

Β. Οπτικοί Αισθητήρες

Πρόεδρος: Οι απογευματινές ομιλίες είναι «Οπτικοί Αισθητήρες». Θα μας μιλήσει πρώτος ο κ. Παγιατάκης,

από τον ΕΛΟΤ, για «Αισθητήρες οπτικών ινών».

Θέμα: Αισθητήρες οπτικών ινών.

Εισηγητής: Γ. Παγιατάκης, ηλεκτρολόγος μηχανικός, ΕΛΟΤ.

1. Εισαγωγή

Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι αυτόνομο ερευνητικό πεδίο ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '70, όταν οι ασχολούμενοι με την ανάπτυξη των οπτικών επικοινωνιών άρχισαν να αντιλαμβάνονται ότι η μεταδιδόμενη διά μέσου οπτικών ινών ακτινοβολία ήταν δυνατό να διαμορφωθεί από εξωτερικές παραμέτρους, όπως π.χ. η θερμοκρασία και η πίεση. Η εντατική έρευνα των επόμενων δεκαπέντε ετών σε πανεπιστημιακά και βιομηχανικά εργαστήρια της Ευρώπης, της Αμερικής και της Ιαπωνίας οδήγησε στην ανάπτυξη αισθητήρων ικανών να ανιχνεύσουν μια πολύ μεγάλη ποικιλία μεγεθών, όπως θερμοκρασία, πίεση, περιστροφική κίνηση, ροή ρευστών, ένταση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, χημικές παραμέτρους κ.λπ.

Το κύριο πλεονέκτημα των αισθητήρων οπτικών ινών απέναντι στους συμβατικούς αισθητήρες είναι η ίδια η φύση των οπτικών ινών που, αποτελούμενες από ηλεκτρομονωτικά υλικά, προσφέρουν στο σύστημα σχεδόν πλήρη ατρωσία έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, ενώ παράλληλα μειώνουν σημαντικά την ηλεκτρική επικινδυνότητά του. Δεδομένου ότι πολλοί αισθητήρες είναι προορισμένοι να λειτουργούν σε ηλεκτρικά "επιβαρημένα" (λόγω παρουσίας ηλεκτρικών συσκευών και καλωδίων) ή επικίνδυνα (λόγω πιθανής διαρροής εύφλεκτων αερίων) περιβάλλοντα, τα πιο πάνω χαρακτηριστικά αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Ακόμη οι αισθητήρες οπτικών ινών παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία (που στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να βελτιωθεί απλά και μόνο με την αύξηση του μήκους της οπτικής ίνας), ενώ παρέχουν τη δυνατότητα ανάπτυξης διαφορετικών περιοχών αίσθησης κατά μήκος της ίδιας οπτικής ίνας (κατανεμημένοι αισθητήρες). Τέλος, οι αισθητήρες οπτικών ινών χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος και βάρος, αυξημένη χημική αντοχή και τεράστια (λόγω χρήσεως οπτικού φέροντος) χωρητικότητα πληροφορίας (που όμως δεν έχει ακόμη πλήρως αξιοποιηθεί).

2. Συμβολισμοί

Φ ($\Delta\phi$)	Φάση (Ολισθήση φάσης) κύματος
λ ($\Delta\lambda$)	Μήκος κύματος (Μεταβολή)
η ($\Delta\eta$)	Δείκτης διάθλασης (Μεταβολή)
L (ΔL)	Μήκος (Μεταβολή)
I (I_0)	Ένταση εισόδου (εξόδου) ακτινοβολίας

K	Συντελεστής σύζευξης
N	Αριθμός σπειρών
A	Επιφάνεια
Ω	Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής
C	Ταχύτητα φωτός

