύο ινών για  $\theta=20^\circ$ . Δοκιμάζονται ως οπτικά μέσα ο αέρας και τρία διαφορετικά διαλύματα quantum dots.

Τα quantum dots είναι μικρές συσκευές που κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά και έχουν τυπικές διαστάσεις μεταξύ νανόμετρων και λίγων μικρόμετρων. Αν ένα dot διεγερθεί με φως, στη συνέχεια εκπέμπει φως συγκεκριμένου χρώματος. Όσο μικρότερο είναι το dot, τόσο υψηλότερης ενέργειας και έντασης είναι το φως που αυτό εκπέμπει, δηλαδή τόσο πιο μπλε απόχρωσης.

Χρησιμοποιούνται διαλύματα quantum dots τριών διαφορετικών μηκών κύματος, πράσινα quantum dots (525nm), κίτρινα (595nm) και κόκκινα (605nm).

Το πρώτο πράγμα που εξετάζεται είναι η εξάρτηση από τη γωνία  $\theta$ . Όπως προηγουμένως, υπάρχει μια πτωτική σχέση ανάμεσα στη μεταβίβαση ισχύος και στη γωνία.

Το επόμενο πράγμα που εξετάζεται είναι χονδρικά πώς τα quantum dots μεταβάλλουν την μεταβίβαση φωτός. Για τα πειράματα αυτά χρησιμοποιούνται ως οπτικά μέσα ο αέρας και τα τρία είδη qdots που είδαμε παραπάνω.

Αποδεικνύεται πως όταν το οπτικό μέσο είναι διάλυμα quantum dots, η μετάδοση φωτός μειώνεται δραματικά συγκρινόμενη με αυτή στον αέρα.

Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια να διακριθεί το χρώμα του φωτός που εκπέμπεται από τα quantum dots όταν αυτά διεγερθούν με μπλε φως. Το χρώμα είναι ευδιάκριτο για τα κόκκινα quantum dots, δύσκολα αντιληπτό για τα κίτρινα και απόλυτα αμφισβητήσιμο για τα πράσινα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα κόκκινα qdots απορροφούν την περισσότερη ενέργεια στο σημείο σύζευξης από τα τρία είδη προκειμένου να εκπέμψουν φως και έτσι περιορίζουν περισσότερο από τα άλλα την ισχύ που μεταδίδεται από τη μία ίνα στην άλλη. [37]

#### 4.2.3. Συμπεράσματα – Σχολιασμός

- Υπάρχει μια πτωτική σχέση ανάμεσα στη μεταβίβαση ισχύος και στη γωνία. Αυτό είναι εύλογο, διότι όταν αυξάνεται η γωνία ανάμεσα στις δύο ίνες, το μήκος της περιοχής σύζευξης μειώνεται αφού η απόσταση των ινών πέρα από το σημείο επαφής είναι μεγαλύτερη και έτσι η αλληλεπίδρασή τους είναι μικρότερη.
- Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι το νερό είναι πολύ καλύτερο οπτικό μέσο από τον αέρα. Αυτό συμβαίνει επειδή το νερό έχει μεγαλύτερο συντελεστή διάθλασης από αέρα, οπότε όταν το φως φτάνει στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ νερού και αέρα, ανακλάται προς τα κάτω και είναι πιθανό να πέσει πάνω στην ίνα σύζευξης και να εισέλθει σε αυτήν. Επίσης, επειδή ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι πιο μεγάλος από αυτόν του αέρα και άρα πλησιέστερος σε αυτόν της ίνας, διευκολύνει το κύμα να βγει από την πρώτη ίνα και να μπει στη δεύτερη περισσότερο από ότι ο αέρας.
- Το κολλοειδές συμπεριφέρεται σαν νερό. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν σκεφτούμε ότι τα νανοσωματίδια είναι πολύ μικρά συγκρινόμενα με το μήκος κύματος του φωτός, επομένως δεν αποτελούν εμπόδια για το φως. Το φως δε μπορεί να τα «δει». Μπορεί να διαδοθεί ανάμεσά τους σαν αυτά να μην υπάρχουν.
- Η μετάδοση φωτός μειώνεται όταν το οπτικό μέσο είναι ένα διάλυμα qdots. Προκειμένου τα qdots να εκπέμπουν φως όταν διεγερθούν από μία ακτίνα, πρέπει να απορροφήσουν ενέργεια στο σημείο σύζευξης. Αυτή η απορρόφηση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φωτός που μεταδίδεται από τη μία ίνα στην άλλη.

#### 4.2.4 Εφαρμογές

Τα αποτελέσματά δείχνουν ότι η σύζευξη εξαρτάται ισχυρά τόσο από το μήκος κύματος όσο και από τη συγκέντρωση των qdots μέσα στο υγρό μέσο. Το γεγονός ότι το ποσοστό του μεταδιδόμενου φωτός μειώνεται με τη γωνία των επαπτόμενων ινών, κάνει μη χρηστικές τις μεγάλες γωνίες αφού για αυτές τις τιμές η μετάδοση ισχύος είναι πολύ περιορισμένη. Από την άλλη, οι πολύ μικρές γωνίες εμφανίζουν σημαντικά σφάλματα, γεγονός το οποίο περιορίζει τη χρησιμότητα και αυτών των τιμών. Οι ιδανικές τιμές της  $\theta$  για τις εφαρμογές μας είναι  $[10^\circ, 20^\circ]$

Η εμφανής εξάρτηση της μετάδοσης φωτός από τα διάφορα υγρά και μια προσεκτική επιλογή της γωνίας που σχηματίζεται από τις δύο ίνες εντός του πεδίου τιμών  $[10^\circ, 20^\circ]$ , θα μπορούσε να βοηθήσει στη δημιουργία μιας συσκευής ικανής να «αισθανθεί» το υγρό μέσο που την περιβάλλει.[37]

### 4.3 Μελέτη Ίνας Επικεκαλυμμένης με Μέταλλο

Εξετάζουμε με αναφορά σε πειραματικά δεδομένα προσομοίωσης τη συμπεριφορά μίας επιμεταλλωμένης ίνας, δηλαδή μιας ίνας χωρίς το προστατευτικό περίβλημα η οποία έχει μία λεπτή επίστρωση μετάλλου πάνω στην επένδυσή της. Παρατηρήθηκε ότι το μέταλλο προκαλεί μερική διαρροή του πεδίου από το εσωτερικό της ίνας προς το περιβάλλον της, γεγονός που της επιτρέπει να λειτουργήσει ως αισθητήρας, αφού το πεδίο που κυματοδηγεί έρχεται σε επαφή με το οπτικό μέσο που την περιβάλλει.[37]

Επιλέγεται ίνα ακτίνας  $a$  η οποία μαζί με το στρώμα του μετάλλου αποκτά ακτίνα  $b$ . Το πάχος μετάλλου θεωρείται πολύ μικρό συγκριτικά με το μήκος κύματος, δηλαδή  $\delta = b - a \ll \lambda$ . Μπορεί να χωριστεί ο χώρος σε τρεις περιοχές με βάση τα διαφορετικά χαρακτηριστικά τους, προκειμένου να διευκολυνθεί η ανάλυσή:

ΠΕΡΙΟΧΗ I: *Εσωτερικό της ίνας* ( $0 \leq \rho \leq a$ )

Ο δείκτης διάθλασης της ίνας είναι πάντα λίγο μεγαλύτερος από αυτόν του αέρα. Αυτή η μικρή διαφορά είναι που εξασφαλίζει λόγω ανάκλασης την κυματοδηγήση.

ΠΕΡΙΟΧΗ II: *Στρώμα μετάλλου* ( $a \leq \rho \leq b$ )

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του μετάλλου είναι ότι έχει δείκτη διάθλασης και διηλεκτρική σταθερά μιγαδικά.

ΠΕΡΙΟΧΗ III: *Περιβάλλον χώρος*  $\rho \geq b$

Θεωρείται αέρας στο χώρο που περιβάλλει την ίνα, οπότε έχουμε το δείκτη διάθλασης, τη διηλεκτρική σταθερά και τη μαγνητική διαπερατότητα του αέρα ( $n_0$ ,  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ ).

#### 4.3.1 Συμπεράσματα – Σχολιασμός

- Όταν δεν υπάρχει το μέταλλο έχουμε κυματοδήγηση εντός της ίνας και λόγω ανάκλασης το κύμα παγιδεύεται μέσα στο υλικό με το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης. Όταν όμως προσθέσουμε το μέταλλο, τα πράγματα περιπλέκονται. Ο δείκτης διάθλασης του μετάλλου είναι μεν μικρότερος από της ίνας αλλά είναι μικρότερος και από αυτόν του αέρα. Έτσι, ενώ το κύμα διαδιδόμενο από την ίνα στο μέταλλο κατά μεγάλο ποσοστό θα ανακλαστεί και θα κυματοδηγηθεί μέσα στην ίνα, αν μέρος αυτού καταφέρει να περάσει από την ίνα στο μέταλλο, θα οδηγηθεί κατευθείαν και θα διαδοθεί στον κενό χώρο μακριά από την ίνα.
- Όμως, στην περίπτωση που επικαλύπτουμε την ίνα με μέταλλο, έχουμε απώλεια κύματος από την ίνα, δηλαδή σημαντικό ποσοστό του κύματος «δραπετεύει» από τα όρια της ίνας και αρχίζει να μεταδίδεται έξω από αυτήν. Έχουμε δηλαδή, διαρροή του πεδίου, ή αλλιώς το εντός της ίνας διαδιδόμενο πεδίο αποσβένει, έχει απώλειες. Αυτό είναι και το σημαντικότερο συμπέρασμά, αφού δείχνει ότι η επικάλυψη μετάλλου καθιστά την ίνα καλό αισθητήρα. Για να λειτουργήσει η ίνα ως αισθητήρας που αντιλαμβάνεται τι υλικό την περιβάλλει, θα πρέπει μέρος του κύματος που αυτή «οδηγεί» να μπορεί να έρθει σε επαφή με το υλικό που την περιβάλλει, δηλαδή να εξέλθει από αυτήν. Αυτόν ακριβώς το σκοπό ευνοεί το μέταλλο, αφού αυξάνει το ποσοστό του πεδίου που εξέρχεται από την ίνα. [37]

#### 4.4 Αισθητήρες οπτικών ινών για την ανίχνευση υδρογόνου

Ένα εργαστήριο Ισπανικού πανεπιστημίου έχει αναπτύξει ένα σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών για την ανίχνευση του υδρογόνου. Οι αισθητήρες αυτοί έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν ειδοποίηση και να προκαλούν συναγερμό ακόμα και στις περιπτώσεις μικρών διαρροών. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι κωδικοποιούν την πληροφορία που συλλέγουν σε μεταβολές μήκους κύματος. Είναι δυνατόν να ρυθμιστούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να σημάνει συναγερμός μόλις η συγκέντρωση του συγκεκριμένου αερίου ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή η οποία μπορεί να επιλεγεί μέσα από μια ευρεία περιοχή συγκεντρώσεων. Ολόκληρη η υλοποίηση βασίζεται σε μια διάταξη οπτικών ινών η οποία παρέχει ουσιαστικά μια «πράσινη ένδειξη» όταν η λειτουργία της υπό παρακολούθηση εγκατάστασης είναι ομαλή και μια «κόκκινη ένδειξη» όταν ανιχνευθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα αερίου στο περιβάλλον. Η όλη λειτουργία εμφανίζει μια δεδομένη υστέρηση οπότε όταν ενεργοποιηθεί το σύστημα ειδοποίησης αυτό συνεχίζει να ειδοποιεί μέχρι η συγκέντρωση του υδρογόνου να βρεθεί και πάλι κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή.

Τα δύο βασικά μέρη του συστήματος είναι η μονάδα ελέγχου και η μονάδα ανίχνευσης οι οποίες είναι δυνατόν να βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους. Αποτελούνται κυρίως από εξαρτήματα μονότροπης οπτικής ίνας τα οποία είναι εμπορικά διαθέσιμα.

Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά για την τροφοδοσία της πηγής φωτός καθώς και τα αντίστοιχα λειτουργίας των φωτοανιχνευτών όπως επίσης και τα ηλεκτρονικά ενίσχυσης και επεξεργασίας του σήματος που δημιουργείται. Όπως ήδη αναφέρθηκε το σύστημα ελέγχου είναι συνδεδεμένο με το σύστημα ανίχνευσης μέσω μιας συμβατικής μονότροπης οπτικής ίνας. Η ανίχνευση γίνεται αποκλειστικά με οπτικά μέσα χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου πρόσθετου ηλεκτρονικού εξαρτήματος. Το σύστημα ανίχνευσης αποτελείται από δίκτυα Bragg και στοιχεία αίσθησης τα οποία είναι ουσιαστικά κωνικές ίνες επικαλυμμένες με παλλάδιο (palladium) σε πάχος 10 nm περίπου. Η βασική ιδιότητα των συγκεκριμένων στοιχείων και αρχή λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος είναι η μεταβολή του βαθμού διαπερατότητάς των στοιχείων αυτών ανάλογα με τη συγκέντρωση του υδρογόνου,



ενώ η απόκρισή τους σε αυτές τις μεταβολές μπορεί να προσαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό κατά το στάδιο κατασκευής τους. Οι δύο καταστάσεις λειτουργίας αντιστοιχούν σε δύο συγκεκριμένα μήκη κύματος  $\lambda_A$  και  $\lambda_B$ , τα οποία ανήκουν στην περιοχή του υπέρυθρου (π.χ. 1540 nm και 1550 nm).

Το σύστημα των αισθητήρων παρουσιάζει δύο σημαντικά χαρακτηριστικά. Πρώτον το κατώφλι ανίχνευσης μπορεί να οριστεί μέσα σε μια ευρεία περιοχή τιμών συγκέντρωσης, κάτω από το όριο εκρηξιμότητας του 4% (σε κανονική ατμόσφαιρα) και δεύτερο η μετατροπή της πληροφορίας που συλλέγεται σε μήκος κύματος καθιστά αδύνατη οποιαδήποτε εσφαλμένη έναρξη συναγερμού. Για το τελευταίο αξίζει να αναφερθεί ότι ακόμη και στη μικρή πιθανότητα διαφοροποίησης της έντασης του σήματος που λαμβάνεται λόγω ενδεχομένως εξωτερικών παρεμβολών σε καμία περίπτωση δεν είναι δυνατή η πρόκληση οποιουδήποτε είδους σύγχυσης στο χρήστη από την ένδειξη που λαμβάνει.

Σε αντίθεση με τους αισθητήρες υδρογόνου που είναι εμπορικά διαθέσιμοι σήμερα το συγκεκριμένο σύστημα παρουσιάζει το σαφές πλεονέκτημα ότι δεν βασίζεται σε μετρήσεις ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο είναι πιο σωστό να αποφεύγεται σε οποιοδήποτε περιβάλλον υπάρχει κίνδυνος διαρροής υδρογόνου. Επίσης η χρονική απόκριση του συστήματος είναι σημαντικά πιο γρήγορη από κάθε άλλο διαθέσιμο σύστημα ενώ εξίσου γρήγορη είναι και η επαναφορά του στην κανονική κατάσταση μετά τη λήξη ενός συναγερμού.

Με δεδομένη τη δυνατότητα για κωδικοποίηση του μήκους κύματος και τον τρόπο που υλοποιείται η όλη διάταξη υπάρχει δυνατότητα πολυπλεξίας διαφορετικών αισθητήρων όπως για παράδειγμα μέσω της ενσωμάτωσής πολλών σε μια μοναδική εγκατάσταση οπτικής ίνας. Επίσης η περίπτωση της ανίχνευσης από απόσταση ουσιαστικά καθορίζεται από τη δυνατότητα τοποθέτησης της πηγής φωτός που ακτινοβολεί τους αισθητήρες σε απόσταση από το σύστημα ανίχνευσης του φωτός που επιστρέφεται από τους αισθητήρες μέσω μιας συμβατικής σύνδεσης οπτικής ίνας. Η απόσταση αυτή μπορεί να είναι ακόμη και εκατοντάδες μέτρα.

Ολόκληρη η διάταξη έχει αναπτυχθεί και δοκιμασθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα με επιτυχία σε εργαστηριακό επίπεδο χωρίς να εμφανίσει καμία ένδειξη γήρανσης ή

δυσλειτουργίας. Στην παρούσα φάση υπάρχει δυνατότητα επίδειξης της λειτουργίας της σε κάθε ενδιαφερόμενο. Η ερευνητική ομάδα που την έχει αναπτύξει έχει ήδη υποβάλλει αίτηση για κατοχύρωσή της με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας.

Πιθανά μέρη εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι κάθε εγκατάσταση αποθήκευσης ή διανομής υδρογόνου οποιουδήποτε μεγέθους, καθώς πλέον στις ημέρες μας το υδρογόνο έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται ως καύσιμο ολοένα και περισσότερο. Άλλες πιθανές περιοχές εφαρμογής είναι η παρακολούθηση χώρων μακροχρόνιας αποθήκευσης ραδιενεργών υλικών ή αποβλήτων καθώς και η πετροχημική βιομηχανία. [38]

#### **4.5 Τεχνολογία Οπτικών Αισθητήρων FBG**

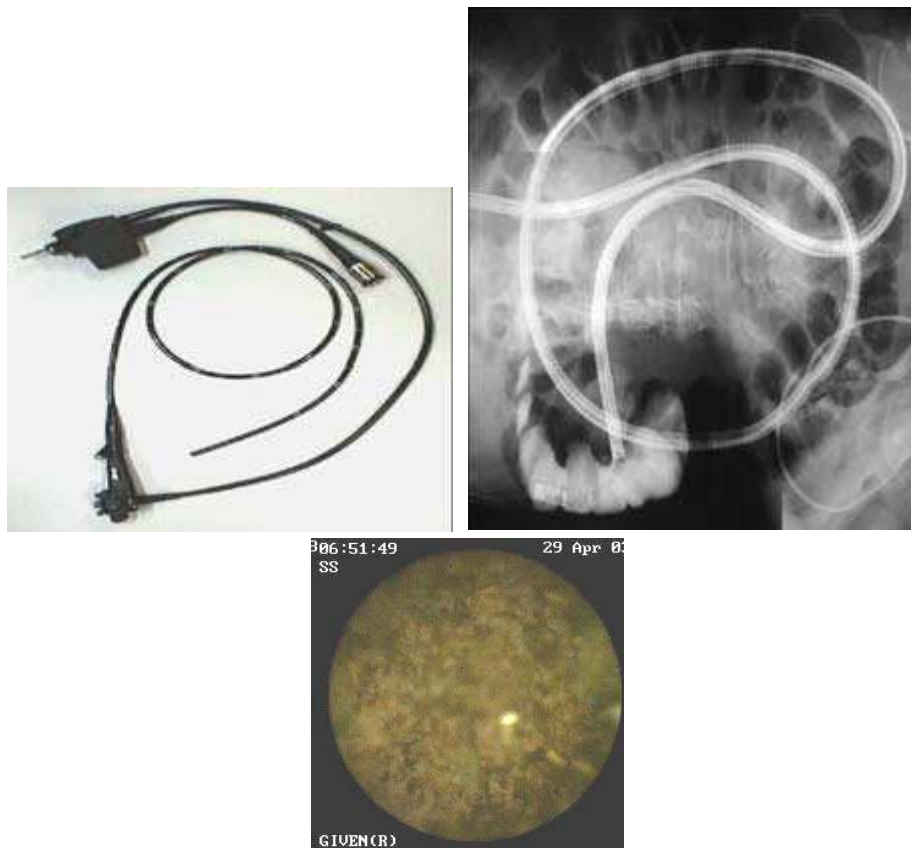
Προκειμένου να παρακολουθηθεί η δομική ακεραιότητα των κατασκευών χρησιμοποιούνται αισθητήρες οπτικών ινών και συγκεκριμένα οπτικοί FBG (Fibres Bragg Grating) αισθητήρες, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, επιτάχυνσης, κλπ. Το συγκριτικό τους πλεονέκτημα είναι ότι διαθέτουν δυνατότητα μεταξύ τους διασύνδεσης και πολυπλεξίας δημιουργώντας οπτικά δίκτυα και καλύπτοντας μεγάλες και δυσπρόσιτες επιφάνειες. Τα δίκτυα των αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να είναι επικολλημένοι ή και εμφυτευμένοι σε δομές διαφόρων ειδών, χρησιμοποιούνται για τη δυναμική και αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων και τη δημιουργία συστημάτων εποπτείας, ελέγχου και παρακολούθησης.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα των Οπτικών Αισθητήρων αναφέρονται επιγραμματικά ακολούθως: μικρό μέγεθος και βάρος, μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων, σε σημεία και διατάξεις αδύνατα να μετρηθούν με τους συμβατικούς αισθητήρες, μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων, δυνατότητα επανάληψης μέτρησης, δυνατότητα απομακρυσμένης επιτήρησης, αντοχή στη διάβρωση, μείωση κόστους συντήρησης, μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της κατασκευής.

#### **4.6 Οπτικές ίνες και ενδοσκόπιο**

Ο καρκίνος του παχέος εντέρου είναι η δεύτερη θανατηφόρα μορφή καρκίνου στις ΗΠΑ, μετά τον καρκίνο των πνευμόνων. Πρώτο μέτρο πρόληψης είναι βέβαια η σωστή διατροφή με έμφαση στην πρόσληψη φυτικών ινών και τροφής με λίγα λιπαρά. Δεύτερο μέτρο είναι η τακτή διερεύνηση-ανίχνευση παρουσίας προκαρκινικών όγκων. Οι όγκοι αυτοί είναι πολύποδες και αδενώματα και συνιστάται η αφαίρεσή τους πριν εξελιχθούν σε κακοήθειες.

Τα ενδοσκόπια κατασκευάστηκαν για να βοηθήσουν την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων. Είναι λεπτά και εύκαμπτα για να μπορούν να προωθούνται σε στενές διόδους. Έχουν ενσωματωμένες οπτικές ίνες και video camera για να φωτίζεται και να εμφανίζεται σε εξωτερική οθόνη η περιοχή από όπου περνούν. Είναι επίσης εξοπλισμένα με μικροσκοπικά χειρουργικά εργαλεία. Με τα ενδοσκόπια ο γιατρός μπορεί να δει το εσωτερικό οργάνων, να διαγνώσει τυχόν ύπαρξη επικίνδυνων μορφωμάτων και να προβεί σε επέμβαση αφαίρεσής τους επί τόπου. [40-47]



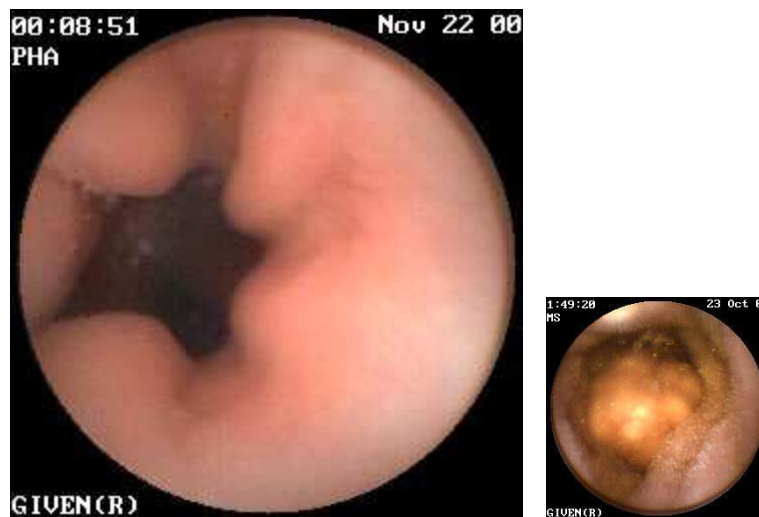
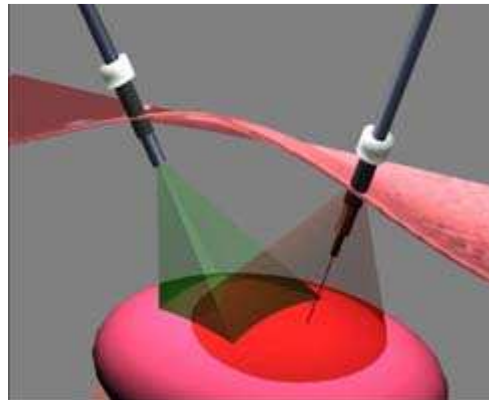
**Σχήμα 4.7**

Πολλές ειδικότητες ιατρικής χρησιμοποιούν ενδοσκόπια. Για το παχύ έντερο υπάρχει το σιγμοειδοσκόπιο και το ορθοσκόπιο, για την κοιλιακή χώρα υπάρχει το λαπαροσκόπιο ή περιτοναιοσκόπιο με το οποίο γίνονται εξετάσεις γυναικολογικής φύσης και εξετάσεις σχετικές με την ουροδόχο κύστη, όπως και επεμβάσεις κήλης (κοιλιοκήλη, ομφαλοκήλη, κυστεοκήλη) και στομάχου. Τέτοιου είδους επεμβάσεις παρουσιάζουν παρόμοιο ποσοστό επιτυχίας με τις κλασικές της «ανοιχτής» χειρουργικής με σημαντικά χαμηλότερο ποσοστό επιπλοκών.

Τα αρθροσκόπια έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών σε επεμβάσεις στο γόνατο, τον αστράγαλο (ποδοκνημική άρθρωση), τον ώμο και γενικότερα σε προβληματικές αρθρώσεις.