3. Γενική θεώρηση αισθητήρων οπτικών ινών

3.1. Ορισμός και βασική δομή

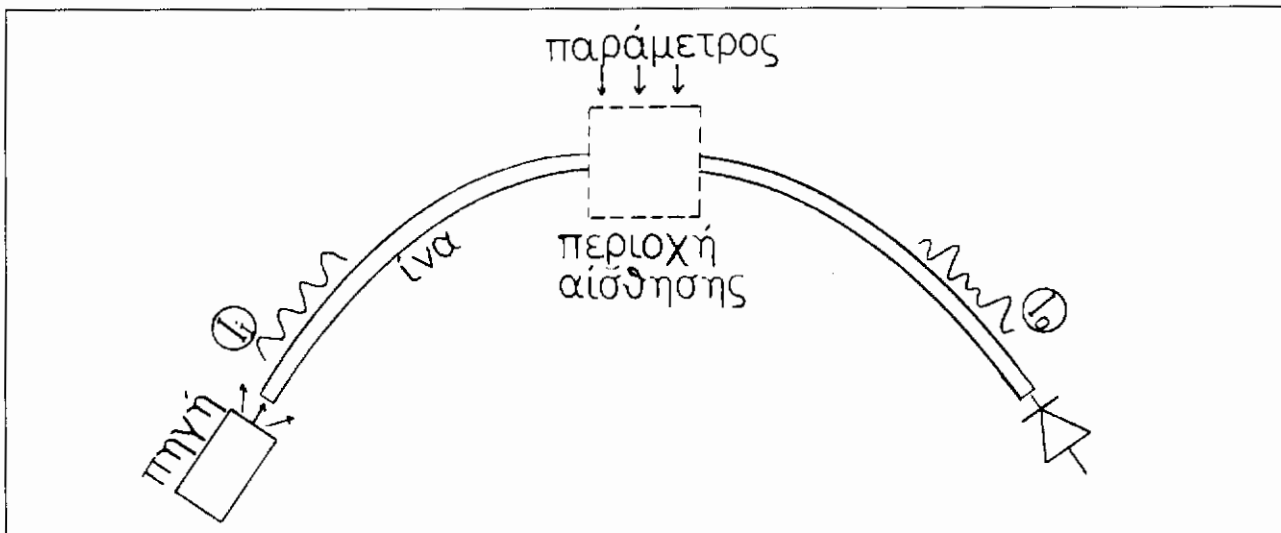
Ως αισθητήρες οπτικών ινών χαρακτηρίζονται οι συσκευές εκείνες που χρησιμοποιούν την κυματοδηγούμενη από μια οπτική ίνα ακτινοβολία, προκειμένου να προσδιορίσουν τη μεταβολή της τιμής μιας εξωτερικής παραμέτρου.

Η βασική δομή ενός αισθητήρα οπτικών ινών απεικονίζεται στο σχήμα 3.1. Φως (ή και υπέρυθρη ακτινοβολία) από μια οπτική πηγή διοχετεύεται μέσα στην οπτική ίνα (ή τις οπτικές ίνες) και διέρχεται από την περιοχή αίσθησης, όπου και διαμορφώνεται (συνήθως κατά ένταση ή φάση) υπό την επίδραση της υπό μέτρηση εξωτερικής παραμέτρου. Η περιοχή αίσθησης έχει επί τόπου καταστεί ευαίσθητη στην υπόψη παράμετρο και κατά το δυνατόν αναισθητή στις υπόλοιπες παραμέτρους. Με αυτόν τον τρόπο στην ακτινοβολία που εμφανίζεται στην έξοδο της οπτικής ίνας έχουν αποτυπωθεί οι μεταβολές της πιο πάνω παραμέτρου. Η ακτινοβολία αυτή συλλέγεται από τον οπτικό ανιχνευτή και στη συνέχεια διαβιβάζεται στη μονάδα επεξεργασίας σήματος για εκτίμηση και περαιτέρω ανάλυση.

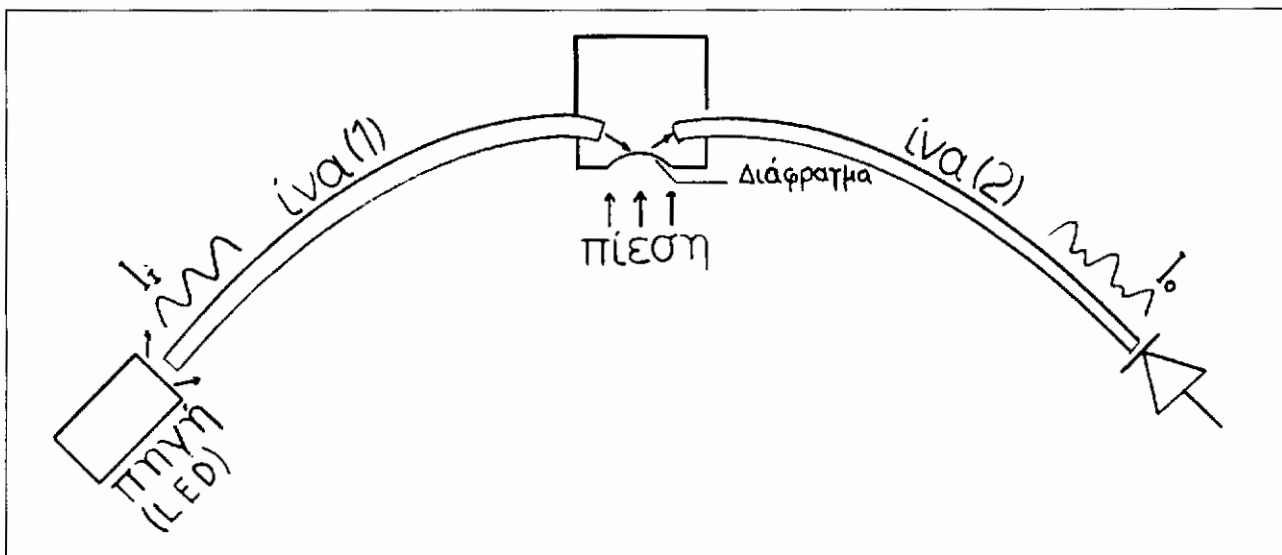
3.2. Τύποι αισθητήρων οπτικών ινών

Οι αισθητήρες οπτικών ινών κατατάσσονται συνήθως με κριτήριο τον τρόπο επίδρασης της εξωτερικής παραμέτρου στην κυματοδηγούμενη ακτινοβολία. Διακρίνονται οι παρακάτω τρεις κατηγορίες:

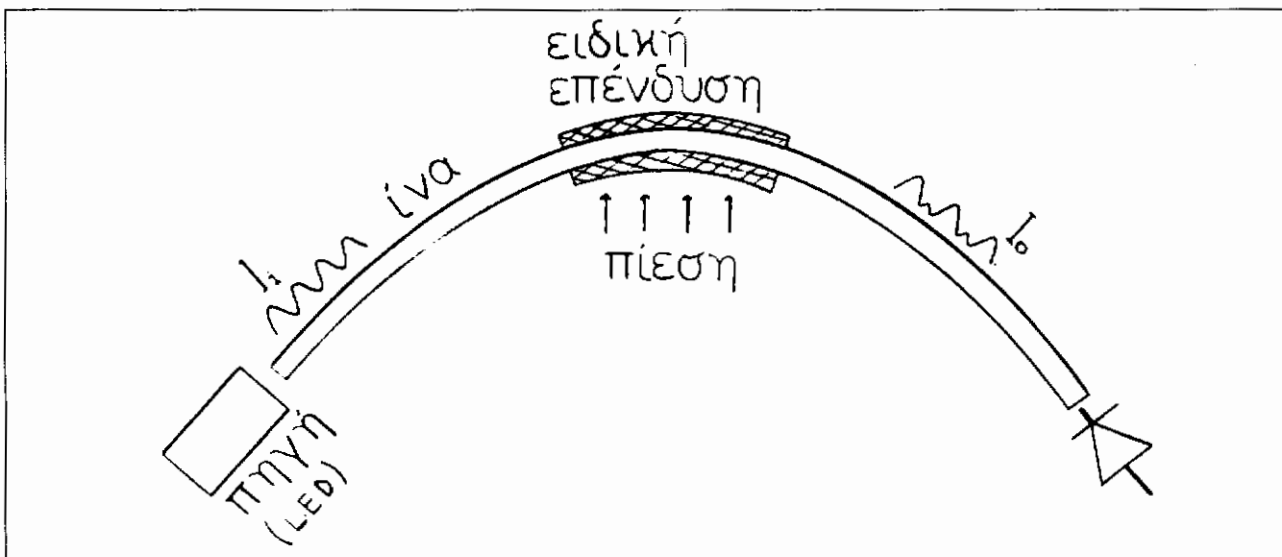
Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους αισθητήρες εξωτερικής επίδρασης (σχήμα 3.2). Σ' αυτούς η οπτική ακτινοβολία, αφού εγκαταλείψει την οπτική ίνα, εισέρχεται στην περιοχή αίσθησης, όπου και διαμορφώνεται (κατά ένταση) από την εξωτερική παράμετρο. Η διαμορφωμένη ακτινοβολία εισέρχεται στη συνέχεια σε μια διαφορετική (ή και στην ίδια) οπτική ίνα, απ' όπου συλλέγεται από τον οπτικό ανιχνευτή. Οι αισθητήρες αυτού του τύπου ήταν από τους πρώτους που εμφανίστηκαν και στις αρχικές τους μορφές λειτουργούσαν σαν συσκευές on-off (η δεύτερη οπτική ίνα δεχόταν ή όχι φως ανάλογα με το αν η εξωτερική παράμετρος ήταν απύουσα ή παρούσα).