Η επέμβαση με τη βοήθεια ενδοσκοπίου συνεπάγεται συντομότερη παραμονή του ασθενούς στην κλινική και ταχύτερη ανάρρωση. Ουσιαστικά δεν δημιουργείται άνοιγμα στο δέρμα κατά την επέμβαση, παρά μόνο οπές, που επουλώνονται εύκολα.

Η οπτική, η επιστήμη που σχετίζεται με το ορατό φως, είναι το θεωρητικό εργαλείο για τη λειτουργία του ενδοσκοπίου.



Σχήμα 4.8

#### 4.6.1 Εφαρμογές του οπτικού αγωγού στην ιατρική

Ο ίκτερος προκαλείται από πλεόνασμα χολερυθρίνης (απόβλητο της αποδόμησης ερυθρών αιμοσφαιρίων) στο αίμα. Κατά τη θεραπεία του ίκτερου, τα νεογνά τυλίγονται με ειδικό φωτεινό κάλυμμα-ύφασμα πλεγμένο με οπτικές ίνες.

Το φως δρα ως καταλύτης της χημικής διάσπασης της χολερυθρίνης, ώστε να αποβληθεί ευκολότερα από τον οργανισμό. Όμως η κλασική μέθοδος απαιτεί μακρόχρονη έκθεση του γυμνού νεογέννητου σε φως μεγάλης έντασης στις θερμοκοιτίδες.

Το ύφασμα των οπτικών ινών επιτρέπει το "τυλιγμένο", με έντονο φως, νεογέννητο να φύγει για το σπίτι και να εξακολουθεί να θεραπεύεται, ενώ παράλληλα οι γονείς του το φροντίζουν.

Όταν ο οπτικός αγωγός μεταφέρει μόνο φως, οι οπτικές του ίνες δεν χρειάζεται να διατηρούν αυστηρή διάταξη και παραλληλία. Όταν ο οπτικός αγωγός μεταφέρει εικόνες, οι οπτικές του ίνες πρέπει να διατηρούν τη μεταξύ τους διάταξη, όμως είναι δυνατόν, ενώ ξεκινά ως χοντρό «καλώδιο» να διαχωρίζεται στη συνέχεια σε μικρότερα (ώστε να αυξηθεί η ευλυγισία του κατά μήκος της διαδρομής) και να επανενώνεται στο τέλος για την αναπαραγωγή της εικόνας.

#### **4.6.2 Ενδοσκόπιο**

Με το ενδοσκόπιο ο γιατρός μπορεί να δει (με δυνατότητα και να επέμβει) το εσωτερικό κοιλότητων του σώματος. Το βασικό του εξάρτημα είναι ένας οπτικός αγωγός. Επειδή οι κοιλότητες του σώματος είναι σκοτεινές, απαιτείται κατ' αρχήν να οδηγηθεί φως, μέσω των οπτικών ινών, στο εσωτερικό τους.

Συνήθως χρησιμοποιείται λυχνία αερίου ξένου που εκπέμπει φως μεγάλης έντασης. Ο «μισός» οπτικός αγωγός καταλαμβάνεται από τις οπτικές ίνες που οδηγούν το φως μέσα στην κοιλότητα και ο υπόλοιπος από τις οπτικές ίνες που μεταφέρουν την εικόνα του εσωτερικού της κοιλότητας στην ειδική οθόνη της αίθουσας της επέμβασης.

Όταν ο «δρόμος» που θα διανύσει το ενδοσκόπιο είναι σχετικά σύντομος και ευθύς (όπως με το αρθροσκόπιο και το λαπαροσκόπιο) επιλέγεται τύπος με φακούς που παρεμβάλλονται στην πορεία εξόδου της εικόνας, για να την ενισχύσουν, όπως στο τηλεσκόπιο.

Όταν αντίθετα, ο «δρόμος» του ενδοσκοπίου είναι ελικοειδής (όπως του κολονοσκοπίου), υπάρχουν δύο επιλογές για τη μεταφορά της εικόνας. Όταν ο οπτικός αγωγός έχει μεγάλο μήκος συνήθως έχει προσαρμοσμένη στο άκρο του μία μικροσκοπική κάμερα λήψης, εμβαδού λίγων τετραγωνικών χιλιοστομέτρων (άμεση

ή τοπική λήψη εικόνας). Το ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι παρεμφερές με αυτό των κλασικών συσκευών τηλεοπτικής λήψης (video camera) του εμπορίου.

Πρόκειται για συσκευή εξοπλισμένη με τετράγωνο μικρό πλέγμα με χιλιάδες ηλεκτρονικούς αισθητήρες φωτός (συσκευή CCD – charge coupled device) που ανιχνεύουν και αποθηκεύουν την ένταση του φωτός κάθε σημείου του φωτεινού αντικειμένου που «βλέπουν». Σε αυτήν την περίπτωση, οι οπτικές ίνες για τη μεταφορά στην έξοδο της εσωτερικής εικόνας, έχουν αντικατασταθεί από ηλεκτρικά καλώδια. Με ηλεκτρικό σήμα η εικόνα παρουσιάζεται σε δέκτη τηλεόρασης ή/και αποθηκεύεται σε μαγνητο-οπτική συσκευή εγγραφής (video recorder).

Η δεύτερη επιλογή είναι ο κλασικός «διπλός» οπτικός αγωγός, δηλαδή ένα μέρος των οπτικών ινών είναι επιφορτισμένο να φωτίσει την εσωτερική κοιλότητα και οι υπόλοιπες ίνες, αυστηρά διατεταγμένες, «οδηγούν» την εικόνα έξω από το σώμα. Στις απλές ιατρικές διαδικασίες, στην έξοδο του οπτικού αγωγού προσαρμόζεται προσοφθάλμιος φακός (όπως στο μικροσκόπιο), όπου ο εξεταστής παρατηρεί την εικόνα.

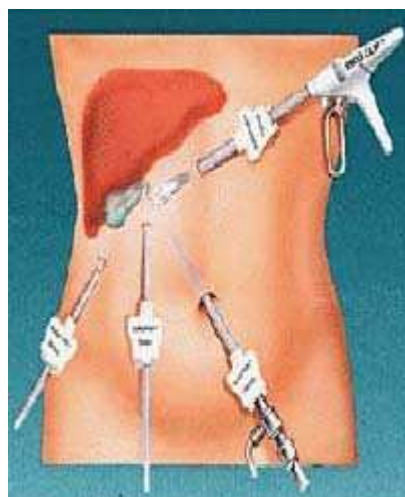
Σε διαδικασίες πιο πολύπλοκες ή σε επεμβάσεις, στην έξοδο του οπτικού αγωγού προσαρμόζεται CCD camera και η εικόνα μεταφέρεται στην οθόνη τηλεοπτικού δέκτη, τον οποίο μπορεί να παρατηρεί όλη η ιατρική ομάδα και σε πραγματικό χρόνο (on line) να αποφασίζουν τα επόμενα βήματα της επέμβασης.

Το μέρος του ενδοσκοπίου που περνά μέσα στο ανθρώπινο σώμα (οισοφάγος, έντερο, κοιλιά) έχει διάμετρο 0,3 ως 15,0 mm περίπου, αναλόγως του τύπου του. Το μήκος του μπορεί να φτάνει το 1,5 μέτρο. Τα υλικά του είναι κατάλληλα για συνεχείς αποστειρώσεις και τα πρόσθετα – βοηθητικά εξαρτήματα – εργαλεία είναι συνήθως μίας χρήσης, για λόγους υγιεινής.

Στα ενδοσκόπια που η εικόνα μεταφέρεται με οπτικές ίνες, η διάμετρος και το πλήθος των ινών θέτει το όριο στη λεπτομέρεια της εικόνας που είναι δυνατόν να γίνει διακριτή, δηλαδή στη διακριτική ικανότητα της συσκευής. Όμως σύγχρονα ενδοσκόπια περιέχουν πλέον δεκάδες χιλιάδες οπτικές ίνες διαμέτρου μικρομέτρων (εκατοστά της ανθρώπινης τρίχας), δίνοντας διακριτική ικανότητα της τάξης δέκατων

του χλυστού. Πιο λεπτές ίνες δεν θα βοηθούσαν, επειδή υπάρχει περιορισμός και από το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου φωτός.

Το ενδοσκόπιο είναι όμως και χειρουργικό εργαλείο, επομένως εκτός από την οπτική διάταξη είναι εξοπλισμένο και με μηχανικά εξαρτήματα. Π.χ. επειδή τα όργανα του ανθρώπινου σώματος στέκονται, από τη φύση τους, συνωστισμένα, χωρίς ελεύθερο πεδίο γύρω τους για να δράσει ο χειρουργός, υπάρχει ειδικό σωληνάκι εμφύσησης αδρανούς CO<sub>2</sub>, που φουσκώνει την περιοχή και διαχωρίζονται οι επιφάνειες των γειτονικών οργάνων μεταξύ τους. Άλλο σωληνάκι χρησιμοποιείται για την έγχυση ύδατος για ξέπλυμα περιοχής, όπως επίσης για την αναρρόφηση περίσσειας υγρών και απόβλητων.



**Σχήμα 4.9**

Το ενδοσκόπιο είναι δυνατόν να εμπεριέχει λεπτή χειρουργική λαβίδα για εξέταση-διερεύνηση του είδους των ιστών που φωτίζονται, όπως και μικροσκοπικό νυστέρι για αφαίρεση δειγμάτων ιστών που πρέπει να εξεταστούν στο εργαστήριο. Μικρός βρόχος μπορεί να τυλιχθεί στο «λαιμό» ογκιδίου που κρίνεται σκόπιμο να αφαιρεθεί, ενώ ο βρόχος διαπερνάται με κατάλληλο ηλεκτρικό ρεύμα που τον θερμαίνει για τον ταυτόχρονο καυτηριασμό του πληγωμένου ιστού (βοηθά στο σφράγισμα των αιμοφόρων αγγείων και τον περιορισμό της τοπικής αιμορραγίας).



Το ενδοσκόπιο μπορεί να εμπεριέχει και ειδικό μηχανισμό εκτόξευσης μικροσκοπικών συρραπτικών ελασμάτων ή άλλης διάταξης για συρραφή χειρουργικών τομών.

Στην κεφαλή του ενδοσκοπίου είναι εγκατεστημένη διάταξη πιλοτηρίου, από όπου ο χειριστής μπορεί, αφενός να γυρνά το άκρο και να φωτίζει όλη η γύρω περιοχή, αφετέρου να επεμβαίνει χειρουργικά με όλους τους τρόπους που αναφέρθηκαν, κατά περίπτωση.

Στη λαπαροσκοπική χειρουργική η επέμβαση γίνεται μέσω γειτονικών οπών στην κοιλιακή χώρα. Σε απλή επέμβαση διανοίγονται τρεις ή τέσσερις τομές του ενός εκατοστού, από όπου εισέρχονται αντίστοιχα τρία ή τέσσερα εργαλεία, ένα εκ των οποίων είναι το (απλό και κοντό) ενδοσκόπιο. Τα υπόλοιπα εργαλεία είναι καθαρά χειρουργικά.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της λαπαροσκοπικής έναντι της ανοιχτής χειρουργικής είναι οι σημαντικά μικρότερες τομές, για τις οποίες πολλές φορές είναι αρκετή μόνο τοπική αναισθησία. [47]



**Σχήμα 4.10**

#### **4.7 Βιοαισθητήρες και οπτικές ίνες**

Το σημαντικότερο τμήμα των ευφών φορετών συστημάτων υγείας είναι οι βιο-αισθητήρες οι οποίοι βρίσκονται ενσωματωμένοι σε αυτά. Η πρόοδος στις επιστήμες και τις τεχνολογίες πχ. μικρο- και νανοτεχνολογίες έχει δώσει νέες δυνατότητες στην κατασκευή κι εφαρμογή βιοαισθητήρων που είναι αόρατοι και πολύ αποτελεσματικοί.[48]

Πριν όμως αναφερθούμε λεπτομερώς στους βιοαισθητήρες και περιγράψουμε ορισμένους από αυτούς οφείλουμε να τονίσουμε πως οι βιοαισθητήρες χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν βιολογικά δεδομένα. Αυτό σημαίνει πως συναντούμε αρκετές δυσκολίες γιατί δεν αναφερόμαστε σε γνωστά κι εύκολα μετρήσιμα μεγέθη. Τα προβλήματα που συναντούμε κατά τις μετρήσεις στη Βιοϊατρική μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:[50]

- I. Οι μετρήσεις γίνονται σε τρισδιάστατο χώρο αφού τα μετρούμενα συστήματα του οργανισμού είναι τρισδιάστατα.
- II. Πολλές παράμετροι μεταβάλλονται συγχρόνως με αποτέλεσμα την παραγωγή πολλών σημάτων.
- III. Έχουμε υψηλό θόρυβο θερμικό κι εξωτερικά επιβαλλόμενο.
- IV. Αργά μεταβαλλόμενα σήματα.
- V. Τίθεται σοβαρό θέμα ασφαλείας για τον ασθενή και της βιο-συμβατότητας των αισθητήρων.
- VI. Κάθε άτομο παρουσιάζει τις δικές του ιδιαιτερότητες.
- VII. Είναι άγνωστη η ακριβής φυσική λειτουργία και οι μηχανισμοί του ανθρώπινου σώματος καθώς δεν υπάρχουν απλοί νόμοι σχέσεις όπως πχ. στη Φυσική για να περιγραφούν.