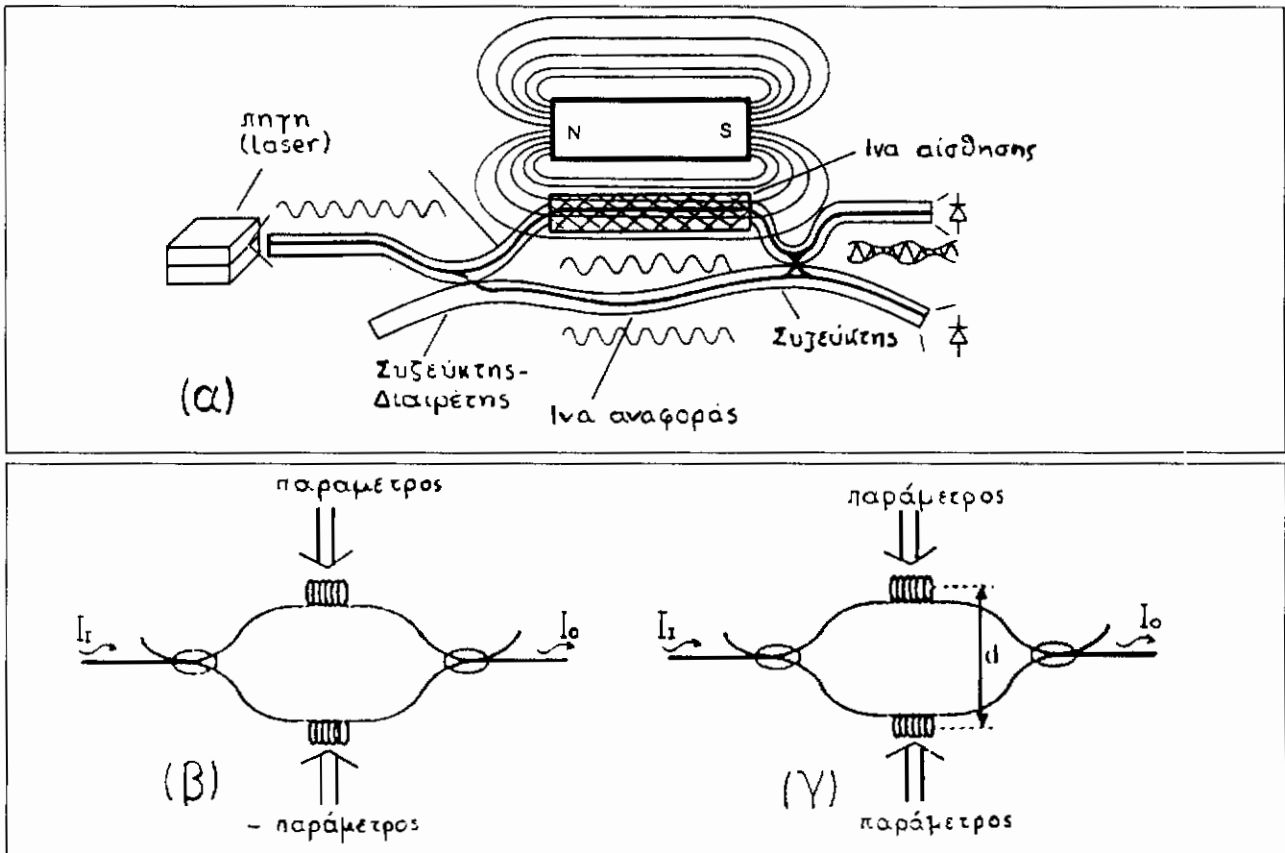
Σχήμα 3.1. Βασική δομή αισθητήρα οπτικών ινών.



Σχήμα 3.2. Αισθητήρας "εξωτερικής επίδρασης".



Σχήμα 3.3. Αισθητήρας "εσωτερικής επίδρασης".



Σχήμα 3.4. “Συμβολομετρικός” αισθητήρας Mach - Zehnder

Τρόπος λειτουργίας:

(α) “Push” (β) “Push-Pull” (γ) “Push-Push”.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους αισθητήρες εσωτερικής επίδρασης (σχήμα 3.3). Σ' αυτούς η περιοχή αίσθησης είναι ουσιαστικά ένα τμήμα της οπτικής ίνας, το οποίο δέχεται την επίδραση της εξωτερικής παραμέτρου. Ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι δυνατή, π.χ. η επιλεκτική ευαισθητοποίηση της περιοχής αίσθησης με την προσθήκη ειδικής επένδυσης, η αφαίρεση μέρους του περιβλήματος της οπτικής ίνας και η αύξηση της απόσβεσης της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας κ.λπ.

Σε κάθε περίπτωση η οπτική ακτινοβολία διαμορφώνεται κατά ένταση, κατά τη διάρκεια της διέλευσής της μέσα από την περιοχή αίσθησης και στην έξοδο της οπτικής ίνας συλλέγεται από τον ανιχνευτή.

Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει σχεδόν αποκλειστικά τους συμβολομετρικούς αισθητήρες που λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων τους περιγράφονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Στην πιο συνηθισμένη τους μορφή οι αισθητήρες αυτοί αποτελούνται από ένα συμβολόμετρο οπτικών ινών Mach - Zehnder (σχήμα 3.4), στο οποίο η μια ίνα καθίσταται ευαίσθητη στην υπό μέτρηση παράμετρο (συνήθως με την προσθήκη ειδικής επένδυσης) αποτελώντας έτσι την ίνα αίσθησης, ενώ η δεύτερη απομονώνεται τελείως από το περιβάλλον και αποτελεί την ίνα αναφοράς. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4.α, η ακτινοβολία της πηγής διαχωρίζεται από τον κατευθυντήριο συζευκτή σε δύο

δέσμες ίσης έντασης, που κατά τη διέλευσή τους διά μέσου των οπτικών ινών υφίστανται μια σχετική ολίσθηση φάσης $\Delta\phi$ λόγω της επίδρασης της εξωτερικής παραμέτρου στο μήκος L και το δείκτη διάθλασης n της ίνας αίσθησης.

Δεδομένου ότι

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n L \tag{3.1}$$

ισχύει ότι

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \tag{3.2}$$

όπου ο πρώτος όρος εκφράζει τις μεταβολές στο μήκος κύματος της οπτικής πηγής, ενώ οι δύο άλλοι προέρχονται από την επίδραση της εξωτερικής παραμέτρου. Στην έξοδο του αισθητήρα οι δύο δέσμες συμβάλλουν μέσω του εκεί συζευκτή, οπότε η $\Delta\phi$ μεταφράζεται σε διαμόρφωση της έντασης I_o της ακτινοβολίας εξόδου.

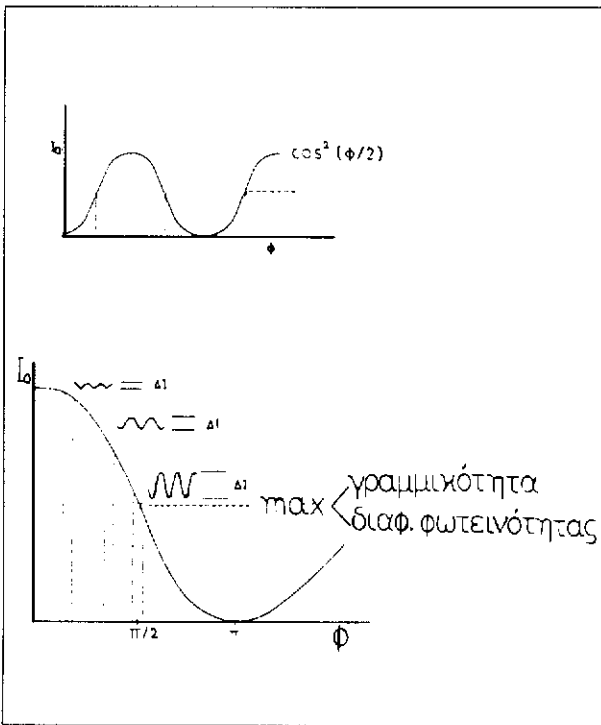
Ισχύει ότι

$$I_o = I_i \cos^2 (\Delta\phi/2) \tag{3.3}$$

Αν και ο πιο πάνω τρόπος λειτουργίας του αισθητήρα Mach - Zehnder (στη βιβλιογραφία αναφέρεται συχνά σαν push) είναι ο πιο διαδεδομένος υπάρχουν δύο ακόμη παραλλαγές, στις οποίες η ίνα αναφοράς έχει αντικατασταθεί από μία επιπλέον ίνα αίσθησης. Στην

Πίνακας 3.1. Τύποι συμβολομετρικών αισθητήρων οπτικών ινών

Συμβολόμετρα	Παραδείγματα
Δυο οπτικών ινών	Mach - Zehnder Michelson
Μιας οπτικής ίνας	Sagnac
Οπτικής ίνας διπλού πυρήνα	Ομαξονική ίνα Ίνα διπλού τετραγωνικού πυρήνα
Πολλαπλής συμβολής	Fabry - Perot

**Σχήμα 3.5. Αποδιαμόρφωση συμβολομετρικού αισθητήρα [3].**

πρώτη παραλλαγή (λειτουργία push - pull), η δεύτερη ίνα δέχεται την επίδραση του αρνητικού της μετρητέας παραμέτρου με αποτέλεσμα το διπλασιασμό της επαγόμενης ολίσθησης φάσης (σχήμα 3.4.β), ενώ στη δεύτερη (λειτουργία push - push), η εξωτερική παράμετρος εφαρμόζεται και στις δύο ίνες, προκειμένου να διαπιστωθούν μεταβολές της παραμέτρου στο χώρο (σχήμα 3.4.γ).