Οφείλουμε δε να τονίσουμε έχοντας λάβει υπόψη τους προαναφερθέντες περιορισμούς των βιολογικών μετρήσεων ότι, ένα ικανοποιητικό σύστημα βιοαισθητήρα θα πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις: Θα πρέπει να είναι επιλεκτικό, δηλαδή να μετρώνται μόνο οι επιθυμητές παράμετροι χωρίς η μέτρησή τους να επηρεάζεται από άλλες.

Η ευαισθησία τέτοιων συσκευών είναι πολύ σημαντική ούτως ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να μετρώνται μικρές αλλαγές μιας δεδομένης παραμέτρου. Σημειώνουμε δε ότι, τα περισσότερα μετρούμενα βιοϊατρικά μεγέθη λαμβάνουν σχετικά πολύ μικρές τιμές. Θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβές και η μέτρησή του να είναι σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τέλος το κόστος του πρέπει να είναι χαμηλό, έτσι ώστε να είναι αναλώσιμοι.[50]

Η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα γενικά είναι η ακόλουθη. Ο αισθητήρας λαμβάνει ένα μικρό ποσό ενέργειας από το μετρούμενο σύστημα και το μετατρέπει σε κάποιο άλλο είδος ενέργειας που χρησιμοποιείται για ένδειξη του μετρούμενου μεγέθους.[50] Η επιτυχία ενός αισθητήρα δεν εξαρτάται από τα γενικά χαρακτηριστικά του, αλλά κατά πόσο επηρεάζει το μετρούμενο σύστημα

Χρήσιμοι βιοαισθητήρες είναι οι αισθητήρες μηχανικών μεγεθών ( όπως μήκος, μετατόπιση, επιφάνεια, όγκος, δύναμη, πίεση, υπέρηχοι κ.α. ), οι αισθητήρες ηλεκτρικών μεγεθών ( όπως διαφορά δυναμικού, ένταση ρεύματος, συχνότητα, αντιστάσεις επαγωγική ή χωρητική ή ωμική ), οι οπτικοί αισθητήρες ( οπτικά μεγέθη: μήκος κύματος, συντελεστής σκέδασης, απορρόφησης κ.α. ) και οι αισθητήρες θερμοκρασίας.[50]

Μια διάκριση ακόμη των αισθητήρων είναι σε επεμβατικούς και μη επεμβατικούς (αναίμακτους) αισθητήρες. Οι πλέον κατάλληλοι αισθητήρες για τα φορετά συστήματα υγείας είναι οι μη επεμβατικοί ή αναίμακτες μέτρησης, διότι παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης των φυσιολογικών λειτουργιών αλλά και των καθημερινών δραστηριοτήτων και συμπεριφοράς, προσφέροντας ακίνδυνες μετρήσεις, άνεση και προστασία από μολύνσεις. Οι αναίμακτοι φορετοί αισθητήρες μπορούν να εφαρμοστούν στο σώμα ή κοντά σ' αυτό και να μετρήσουν έναν εντυπωσιακό αριθμό παραμέτρων.[50]

Το φυσικό αίτιο επιδρά στον αισθητήρα ο οποίος αλλάζει κάποια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (μεταβολή ηλεκτρικού σήματος). Το σήμα επεξεργάζεται αναλογικά δηλαδή ενισχύεται, φιλτράρεται και κατόπιν μετατρέπεται σε ψηφιακό με τη χρήση του κατάλληλου μετατροπέα (Analog to Digital Converter). Τέλος, το υπολογιστικό σύστημα αναλαμβάνει την επεξεργασία, την αποθήκευση και την ένδειξη του μέτρου του φυσικού αιτίου.

Τα βιοοπτικά σήματα παράγονται από τις οπτικές ιδιότητες των βιολογικών συστημάτων. Τα βιοοπτικά σήματα μπορούν να εμφανιστούν φυσικά ή, σε μερικές περιπτώσεις, μπορούν να προκληθούν χρησιμοποιώντας μια βιοϊατρική τεχνική. Παραδείγματος χάριν, οι πληροφορίες για την υγεία ενός εμβρύου μπορούν να ληφθούν με τη μέτρηση των χαρακτηριστικών φθορισμού του αμνιακού υγρού. Η εκτίμηση της καρδιακής παροχής μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου διαλύσεων χρωστικών ουσιών που περιλαμβάνει τον έλεγχο της συγκέντρωσης μιας

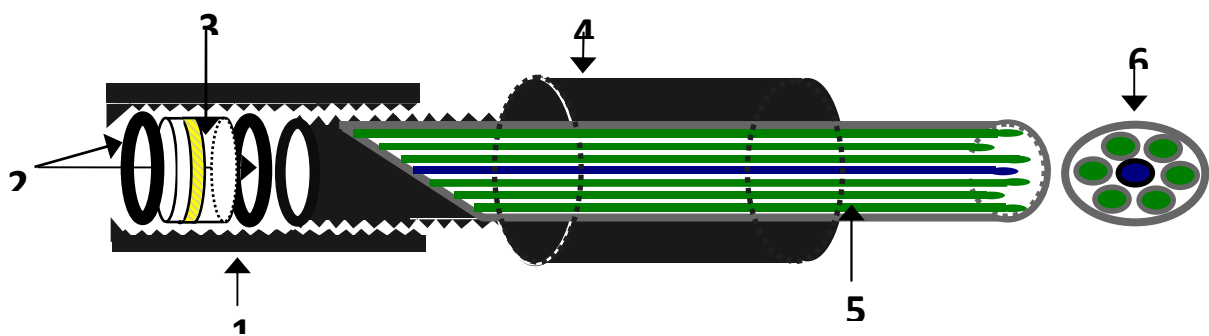
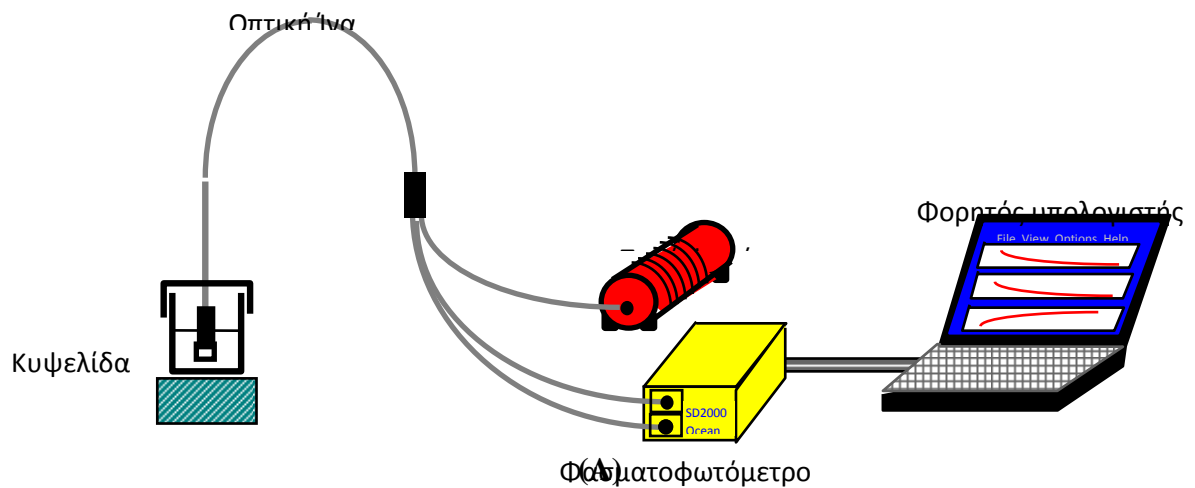
χρωστικής ουσίας όπως επανακυκλοφορεί μέσω της κυκλοφορίας του αίματος. [48-57]

#### **4.7.1 Ενζυμικός βιοαισθητήρας (enzyme biosensor)**

Ο ενζυμικός βιοαισθητήρας (*enzyme biosensor*) είναι ένα ηλεκτρονικό μικροσύστημα προσδιορισμού ενώσεων περιβαλλοντικού, βιοχημικού, ιατρικού, βιομηχανικού κ.λπ. ενδιαφέροντος, η λειτουργία του οποίου βασίζεται σε ακινητοποιημένα ένζυμα. Τυπικά, αποτελείται από ένα βιολογικό τμήμα που ευρίσκεται σε επαφή με έναν χημικό μεταλλάκτη, και ένα ηλεκτρονικό τμήμα που περιλαμβάνει την ανιχνευτική διάταξη και την μονάδα επεξεργασίας. Στο βιολογικό τμήμα εντοπίζεται το ακινητοποιημένο ένζυμο και εκεί πραγματοποιείται η χημική αντίδραση. Συνέπεια της αντίδρασης είναι η μεταβολή κάποιας χημικής ή φυσικής παραμέτρου του συστήματος. Η μεταβολή αυτή μετατρέπεται από τον μεταλλάκτη σε μετρήσιμο σήμα, το οποίο καταλήγει μέσω του ανιχνευτή στην μονάδα επεξεργασίας. Οι βιοαισθητήρες χαρακτηρίζονται από αξιοπιστία και εκλεκτικότητα, προσφέρουν την δυνατότητα επανειλημμένης και μακροχρόνιας χρησιμοποίησής τους, ακόμη και με πολύπλοκα μη προεπεξεργασμένα δείγματα, ενώ με την συνεχή εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής διαμορφώνονται ως φορητές εύχρηστες συσκευές.

Οι ενζυμικοί βιοαισθητήρες, ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους, διακρίνονται σε οπτικούς, ηλεκτροχημικούς, πιεζοηλεκτρικούς, ακουστικούς και θερμικούς. Οι οπτικοί βιοαισθητήρες βασίζονται στην τεχνολογία *οπτικών ινών (optical fibres)*. Στην περίπτωση ενός οπτικού βιοαισθητήρα, ως αποτέλεσμα της ενζυμικής αντίδρασης μεταβάλλεται συγκεκριμένη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, συνήθως η ορατή περιοχή, οπότε από αυτή την μεταβολή είναι εφικτή η παρακολούθηση της ενζυμικής αντίδρασης χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές (οπτική απορρόφηση, φθορισμός, χημειο- και βιο-φωταύγεια). Η εν λόγω οπτική μεταβολή συσχετίζεται ποσοτικά με την παρουσία της μετρούμενης ένωσης στο δείγμα η οποία εννοείται ότι επηρεάζει την ενζυμική αντίδραση. Οι οπτικές ίνες αποτελούν κυματοδηγούς (*waveguides*) και μεταφέρουν το οπτικό σήμα σε μεγάλες αποστάσεις, όπως, σε αντιστοιχία, τα μεταλλικά καλώδια μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Συνεπώς οποιαδήποτε οπτική μεταβολή η οποία οφείλεται στην δράση του

ενζύμου που βρίσκεται ακινητοποιημένο στο άκρο της οπτικής ίνας, είναι δυνατόν να μεταφερθεί στον ανιχνευτή του βιοαισθητήρα και το φαινόμενο να εκτιμηθεί ποσοτικά. Σε άλλη τεχνική εφαρμογή των οπτικών ινών, το ένζυμο ή άλλο κατάλληλο μόριο είναι δυνατόν να ακινητοποιηθεί όχι στο άκρο, αλλά στην εξωτερική επιφάνεια της ίνας και να 'φωτίζεται' από το λεγόμενο διαφεύγον κύμα (evanescent wave). Αυτό αποτελεί μια λεπτότατη στιβάδα φωτός που εξέρχεται από την ίνα και την περιβάλλει. Συνεπώς, οι τυχόν οπτικές μεταβολές που πραγματοποιούνται μέσα στα όρια του διαφεύγοντος κύματος, επηρεάζουν την ένταση του κυρίως κύματος που διατρέχει εσωτερικά την ίνα, φαινόμενο το οποίο και εκτιμάται ποσοτικά. [58]



(B)

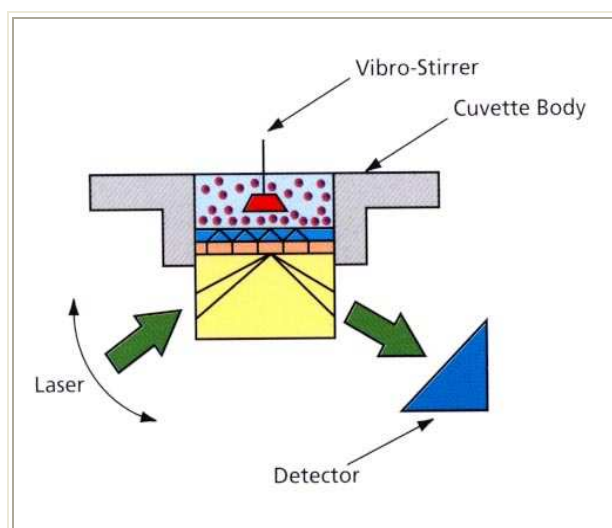
#### Σχήμα 4.11

(Α) Σχηματική αναπαράσταση βιοαισθητήρα. (Β) Η οπτική ίνα με το πλαστικό περίβλημα και το βιοενεργό άκρο. (1) Αφαιρούμενο τμήμα περιβλήματος, (2) Στεγανοποιητικοί δακτύλιοι, (3) Βιοενεργό σάντουιτς, (4) Κυρίως σώμα περιβλήματος και (5) Τομή οπτικής ίνας, στην οποία φαίνονται τα επιμέρους στοιχεία φωτισμού (περιμετρικά) και “ανάγνωσης” (κέντρο).

Έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί με επιτυχία ένας νέος φορητός ενζυμικός βιοαισθητήρας οπτικών ινών για την ανίχνευση και τον προσδιορισμό σε φυσικά ύδατα των οργανοφωσφορικών και καρβαμιδικών αγροχημικών dichlorvos και carbaryl, αντιστοίχως. Ο βιοαισθητήρας αυτός χρησιμοποιεί σύστημα που

αποτελείται από ακινητοποιημένη χολινεστεράση και δείκτη ιώδες της βρωμοκρεσόλης. Επίσης, έχει αναπτυχθεί και δοκιμαστεί με επιτυχία μια νέα οπτική μέθοδος προσδιορισμού της λεκιθίνης (φωσφατιδυλοχολίνης) σε αίμα και εμπορικά δισκία. Η μέθοδος χρησιμοποιεί συν-ακινητοποιημένα δυο ένζυμα, φωσφολιπάση D και οξειδάση της χολίνης, μαζί με μια χρωστική-δείκτη.

Υπό ανάπτυξη και κατασκευή βρίσκεται ένας νέος φορητός ενζυμικός βιοαισθητήρας οπτικών ινών για τον προσδιορισμό των τριαζινικών αγροχημικών atrazine και alachlor. Ο βιοαισθητήρας αυτός βασίζεται σε γενετικά ανασυνδυασμένη και ακινητοποιημένη μορφή του ενζύμου S-μεταφοράση του γλουταθείου (GST). Το εν λόγω ένζυμο προέκυψε από εφαρμογή ενζυμικής μηχανικής.

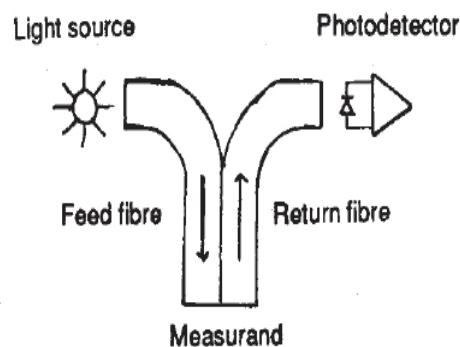


Σχήμα 4.12

#### 4.8 Χρήση οπτικών αισθητήρων στην Χημεία - Βιοχημεία

Οι οπτικοί αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν το pH μέσω βιολογικών και χημικών διαδικασιών. Για παράδειγμα στο πανεπιστήμιο του Manchester σχεδιάστηκε αισθητήρας ο οποίος μετράει το pH και άλλες χημικές ουσίες σε φαγητά και υλικά τα οποία καταναλώνουμε, διασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια τους. Η συσκευή ονομάστηκε OPTODE .





**Σχήμα 4.11:** OPTODE με χρήση πηγής φωτός και οπτικών ινών.

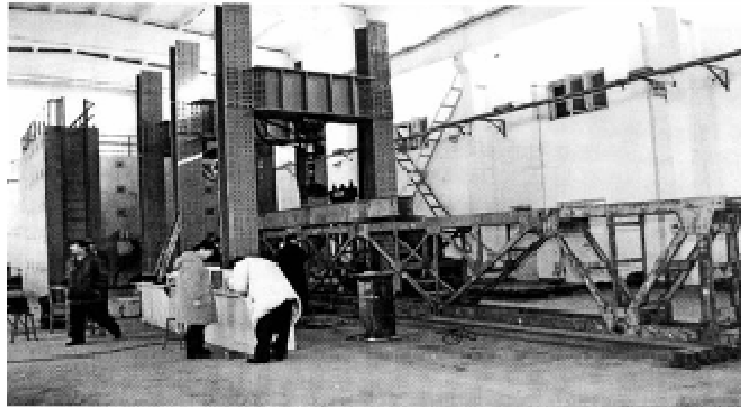
Η συσκευή χρησιμοποιεί οπτικό αισθητήρα που μετρώντας την απορρόφηση, την ανάκλαση ή την σκέδαση του φωτός που συμβαίνει στην έξοδο της ίνας, καταφέρνει να καταγράψει τις χημικές αλλαγές στο εξεταζόμενο υλικό. Με αυτό τον τρόπο βγάζει αποτελέσματα που μπορούν να εκτιμηθούν για την ασφάλεια π.χ της χρήσης του υλικού σε φαγητά .

#### 4.9 Χρήσεις οπτικών αισθητήρων στις κατασκευές

Στις κατασκευές χρησιμοποιούνται οπτικοί αισθητήρες για την μέτρηση κυρίως της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των μηχανικών τάσεων για την συντήρηση και την καλή διατήρηση της κατασκευής. Ενδεικτικά αξίζει να αναφερθούν δύο παραδείγματα, ένα για χρήση σε κατασκευή από ασφάλι και ένα για γέφυρα από τσιμέντο .

Στο πρώτο παράδειγμα, χρησιμοποιούνται αισθητήρες οι οποίοι βασίζονται στο σύστημα Structural Health Monitoring system (Σύστημα παρακολούθησης της υγείας των κτιρίων). Το σύστημα αυτό ξεκίνησε στο πανεπιστήμιο της Manitoba στον Καναδά [61] και αποτελείται από αισθητήρες οι οποίοι ελέγχουν τις πιθανές παραμορφώσεις κτιρίων (Fiber Optical Deformation Sensors FOS). Παράλληλα, με την χρήση πολυπλεξίας των σημάτων που παραλαμβάνονται από τους αισθητήρες και την χρήση οπτικών ινών, τα σήματα μεταφέρονται για κεντρική επεξεργασία. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει άμεση παρατήρηση σε πραγματικό χρόνο και για τις πιθανές ζημιές του κτιρίου και για τις πιθανές πιέσεις που δέχεται από αστάθμητους

παράγοντες και κάνει ελέγχους όπως η θερμοκρασία και η υγρασία της κατασκευής και του περιβάλλοντος χώρου.



**Σχήμα 4.13.** Φωτογραφία από ατσάλινες κατασκευές με αισθητήρες οπτικών ινών

Στο δεύτερο παράδειγμα, οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν την πίεση που δημιουργείται στην γέφυρα έτσι ώστε να ελέγχονται πιθανές παραμορφώσεις της γέφυρας (FOS). Επίσης για την μέτρηση της θερμοκρασίας, 6 έχουν χρησιμοποιηθεί ζευγάρια αισθητήρων (Resistance Temperature Detectors RTD), με το κάθε ζευγάρι αποτελείται από 2 αισθητήρες οπτικών ινών ένα στο κάτω μέρος της γέφυρας και ένα στο πάνω. Οπότε μετριέται και η κάθετη και η οριζόντια θερμοκρασία και καταγράφεται. Ένας επιπλέον αισθητήρας έχει εγκατασταθεί στην γέφυρα, για να μετράει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου [62].



**Σχήμα 4.14:** Φωτογραφία από την κατασκευή με αισθητήρες οπτικών ινών της γέφυρας Hongcaofang στο Chongqing της Κίνας

#### 4.10 Ασφάλεια στα Φωτοβολταϊκά Πάρκα

Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας και πιο συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Ως εκ τούτου είναι επιτακτική η ανάγκη προστασίας τους ώστε να αποτραπούν τυχόν περιστατικά κλοπής ή καταστροφής του εξοπλισμού αλλά και των ίδιων των εγκαταστάσεων.



Σχήμα 4.15

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορείτε να προστατεύσετε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. [51]

Τρόποι προστασίας φωτοβολταϊκών συστημάτων

- Οπτική Ίνα
- Αισθητήρες αδράνειας /κραδασμών
- Κάμερες
- Δέσμες

Σύνδεση με Κέντρο Λήψεως Σημάτων

Οπτική Ίνα. Ίσως το πιο αποτελεσματικό σύστημα στην αντιμετώπιση κλοπής φωτοβολταϊκών πάνελ. Λειτουργεί με πλαστική οπτική ίνα η οποία συνδέει τα πάνελ μεταξύ τους, κι έτσι αν κάποιος πάει να σηκώσει ένα πάνελ, αναγκαστικά κόβεται και η οπτική ίνα που τα συνδέει, με αποτέλεσμα να δοθεί αμέσως συναγερμός.

#### 4.11 Χρήσεις αισθητήρων Πλαστικών Ινών στον Ρουχισμό

Οι αισθητήρες με πλαστικές ίνες έχουν βρει χρήση σε ρούχα με εντυπωσιακά αποτελέσματα .



**Σχήμα 4.16:** Ο καθηγητής Dr. Sundaresan που φοράει μπλουζάκι με πλαστικές οπτικές ίνες

Σε αυτή την περίπτωση, το μαλλί της μπλούζας περιέχει οπτικούς αισθητήρες που συνδέονται ταυτόχρονα με το σώμα και με την μπλούζα. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να έχουμε και μετρήσεις του σώματος του ανθρώπου (θερμοκρασία, πίεση κτλ) ενώ ταυτόχρονα θα υπακούει και στους κανόνες της μόδας [14α].

Το επόμενο βήμα με αυτή την τεχνολογία είναι οι οθόνες πάνω στο σώμα οι οποίες θα επιτρέπουν την χρήση τηλεόρασης, διαδικτύου και 3G κλήσεων.



**Σχήμα 4.17:** Μπλούζα με χρήση τηλεόρασης και διαδικτύου βασισμένη σε πλαστικές ίνες και αισθητήρες.

Η εταιρία France Telecom R&D παρουσίασε το Μάιο του 2002 την πρώτη οθόνη πάνω σε μπλούζα η οποία παρέχει υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών και τηλεόραση σε αυτόν που την φορά. [63].

Η OFSETH αναπτύσσει υφάσματα που ενσωματώνουν οπτικά συστήματα παρακολούθησης. Τα υφάσματα αυτά είναι κατάλληλα για παιδιά ηλικίας μεταξύ 1 και 5 ετών, καθώς μπορούν να παρακολουθούν την αναπνοή, καρδιακή συχνότητα και την ποσότητα του οξυγόνου στο αίμα [64].

«Οι οπτικές ιδιότητες της οπτικής ίνας μπορεί να αλλάξουν ανάλογα με το περιβάλλον γύρω», εξηγεί ο Δρ François Narbonneau της Multitel.

"Λόγω των περιορισμών που επιβάλλει μια οπτική ίνα και με την ανάλυση των τροποποιήσεων των ιδιοτήτων του οπτικού σήματος που μεταδίδεται σε αυτή είναι δυνατόν να μετρηθούν πολλές παράμετροι."

Οι οπτικές ίνες είναι ευαίσθητες στην ύπαρξη λυγισμένων ή τεντωμένων σημείων καθώς αυτά επηρεάζουν την ποσότητα του φωτός που μεταδίδουν. Για την παρακολούθηση της αναπνοής, οι ερευνητές έπλεξαν μια πλαστική οπτική ίνα σε έναν ελαστικό επίδεσμο που τοποθετείται γύρω από το στήθος ή την κοιλιά. Έτσι, η ίνα διαστέλλεται και συστέλλεται καθώς ο ασθενής αναπνέει και η ίνα παρακολουθεί το ρυθμό της αναπνοής.