Εκτός από την τοπολογία Mach - Zehnder, οι συμβολομετρικοί αισθητήρες εμφανίζονται σε μια μεγάλη ποικιλία μορφών, οι κυριότερες από τις οποίες αναφέρονται στον πίνακα 3.1. Σημαντική υποκατηγορία στον πίνακα αυτόν αποτελούν τα συμβολόμετρα μιας ίνας, όπου η διαμόρφωση της ισχύος εξόδου (σχέση 3.3) επιτυγχάνεται με τη συμβολή δύο ρυθμών διάδοσης, στους οποίους η εξωτερική παράμετρος επάγει μια σχετική ολίσθηση φάσης (σχέση 3.2). Για παράδειγμα στο συμβολόμετρο Sagnac (σχήμα 5.3), υπάρχουν δύο αντίθετα διαδιδόμενοι ρυθμοί, στους οποίους η διαφοροποίηση στη φάση προκαλείται από τυχόν περιστροφικές κινήσεις του αισθητήρα, ενώ

στην ομαξονική ίνα [1] και στην ίνα διπλού τετραγωνικού πυρήνα [2] η συμβολή επιτυγχάνεται με μεταβολές στη σύζευξη μεταξύ των ρυθμών των δύο πυρήνων, που προκαλούνται από την εξωτερική παράμετρο.

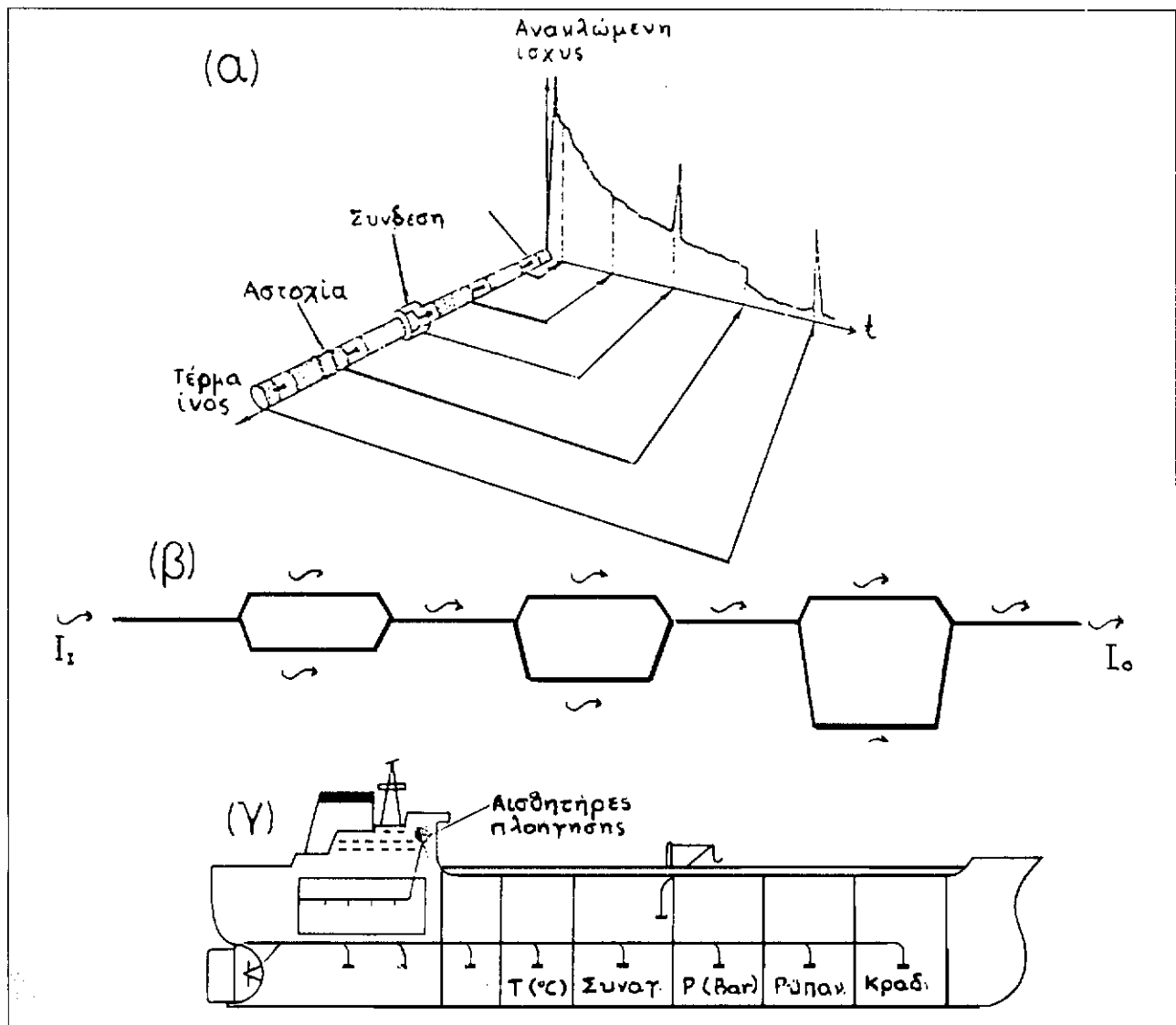
Εκτός από τα πλεονεκτήματα, τα κοινά για όλους τους αισθητήρες οπτικών ινών, οι συμβολομετρικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία και μεγάλη εφαρμοστικότητα. Από την άλλη πλευρά, οι μικροδιακυμάνσεις στην ένταση και τη συχνότητα της πηγής (συνήθως laser ημιαγωγού), αλλά και τυχαίες μεταβολές στη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος, δημιουργούν τυχαίες (και ανεπιθύμητες) μεταβολές φάσης (θόρυβο) που περιορίζει την ευαισθησία του αισθητήρα. Άλλα σημαντικά στοιχεία, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση συμβολομετρικών αισθητήρων είναι η απομόνωση της ίνας αναφοράς από το περιβάλλον καθώς η δυνατότητα των οπτικών ινών να διατηρούν κατά το δυνατόν την κατάσταση πόλωσης της διαδιδόμενης ακτινοβολίας. Σε αντίθετη περίπτωση η διαφορά φωτεινότητας των κροσσών συμβολής μειώνεται και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να μηδενιστεί.

Ένα άλλο σημείο, που στους συμβολομετρικούς αισθητήρες χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, είναι η τεχνική αποδιαμόρφωσης του σήματος εξόδου (σχέση 3.3), δηλαδή ο υπολογισμός της ολίσθησης φάσης $\Delta\phi$ (και στη συνέχεια της εξωτερικής παραμέτρου) από την ένδειξη I_0 του οπτικού ανιχνευτή. Η κατάσταση περιπλέκεται από το ότι η συνάρτηση $I_0(\Delta\phi)$ είναι μη γραμμική κι ακόμη από το ότι η αντίστροφη συνάρτηση $I_0^{-1}(\Delta\phi)$ δεν είναι μονοσήμαντη. Για τους λόγους αυτούς επιδιώκεται η αποδιαμόρφωση του σήματος εξόδου γύρω από την τιμή $\Delta\phi = \pi/2$, στην οποία η I_0 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη γραμμικότητα και την υψηλότερη ευαισθησία σε μεταβολές της $\Delta\phi$, άρα και της εξωτερικής παραμέτρου (σχήμα 3.5 [3]). Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές αποδιαμόρφωσης που περιγράφονται εκτενέστερα στην [4].

3.3. Σημειακοί και κατανεμημένοι αισθητήρες

Οι τρεις τύποι αισθητήρων, που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.1 μπορούν να χαρακτηριστούν σημειακοί αισθητήρες, υπό την έννοια ότι ανιχνεύουν μεταβολές της εκάστοτε εξωτερικής παραμέτρου σε μια περιορισμένη περιοχή του χώρου.

Στον αντίποδα των σημειακών βρίσκονται οι κατανεμημένοι αισθητήρες οπτικών ινών που, όπως δηλώνει και το όνομά τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν



Σχήμα 3.6. Κατανεμημένοι αισθητήρες

(α) Εσωτερικής επίδρασης (β) Συμβολομετρικός (γ) Κατανεμημένοι αισθητήρες σε πλοίο [6].

για τον προσδιορισμό εξωτερικών παραμέτρων (συνήθως διαφορετικών) ταυτόχρονα σε διαφορετικές περιοχές του χώρου. Οι αισθητήρες αυτοί προκύπτουν από την ανάπτυξη σημειακών αισθητήρων εσωτερικής επίδρασης καθώς και συμβολομετρικών κατά μήκος της ίδιας οπτικής ίνας (σχήμα 3.6). Στους πρώτους, η ανάλυση των λαμβανόμενων πληροφοριών (που προέρχονται από διαφορετικά σημεία του χώρου) γίνεται συνήθως με τη μέτρηση της σκεδαζόμενης προς τα πίσω ακτινοβολίας [3], ενώ στους δεύτερους με τη χρησιμοποίηση συμβολομετρικών αισθητήρων διαφορετικού μήκους [5].

Αν και η ανάπτυξη κατανεμημένων αισθητήρων είναι ακόμη σε εξέλιξη, τα πλεονεκτήματα από τη χρήση τους αναμένεται να είναι κάτι παραπάνω από σημαντικά. Αισθητήρες αναπτυγμένοι κατά μήκος της ίδιας οπτικής ίνας (που μπορούν να σχηματισθούν απλά με την προσθήκη κατάλληλων επενδύσεων σε διαφορετικά σημεία της) θα είναι σε θέση να ελέγχουν παρα-

μέτρους και φαινόμενα, όπως θερμοκρασία, πίεση, ύπαρξη καπνού κ.λπ., σε πλοία και αεροπλάνα (σχήμα 3.6.γ [6]). Ας σημειωθεί ότι η δυνατότητα χρήσης κατανεμημένων αισθητήρων πρέπει να καταχωρηθεί στα πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ίνων, δεδομένου ότι η κατασκευή τους με συμβατική (ηλεκτρική) τεχνολογία είναι πολύ δυσχερής.