## 4.12 Περιοδικές διατάξεις σε οπτικές ίνες (Long Period Fiber Grating-LPFG)

### 4.12.1 Γενικά

Στην απλούστερη μορφή του, μια περιοδική διάταξη οπτικών ινών αποτελείται ουσιαστικά από μια περιοδική χωρική μεταβολή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος του διαμήκη άξονα της οπτικής ίνας. Με βάση τη σχέση μεταξύ του μήκους της περιόδου  $\Lambda$  και του μήκους κύματος του διαδιδόμενου φωτός οι περιοδικές διατάξεις κατατάσσονται σε δύο γενικές τύπους. Στον πρώτο τύπο ανήκουν τα λεγόμενα Bragg gratings ή μικρής περιόδου, στα οποία έχουμε σύζευξη μεταξύ ρυθμών που διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζονται και ως «ανακλαστικά» grating. Ο δεύτερος τύπος αφορά τα λεγόμενα Long Period Fiber Grating (LPFG) των οποίων η περίοδος  $\Lambda$  είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με το μήκος κύματος του φωτός και είναι η κατηγορία με την οποία θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Οι συγκεκριμένες περιοδικές διατάξεις χαρακτηρίζονται και ως grating διάδοσης καθώς σε αυτές έχουμε σύζευξη ρυθμών του πυρήνα με ρυθμούς επένδυσης που διαδίδονται προς την ίδια κατεύθυνση. Το μήκος μιας περιόδου LPFG, όταν αυτό χρησιμοποιείται ως φίλτρο σε συχνότητες εμπορικών τηλεπικοινωνιών είναι συνήθως της τάξης των εκατοντάδων μικρομέτρων ( $\mu\text{m}$ ). Η σύζευξη προκύπτει, για LPFG εγγεγραμμένα σε μονορυθμικές οπτικές ίνες (single mode fiber-SMF), όταν επιτυγχάνεται συμφωνία φάσης μεταξύ του βασικού ρυθμού του πυρήνα και ενός συγκεκριμένου ρυθμού. Η παρουσία του grating είναι αυτή που δημιουργεί τη συνθήκη για τη συμφωνία φάσης μεταξύ των ρυθμών.[65]

### 4.12.2 Διαδικασία κατασκευής

Η μέθοδος διαμόρφωσης μιας περιοδικής διάταξης LPFG σε οπτική ίνα με τη βοήθεια  $\text{CO}_2$  laser παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1998 από τον Davis [Davis-1998]. Η εγγραφή της περιοδικής διάταξης έγινε με έκθεση της μιας πλευράς της οπτικής ίνας περίοδο-περίοδο διαδοχικά και όχι μέσω μιας μάσκας πλάτους όπως στην περίπτωση των UV-LPFG. Αναλυτικότερα η διαδικασία έχει ως εξής. Για να γίνει η εγγραφή μιας περιόδου grating προκαλώντας έτσι αλλαγή στο δείκτη διάθλασης,  $\text{CO}_2$  laser με μήκος κύματος  $10.6\mu\text{m}$  εστιάζεται σε ένα σημείο ενός

τμήματος της οπτικής ίνας χρησιμοποιώντας ένα σφαιρικό φακό. Το διαδοχικό άνοιγμα και κλείσιμο του καλύμματος του φακού ελέγχει το χρόνο έκθεσης της ίνας στο laser. Εν συνεχεία, η επόμενη περίοδος της περιοδικής διάταξης εγγράφεται αφού πρώτα μετατοπιστεί η οπτική ίνα κατά μήκος και σε απόσταση συγκεκριμένη, που είναι ίση με την περίοδο του grating  $\Lambda$ . Η διαδικασία σχηματισμού του grating παρακολουθείται και ελέγχεται συνεχώς με μια πηγή φωτός ευρείας ζώνης και με τη χρήση ενός οπτικού αναλυτή φάσματος. Σε πρώιμες εφαρμογές έγινε αντιληπτό ότι η φόρτωση υδρογόνου αύξανε την ευαισθησία κατά τη διαδικασία εγγραφής, αλλά τελικά δεν ήταν απαραίτητη. Αργότερα ο σφαιρικός φακός στη διάταξη κατασκευής αντικαταστάθηκε από κυλινδρικό με σκοπό την εστίαση του φωτός σε μια γραμμή (αντί για ένα σημείο) κάθετη ως προς τον διαμήκη άξονα της ίνας. Η υιοθέτηση του κυλινδρικού φακού είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ευαισθησίας στη διαδικασία της ευθυγράμμισης. Έτσι τώρα τα CO<sub>2</sub> LPFG διαμορφώθηκαν χρησιμοποιώντας τον ίδιο χρόνο έκθεσης και με ίδια διαστήματα-περιόδους.

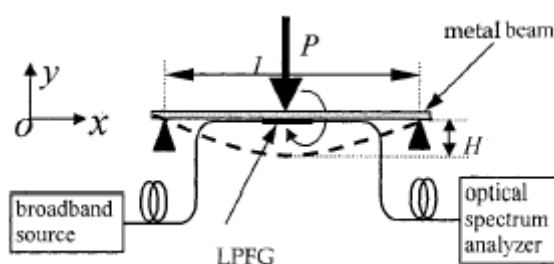
#### **4.12.3 Χρήσεις - Εφαρμογές**

Οι περιοδικές διατάξεις σε οπτικές ίνες (Long Period Fiber Grating-LPFG) είναι πολύ σημαντικές σε ένα ευρύ φάσμα τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών αλλά και στον τομέα των αισθητήρων. Στις τηλεπικοινωνίες, τα LPFG μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξισορρόπηση του κέρδους οπτικών ενισχυτών, ως φίλτρα στενής ζώνης, για αντιστάθμιση διασποράς, για διαμόρφωση φάσματος ευρυζωνικών πηγών, ως πολωτές οπτικών ινών, ή για σταθεροποίηση laser. Από τις πολλές εφαρμογές που αναφέρθηκαν και αναρίθμητες άλλες που ερευνώνται ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν αυτές που σχετίζονται με τις ιδιότητες των LPFG όταν αυτά υποβάλλονται σε εξωτερική παραμόρφωση όπως κάμψη και στρέψη και είναι αυτές στις οποίες θα αναφερθούμε αναλυτικότερα. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά των περιοδικών διατάξεων που διαμορφώνονται με έκθεση μιας οπτικής ίνας σε CO<sub>2</sub> laser είναι μοναδικά και οι χρήσεις των λεγόμενων CO<sub>2</sub> LPFG είναι αυτές που θα μας απασχολήσουν παρακάτω.

#### 4.12.4 Αισθητήρας κάμψης

Οι περιοδικές διατάξεις οπτικών ινών γενικά, όχι μόνο τα CO<sub>2</sub> LPFG έχουν κατά καιρούς στο παρελθόν διερευνηθεί για την πιθανή χρήση τους ως αισθητήρες κάμψης. Για παράδειγμα, οι Patrick, Chang, Vohra παρουσίασαν το 1998 τα συμπεράσματά τους για περιοδικές διατάξεις που εγγράφηκαν σε φωτοευαίσθητες οπτικές ίνες με τη χρήση laser μήκους κύματος 248nm μέσω μάσκας πλάτους [Patrick-1998]. Τα πειραματικά δεδομένα έδειξαν την εξάρτηση της μετατόπισης του μήκους κύματος από το διαμήκη προσανατολισμό της διάταξης καθώς και το ότι η μετατόπιση αυτή ήταν μη γραμμική. Το εύρος των παρατηρηθέντων τιμών κάμψης ήταν από  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  ως και  $4.4 \text{ m}^{-1}$ . Επίσης τονίστηκε η δυνατότητα χρησιμοποίησής της ως αισθητήρα κάμψης ενσωματωμένο στο εσωτερικό κατασκευών.

Η ευαισθησία των CO<sub>2</sub> LPFG στην κάμψη και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα καθιστούν ιδανικά στη χρήση τους ως αισθητήρες κάμψης [Rao-2003]. Στην περίπτωση αυτή έχουμε να κάνουμε με περιοδικές διατάξεις για την κατασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν CO<sub>2</sub> laser υψηλής συχνότητας. Στο σχήμα φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 4.18 Πειραματική διάταξη για την κάμψη LPFG [Rao-2003]

Όπως παρατηρούμε, η παραπάνω διάταξη είναι παρόμοια με το AFTS που βοήθησε στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των LPFG κατά την κάμψη και στρέψη. Έτσι, κι εδώ το τμήμα της οπτικής ίνας που περιέχει την περιοδική διάταξη τοποθετείται πάνω σε μια μεταλλική επιφάνεια. Τα δύο άκρα της ίνας έχουν περαστεί μέσα σε αντίστοιχες σχισμές και στη συνέχεια οδηγούνται γύρω από δύο μικρούς δίσκους. Στα άκρα της ίνας έχουν προσδεθεί δύο μικρά βαρίδια 5g έτσι ώστε η ίνα να είναι συνεχώς προσκολλημένη στο μεταλλικό έλασμα. Στη συνέχεια η ίνα κάμπτεται



στο μέσον της με τη βοήθεια ενός άλλου ελάσματος που ωθεί την επιφάνεια πάνω στην οποία βρίσκεται προς τα κάτω.

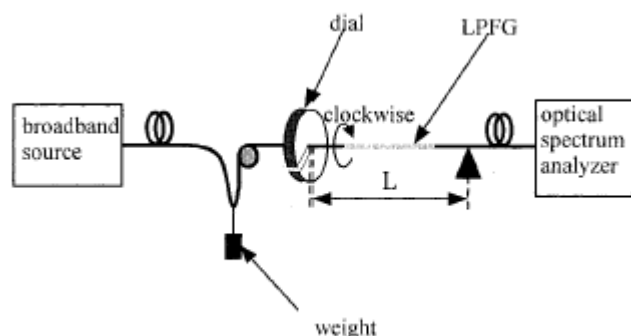
Τα πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι η ευαισθησία στην κάμψη για τα CO<sub>2</sub> LPFG που διαμορφώθηκαν με παλμούς υψηλής συχνότητας εξαρτάται άμεσα από τον αξονικό προσανατολισμό της ίνας. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω των ιδιοτήτων των CO<sub>2</sub> LPFG γενικότερα και της γνωστής ανομοιομορφίας στην εγκάρσια κατανομή του δείκτη διάθλασης.

#### 4.12.5 Αισθητήρας στρέψης

Οι συμβατικοί αισθητήρες στρέψης συνήθως βασίζονται σε συσκευές γωνιομέτρησης. Το μειονέκτημα αυτών είναι ότι το μέγεθός τους καθιστά δύσκολη την τοποθέτησή τους στο εσωτερικό της δομής μεγαλύτερων κατασκευών. Αντίθετα οι αισθητήρες βασισμένοι στην τεχνολογία των οπτικών ινών είναι ευκολότερο να ενσωματωθούν εκεί όπου άλλοι δεν μπορούν. Στο παρελθόν έχουν αναφερθεί παρόμοιες χρήσεις που αφορούσαν αυλακωτές περιοδικές διατάξεις [Lin-2001]. Το μειονέκτημα ωστόσο της κατηγορίας αυτής είναι ότι η ενσωμάτωσή ενός LPFG με αυλακώσεις στην επιφάνειά του στη δομή ενός κτιρίου για παράδειγμα, έχει ως αποτέλεσμα την εισχώρηση υλικού στις αυλακώσεις και την σταδιακή μεταβολή των ιδιοτήτων και άρα την αχρήστευσή του ως αισθητήρα. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι η μικρή μηχανική αντοχή.

Ένας αισθητήρας στρέψης βασισμένος σε CO<sub>2</sub> LPFG διαμορφωμένο με παλμούς laser υψηλής συχνότητας παρουσιάστηκε από τους Rao και Wang πρόσφατα [Rao-2003]. Μάλιστα ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει τη δυνατότητα μέτρησης όχι μόνο του βαθμού στρέψης άμεσα αλλά και της κατεύθυνσης της στρέψης (δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα). Στο σχήμα απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών στρέψης του CO<sub>2</sub> LPFG. Η περίοδος στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν  $\Lambda=437\mu\text{m}$  και ο συνολικός αριθμός περιόδων  $N=45$ . Η διάταξη μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με εκείνη που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών στρέψης των CO<sub>2</sub> LPFG που είδαμε σε άλλο κεφάλαιο. Το ένα άκρο του LPFG είναι σταθερά προσδεδεμένο σε ένα σημείο ενώ το άλλο περασμένο μέσα από το κέντρο ενός δίσκου που μπορεί να περιστρέφεται. Και πάλι ένα μικρό

βαρίδι 5g προσδέθηκε στο ένα άκρο της ίνας ώστε να την κρατάει τεντωμένη. Το συνολικό μήκος της ίνας ήταν 60mm.

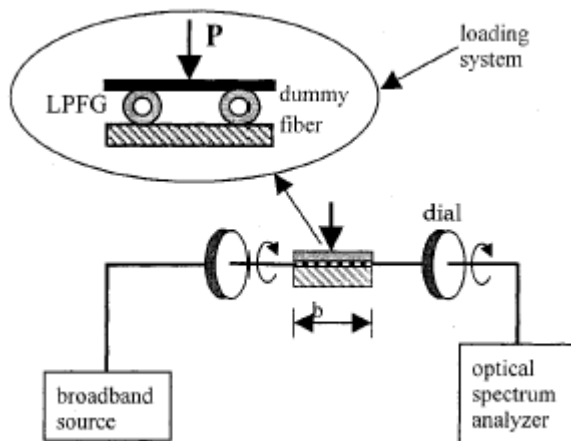


**Σχήμα 4.19** Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών στρέψης του CO<sub>2</sub> LPFG [Rao-2003]

Τα πειραματικά αποτελέσματα της διαδικασίας, η οποία περιελάμβανε δεξιόστροφη όσο και αριστερόστροφη στρέψη της ίνας, έδειξαν ότι η μετατόπιση του μήκους κύματος συντονισμού μεταβάλλεται γραμμικά με το βαθμό της επιβαλλόμενης στρέψης.

#### 4.12.6 Αισθητήρας εγκάσιου φορτίου

Η παρακολούθηση του ιστορικού και της καλής κατάστασης των οικοδομικών κατασκευών όπως γέφυρες, κτίρια, κλπ, απαιτεί τη χρήση αισθητήρων οι οποίοι λειτουργούν χωρίς την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας με το φορτίο που αναπτύσσεται, μια αλληλεπίδραση που συχνά οδηγεί σε λανθασμένες μετρήσεις. Οι Rao και Wang και πάλι πρότειναν τη χρήση CO<sub>2</sub> LPFG διαμορφωμένων με υψηλής συχνότητας παλμούς ως αισθητήρες απαλλαγμένους από το παραπάνω μειονέκτημα [Rao-2003]. Μια πρότυπη διάταξη με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 5.15. Η περίοδος του LPFG ήταν  $\Lambda=500\mu\text{m}$  ενώ ο αριθμός περιόδων ήταν  $N=55$ . Επίσης το μήκος κύματος συντονισμού ήταν  $1530.82\text{nm}$ , το πλάτος στο συντονισμό  $-25.075\text{dB}$  ενώ τέλος το εύρος των  $3\text{dB}$  ήταν  $12\text{nm}$  με την περιοδική διάταξη αδιατάρακτη από εξωτερικές πιέσεις. Το LPFG και μια όμοιου τύπου ίνα χωρίς όμως περιοδική διάταξη τοποθετήθηκαν ανάμεσα σε δύο επίπεδες επιφάνειες με τα άκρα του LPFG σταθερά προσδεδεμένα στα κέντρα δύο δίσκων.



**Σχήμα 4.20** Πρότυπη διάταξη για τη μέτρηση του φορτίου σε ένα LPFG [Rao-2003]

Ένα φορτίο  $P$  εφαρμόστηκε στην πάνω επιφάνεια της οποίας το πλάτος και το βάρος ήταν αντίστοιχα  $b=20\text{mm}$  και  $150\text{g}$ . Το εφαρμοζόμενο βάρος έφτασε την τιμή των  $4800\text{g}$  με διαδοχικά βήματα των  $400\text{g}$ . Το φορτίο που ασκήθηκε στο LPFG ήταν  $(P+150)/2b$ . Στη συνέχεια η περιοδική διάταξη στράφηκε περί το διαμήκη άξονά της ώστε τα διαφορετικά χαρακτηριστικά σε κάθε αξονικό προσανατολισμό να εκτιμηθούν. Όπως ήταν αναμενόμενο η ευαισθησία στο επιβαλλόμενο φορτίο εξαρτήθηκε άμεσα από τη γωνία στροφής του LPFG όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.16(α). Η μέγιστη τιμή της ευαισθησίας φορτίου για το μήκος κύματος συντονισμού ήταν  $\pm 0.03\text{nm}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ .

Εκμεταλλευόμενοι τα μοναδικά χαρακτηριστικά του  $\text{CO}_2$  LPFG, τη μη εξάρτηση δηλαδή του μήκους κύματος συντονισμού από το φορτίο για ορισμένες γωνίες στροφής, ενώ το πλάτος συντονισμού ταυτόχρονα μειώνεται γραμμικά, όπως και το ότι το μήκος κύματος μεταβάλλεται γραμμικά με τη θερμοκρασία ενώ το πλάτος παραμένει πρακτικά ανεπηρέαστο από αυτήν, είμαστε σε θέση να μετρήσουμε ταυτόχρονα θερμοκρασία και εγκάρσιο φορτίο. Έτσι ένας αισθητήρας αυτού του είδους είναι δυνατόν να απαλλαγεί από την αλληλεπίδραση της θερμοκρασίας και του εγκάρσιου φορτίου και να παρέχει ακριβή αποτελέσματα μετρώντας τη μετατόπιση του μέγιστου πλάτους συντονισμού για το εγκάρσιο φορτίο και τη μετατόπιση του μήκους κύματος συντονισμού για τη θερμοκρασία.[65-75]

#### 4.13 Αισθητήρες οπτικών ινών για την προστασία της Ακρόπολης

Επιταχυνσιόμετρα και αισθητήρες οπτικών ινών θα παρακολουθούν για πρώτη φορά τη συμπεριφορά ολόκληρης της Ακρόπολης, καταγράφοντας την επίδραση των σεισμικών δονήσεων, ή ακόμα και απειροελάχιστες μεταβολές όπως η διαστολή των μνημείων το καλοκαίρι και η αύξηση της πίεσης από τις βροχές. Το πρώτο από τα επτά επιταχυνσιόμετρα του δικτύου εγκαταστάθηκε το 2006 στον ιερό λόφο και το Σεπτέμβριο του 2008 ακολούθησε ακόμα ένα, αυτή τη φορά μέσα στον Παρθενώνα, στο πλαίσιο μελέτης του ΕΜΠ και του Πανεπιστημίου Μίε της Ιαπωνίας. Οι αισθητήρες οπτικών ινών που έχουν ήδη εγκατασταθεί θα καταγράφουν ακόμα και απειροελάχιστες μεταβολές στη δομή του ιερού λόφου: διαστολή το καλοκαίρι, συστολή το χειμώνα, πιέσεις από ισχυρές βροχοπτώσεις, και φυσικά μικρές μετακινήσεις λόγω σεισμών. Οι αισθητήρες λειτουργούν σε δύο σημεία του περιμετρικού τείχους: το νοτιοανατολικό τμήμα που είναι το υψηλότερο και άρα το πιο εκτεθειμένο, και το βόρειο τείχος που παρουσιάζει φθορές, πιθανότατα από σεισμό του 18ου αιώνα.[77].

Βασικό χαρακτηριστικό των αισθητήρων οπτικών ινών είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να κωδικοποιούν την πληροφορία που συλλέγουν σε μεταβολές μήκους κύματος έντασης, πόλωσης ή φάσης.

Τα δύο βασικά μέρη ενός συστήματος είναι η μονάδα ελέγχου και η μονάδα ανίχνευσης οι οποίες είναι δυνατόν να βρίσκονται σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους. Αποτελούνται κυρίως από εξαρτήματα μονότροπης οπτικής ίνας. Το σύστημα ελέγχου γενικά περιλαμβάνει τα ηλεκτρονικά για την τροφοδοσία της πηγής φωτός καθώς και τα αντίστοιχα λειτουργίας των φωτοανιχνευτών όπως επίσης και τα ηλεκτρονικά ενίσχυσης και επεξεργασίας του σήματος που δημιουργείται. Το σύστημα ελέγχου μπορεί να είναι συνδεδεμένο με το σύστημα ανίχνευσης μέσω μιας συμβατικής μονότροπης οπτικής ίνας. Η ανίχνευση γίνεται αποκλειστικά με οπτικά μέσα χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου πρόσθετου ηλεκτρονικού εξαρτήματος.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα - Σχόλια

Οι αισθητήρες οπτικών ινών βρίσκουν σήμερα εφαρμογή στους περισσότερους τομείς της τεχνολογίας καθώς σε πολλές περιπτώσεις είναι καλύτεροι συγκρινόμενοι με τους κλασσικούς αισθητήρες σε επίπεδο σταθερότητας, ταχύτητας, ακρίβειας, εμβέλειας όσο και σε επίπεδο μετρήσεων, πρόσβασης, ασφάλειας, προστασίας.

Συχνά, σε διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως η βιοϊατρική, η μετεωρολογία, ή η γεωλογία, εμφανίζεται η ανάγκη να ανακαλύψουμε την παρουσία και τη σύσταση αερίων, υγρών και στερεών ουσιών στο εσωτερικό ενός ζωντανού οργανισμού, σε μεγάλα βάθη μέσα στη γη ή σε άλλα δυσπρόσιτα μέρη. Είναι φανερό ότι αυτή η ανίχνευση και αναγνώριση ουσιών είναι δυσχερής κυρίως μέχρι να προσεγγίσουμε το σημείο όπου βρίσκονται αυτές. Έτσι, χρειαζόμαστε συσκευές μικρών διαστάσεων και μεγάλης ακρίβειας. Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι το βασικό δομικό στοιχείο τέτοιων συσκευών.

Κύρια πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι τα ακόλουθα: μικρό μέγεθος και βάρος, μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας, είναι συμβατοί με τα σεισμικά στάνταρντ, φιλικό προς το περιβάλλον, έχουν δυνατότητα πραγματοποίησης μετρήσεων σε σημεία και διατάξεις αδύνατα να μετρηθούν με τους συμβατικούς αισθητήρες, μεγάλη ταχύτητα μετρήσεων, δυνατότητα επανάληψης μέτρησης κατά τη διάρκεια ενός φαινομένου, δυνατότητα απομακρυσμένης επιτήρησης, αντοχή στη διάβρωση, δεν δημιουργούν σπινθήρες, δεν χρειάζονται γειώσεις, δυνατότητες πολυπλεξίας, δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις.

Στην παρούσα εργασία εξετάσαμε με αναφορά σε πειραματικά δεδομένα πώς επηρεάζεται η σύζευξη μεταξύ δύο μη παράλληλων οπτικών ινών σε επαφή, από το υγρό μέσο στο οποίο βυθίζεται το σημείο επαφής τους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η σύζευξη εξαρτάται σημαντικά τόσο από τον τύπο και τη συγκέντρωση της ανομοιογένειας στο υγρό μέσο, όσο και από το μήκος κύματος της διέγερσης. Η

εισαγωγή κολλοειδούς στα ομογενή μέσα έχει μικρή μόνο επίδραση στη σύζευξη. Τα quantum dots, αντίθετα, έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην αποτελεσματικότητα της σύζευξης. Στη συνέχεια μελετήσαμε την ίνα επικεκαλυμμένη με μέταλλο. Στην περίπτωση που επικαλύπτουμε την ίνα με μέταλλο, έχουμε απώλεια κύματος από την ίνα, δηλαδή σημαντικό ποσοστό του κύματος «δραπετεύει» από τα όρια της ίνας και αρχίζει να μεταδίδεται έξω από αυτήν. Έχουμε δηλαδή, διαρροή του πεδίου, ή αλλιώς το εντός της ίνας διαδιδόμενο πεδίο αποσβένει, έχει απώλειες. Αυτό είναι και το σημαντικότερο συμπέρασμά, αφού δείχνει ότι η επικάλυψη μετάλλου καθιστά την ίνα καλό αισθητήρα. Για να λειτουργήσει η ίνα ως αισθητήρας που αντιλαμβάνεται τι υλικό την περιβάλλει, θα πρέπει μέρος του κύματος που αυτή «οδηγεί» να μπορεί να έρθει σε επαφή με το υλικό που την περιβάλλει, δηλαδή να εξέλθει από αυτήν. Αυτόν ακριβώς το σκοπό ευνοεί το μέταλλο, αφού αυξάνει το ποσοστό του πεδίου που εξέρχεται από την ίνα.

Τα παραδείγματα εφαρμογών με χρήση αισθητήρων οπτικών ινών, στα οποία αναφερόμαστε, με σχετικά εκτενή παρουσίαση στην εργασία αυτή είναι: οι αισθητήρες οπτικών ινών για την ανίχνευση υδρογόνου, η τεχνολογία οπτικών αισθητήρων FBG και ο τρόπος κατασκευής και λειτουργίας τους, οι οπτικές ίνες και το ενδοσκόπιο καθώς και εφαρμογές γενικά στην ιατρική, οι βιοαισθητήρες και οι οπτικές ίνες, ο ενζυμικός βιοαισθητήρας (enzyme biosensor), η χρήση οπτικών αισθητήρων στην Χημεία – Βιοχημεία, οι χρήσεις οπτικών αισθητήρων στις κατασκευές, η χρήση οπτικών αισθητήρων και οπτικών ινών σε κοινόχρηστους χώρους – Φωτισμός – Ασφάλεια με ειδική αναφορά στην περιμετρική ασφάλεια με εξωτερικούς ανιχνευτές χώρου και στην ασφάλεια στα φωτοβολταϊκά πάρκα, οι χρήσεις αισθητήρων πλαστικών ινών στον ρουχισμό, οι περιοδικές διατάξεις σε οπτικές ίνες (Long Period Fiber Grating-LPFG) με ειδική αναφορά στη διαδικασία κατασκευής, σε χρήσεις – εφαρμογές, στον αισθητήρα κάμψης, στον αισθητήρα στρέψης, στον αισθητήρα εγκάσιου φορτίου.

Η σημασία και το ενδιαφέρον που υπάρχει για τις οπτικές ίνες και τους αισθητήρες οπτικών ινών σε σύγχρονες και εξειδικευμένες τεχνολογικές εφαρμογές καταδεικνύονται από τις ακόλουθες δύο αναφορές.

Το Νόμπελ φυσικής το 2009 απονεμήθηκε κατά το ήμισυ στον αμερικανο-βρετανό Τσάρλς Κάο, που θεωρείται πρωτοπόρος στον τομέα των οπτικών ινών, και κατά το ήμισυ στους αμερικανούς Ουίλαρντ Μπόιλ και Τζορτζ Σμιθ που ανακάλυψαν τους αισθητήρες CCD. [76]

Η παρακολούθηση της κατάστασης βαρέως ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού στη βιομηχανία συνήθως επιτυγχάνεται με ανάλυση των κραδασμών. Διάφορες τεχνικές, που βασίζονται κυρίως σε χωρητικά και πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα, έχουν εφαρμοστεί για την προληπτική συντήρηση. Ωστόσο, η αρνητική επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) μπορεί να είναι ένα πραγματικό πρόβλημα, για τα ηλεκτρικά σήματα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τη μετάδοση των φυσικών παραμέτρων σε θορυβώδη περιβάλλοντα. Οι αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο λόγω της μη ηλεκτρικής φύσης των σημάτων. [25]

Επίσης από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 μέχρι σήμερα, συστήματα παρακολούθησης που βασίζονται σε αισθητήρες οπτικών ινών αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης μεγάλων κατασκευών, κυρίως από σκυρόδεμα. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να μετρήσουν πολλές διαφορετικές παραμέτρους όπως μετακίνηση, παραμόρφωση ή θερμοκρασία.

## Βιβλιογραφία

1. <http://el.wikipedia.org/wiki/>
2. [http://egnatia.ee.auth.gr/~aalexioy/fiber\\_op.htm](http://egnatia.ee.auth.gr/~aalexioy/fiber_op.htm)
3. [http://3lyk-kalam.mes.sch.gr/opt\\_fiber\\_gr.htm](http://3lyk-kalam.mes.sch.gr/opt_fiber_gr.htm)
4. Hecht, E. *Optics*, Addison-Wesley 1987
5. M. Born and E. Wolf (1999). *Principles of Optics*, Seventh (expanded) Edition. Cambridge University Press.
6. Ουζούνογλου Ν.Κ. (1990). *Τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών*, Εκδόσεις Συμμεών
7. K. T. Grattan and B. T. Meggitt, eds., *Optical Fibre Sensor Technology*, Chapman and Hall, London, pp. 269–310, 1995.
8. B. Culshaw and J. P. Dakin, eds., *Optical Fiber Sensors*, Vols. 3 and 4, Artech House, Boston, 1996.
9. <http://ek.based.gr/fos/laser/laser.htm>
10. S.G. Lambert, W.L. Casey, «*Laser Communication in space*» Boston, USA. 1995.
11. Α. Σεραφετινίδης, «*Βασικές αρχές λειτουργίας των Laser*», Αθήνα, 1980.
12. Φ. Κωνσταντίνου, Χ. Καψάλης, Π. Κωττής, «*Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες*», Παπασωτηρίου 1995
13. Handbook: David A. Johnson «*Optical through-the-air communications*»
14. Α.Α. Σεραφετινίδης, «*Εισαγωγή στην Οπτοηλεκτρονική*», Αθήνα, 1989
15. *Μικροαισθητήρες, Αρχές και εφαρμογές (Microsensors Principles and Applications)* Julian W. Gardner
16. *Τεχνολογία Αισθητήρων & Μικροσυστημάτων*, Ι.Α. Αβαριτσιώτης
17. *Handbook of Modern Sensor*, J. Fraden, American Institute of Physics
18. *Sensor Markets 2008: Worldwide Analyses and Forecast for the Sensor Markets until 2008* Intecho Consulting, Basle, Switzerland, 1999
19. *Microsensors: MEMS, Biosensors and Nanosensors*, Andrew McWilliams, BBC (April 2008)
20. [http://www.bluer.com/images/Overview\\_of\\_FOS2.pdf](http://www.bluer.com/images/Overview_of_FOS2.pdf)
21. [http://www.eaeie.org/theiere\\_bratislava/1.html](http://www.eaeie.org/theiere_bratislava/1.html)
22. <http://www.smartsensing.gr/PinfoFBGsensors.aspx>



23. <http://www.sensorland.com/HowPage072.html>
24. <http://www.ul.ie/elements/Issue6/Optical%20Fibre%20Sensors.htm>
25. <http://www.hindawi.com/journals/js/2010/936487>
26. <http://phdtheses.ekt.gr/eadd/handle/10442/0997>
27. [http://www.crd.gr/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=49&Itemid=76&lang=el](http://www.crd.gr/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=49&Itemid=76&lang=el)
28. [http://www.sites.fr/Images/Upload/fic\\_fibres\\_optiques\\_v01.ang.pdf](http://www.sites.fr/Images/Upload/fic_fibres_optiques_v01.ang.pdf)
29. [http://www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST\\_Japan\\_Presentations\\_Wang.pdf](http://www7.nationalacademies.org/gdest/GDEST_Japan_Presentations_Wang.pdf)
30. <http://www.waset.org/journals/waset/v42/v42-55.pdf>
31. <http://www.liostechnology.com/Applications/Electric+Power+Sector/Application%3a+Power+Cable+and+Overhead+Line+Monitoring>
32. [http://iats09.karabuk.edu.tr/press/pro/02\\_KeynoteAddress.pdf](http://iats09.karabuk.edu.tr/press/pro/02_KeynoteAddress.pdf)
33. [http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/fiber-optic-sensors/embedded-fos-flight-II/2002-12\\_han.pdf](http://aml.seas.ucla.edu/research/areas/fiber-optic-sensors/embedded-fos-flight-II/2002-12_han.pdf)
34. <http://dbserver.forthnet.gr/Praxis/servlet/praxis.PServlet?s=praxis.TMShowPublic?id=13&l=el>
35. [http://www.skyrodemanet.gr/images/stories/articles\\_pdf/v30\\_CRD\\_sk\\_2\\_2010.pdf](http://www.skyrodemanet.gr/images/stories/articles_pdf/v30_CRD_sk_2_2010.pdf)
36. <http://www.optoiq.com/index/photronics-technologies-applications/lfw-display/lfw-article-display/articles/optoiq2/photronics-technologies/technology-products/fiber-optics/2011/01/medical-applications-of-fiber-optics-optical-fiber-sees-growth-as-medical-sensors.html>
  
37. [http://www.technicalreview.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=399](http://www.technicalreview.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=399)
38. <http://www.smartsensing.gr/PinfoFBGsensors.aspx>
39. [www.laparoscopy.com](http://www.laparoscopy.com)
40. [www.alt.mindspring.com/~dmmmd/index.html](http://www.alt.mindspring.com/~dmmmd/index.html)
41. SA Kane. Introduction in Modern Medicine. Taylor and Francis, London and NY 2003
42. A Katzir. Optical Fibers in Medicine. Scientific American 120-125, May 1989

43. JN Graber, LS Schultz, JJ Pietrafitta, DF Hickock. Laparoscopic Abdominal Surgery. McGraw-Hill, NY 1993
44. JB McGinty, RB Caspari, RW Jackson, GG Poehling eds. Operative Arthroscopy. Raven Press, NY 1996
45. G Taubes. Surgery in Cyberspace. Discover 85-94, Dec 1994
46. <http://panacea.med.uoa.gr/topic.aspx?id=914>
47. Ανδρέας Λυμπέρης, «Ευφυή φορητά συστήματα ιατρικής φροντίδας: τρέχουσα έρευνα και ανάπτυξη και μελλοντικές προκλήσεις»
48. Δ. Κουτσούρης, Σ. Παυλόπουλος, Α. Πρέντζα «Εισαγωγή στη Βιοϊατρική τεχνολογία και ανάλυση ιατρικών σημάτων», Εκδόσεις Τζιόλα 2003
49. Διδώ Γιόβα, «Οργανολογία και τεχνικές: Βιοϊατρικές εφαρμογές», Εκδόσεις ΕΜΠ 2003
50. [http://www.biomed.ntua.gr/BelSite/Educational\\_Activities/Undergraduate/Lesson2/Analysh\\_epexergasia\\_biosignals.htm](http://www.biomed.ntua.gr/BelSite/Educational_Activities/Undergraduate/Lesson2/Analysh_epexergasia_biosignals.htm)
51. <http://mpl.med.uoa.gr/ekpaideytiko-yliko/i-y-stin-iatrik/tileiatrik.pdf>
52. [http://www.openecg.net/WS1\\_slides/S5\\_6.kotrotsios/S5\\_kotrotsios.pdf](http://www.openecg.net/WS1_slides/S5_6.kotrotsios/S5_kotrotsios.pdf)
53. <http://www.vita.gr/html/ent/601/ent.4601.asp>
54. <http://www.vivometrics.com/>
55. <http://www.wealthy.gr>
56. <http://www.csem.ch/sfit/html/projects.html>
57. <http://www.aua.gr/gr/dep/bio/lab/enzym/HP18.htm>
58. [http://www.smardeck.gr/sinagermoi\\_outdoor\\_detectors.html](http://www.smardeck.gr/sinagermoi_outdoor_detectors.html)
59. [http://www.eqs.gr/jsite/index.php?option=com\\_content&view=article&id=66&Itemid=70](http://www.eqs.gr/jsite/index.php?option=com_content&view=article&id=66&Itemid=70)
60. Structure Health Monitoring System:  
  
<http://www.isiscanada.com/innovations/shm.html>
61. Werner Lienhart, Fritz K. Brunner "MONITORING OF BRIDGE DEFORMATIONS USING EMBEDDED FIBER OPTICAL SENSORS" article presented in Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.
62. Πλαστικές ίνες σε ύφασμα,  
[http://newmedia.yeditepe.edu.tr/pdfs/isimd\\_05/14.pdf](http://newmedia.yeditepe.edu.tr/pdfs/isimd_05/14.pdf)

63. Mike Jones "Ethernet over Plastic Optical Fibre" online στο :  
[http://www.micrel.com/\\_PDF/Ethernet/White%20Paper/Ethernet%20Over%20POF.pdf](http://www.micrel.com/_PDF/Ethernet/White%20Paper/Ethernet%20Over%20POF.pdf)
64. G. D. VanWiggeren, T. K. Gaylord, D. D. Davis, E. Anemogiannis, B. D. Garrett, M. I. Brainwish and E. N. Glytsis, "Axial rotation dependence of resonances in curved  $CO_2$ -laser-induced long-period fibre gratings," Electron. Lett., vol. 36, pp. 1354-1355, Aug. 3 2000.
65. D. Davis, *Long -Period Fiber Gratings Fabricated with Focused  $CO_2$  Laser Pulses*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, May 1999.
66. G. D. VanWiggeren, T. K. Gaylord, D. D. Davis, M. I. Brainwish, E. N. Glytsis and E. Anemogiannis, "Tuning, attenuating and switching by controlled flexure of long-period fiber gratings," Opt. Lett., vol. 26, pp. 61-63, Jan. 15, 2001.
67. D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis, S. G. Kosinski, S. C. Mettler and A. M. Vengsarkar, "Long-period fibre grating fabrication with focused  $CO_2$  laser pulses," Electron. Lett., vol. 34, pp. 302-303, Feb. 5, 1998.
68. Y.-J. Rao, Y.-P. Wang, Z.-L. Ran, T. Zhu and B.-M. Yu, "Characteristics of novel long-period fibre gratings written by focused high-frequency  $CO_2$  laser pulses," in *Passive Components and Transmission Systems*, vol. 4581, SPIE, Nov. 2001.
69. Y.-J. Rao, Y.-P. Wang, Z.-L. Ran and T. Zhu, "Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency  $CO_2$  laser pulses," J. Lightwave Technol., vol. 21, pp. 1320-1327, May 2003.
70. Y.-P. Wang, Y.-J. Rao, Z.-L. Ran, T. Zhu and A.-Z. Hu, "A novel tunable gain equalizer based on a long-period fiber grating written by high-frequency  $CO_2$  laser pulses," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, pp. 251-253, Feb. 2003.
71. H. G. Patrick, C. C. Chang and S. T. Vohra, "Long period fibre gratings for structural bend sensing," Electron. Lett., vol.34, pp. 1773-1775, Sep. 3, 1998.

72. D. D. Davis, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis and S. C. Mettler, “ *Very-high-temperature stable CO<sub>2</sub>-laser-induced long-period fibre gratings,* ” Electron. Lett., vol. 35, pp. 740-741, Apr. 29, 1999.
73. C. Y. Lin, L. A. Wang and G. W. Chern, “ *Corrugated long period fiber gratings as strain, torsion and bending sensors,* ” J. Lightwave Technol., vol.19, pp.1159-1168, Aug. 2001.
74. [http://www.sciencedaily.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=652&Itemid=129](http://www.sciencedaily.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=652&Itemid=129)
75. <http://www.cpusers.gr/showthread.php?t=865&page=1>