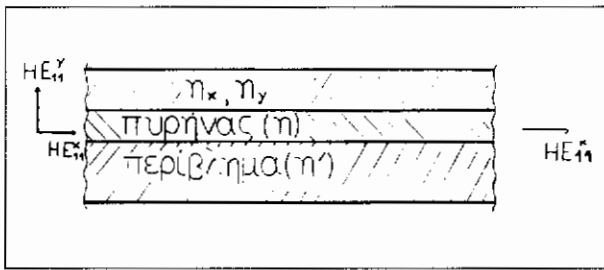
3.4. Διαμορφώσιμα χαρακτηριστικά της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας

Τα χαρακτηριστικά της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας που μπορούν να διαμορφωθούν υπό την επίδραση μιας εξωτερικής παραμέτρου είναι κυρίως η ένταση, η φάση, η πόλωση και το μήκος κύματος.

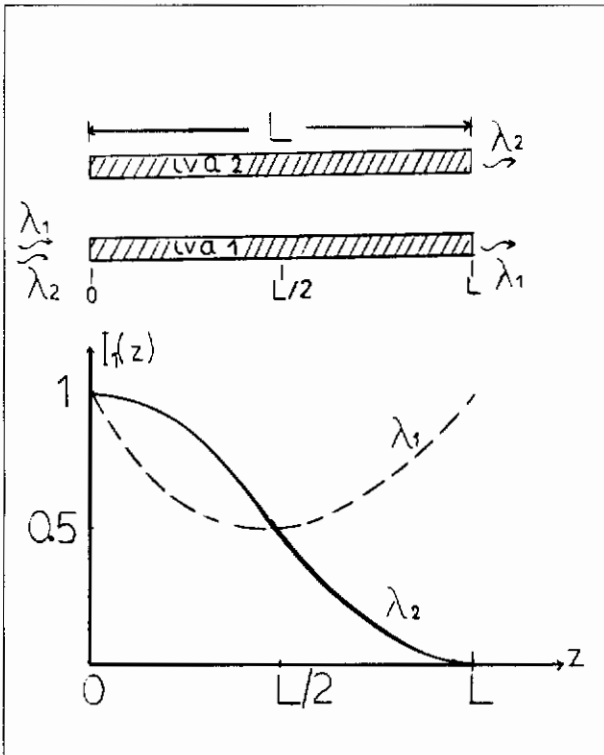
Η ένταση ακτινοβολίας είναι η ποσότητα, στην οποία αποκλειστικά αντιδρούν οι οπτικοί ανιχνευτές. Στους αισθητήρες εξωτερικής επίδρασης η διαμόρφωση της έντασης προκαλείται από μεταβολές της περιοχής αίσθησης (σχήμα 3.2), ενώ στους αισθητήρες εσωτερι-



Σχήμα 4.1. D - ίνα [8].



Σχήμα 4.2. Ίνα με επίστρωση που απορροφά την πόλωση "y" ($n_y > n > n_x$).



Σχήμα 4.3. Η αρχή της επιλογής μήκους κύματος από κατευθυντήριο συζεύκτη.

κής επίδρασης προκαλείται από μεταβολές στο μήκος και το δείκτη διάθλασης της οπτικής ίνας που επάγονται από τις διακυμάνσεις της εξωτερικής παραμέτρου. Κύριο πλεονέκτημα του υπόψη τρόπου διαμόρφωσης είναι η απλότητα των συσκευών, ιδιαίτερα σ' εφαρμογές, όπου η υψηλή ευαισθησία θυσιάζεται με σκοπό τη μείωση του κόστους.

Η διαμόρφωση της φάσης της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα σε συμβολομετρικούς ενισχυτές (σχήμα 3.4) και ως μέθοδος διαμόρφωσης διακρίνεται για την υψηλή της ευαισθησία. Μεταβολές φάσης της τάξης του μrad μπορούν να εντοπισθούν αρκετά εύκολα, ενώ η επιτυχανόμενη ευαισθησία (με περιοχή αίσθησης μήκους 1m και σε $\lambda = 1\mu\text{m}$) είναι της τάξης των 100 $\text{rad}/^\circ\text{C}$ για θερμοκρασία και 10-4 rad/Pa για πίεση [7]. Τα κύρια προβλήματα της τεχνικής αυτής είναι οι τυχαίες μεταβολές φάσης που προκαλούνται από παραμέτρους διαφορετικές από τη μετρούμενη καθώς και οι τυχαίες διακυμάνσεις της οπτικής πηγής. Δεδομένου ότι στο συζεύκτη εξόδου η διαμόρφωση φάσης μετατρέπεται σε διαμόρφωση έντασης (σχέση 3.3) οι πιο πάνω διακυμάνσεις επηρεάζουν την ένδειξη του ανιχνευτή. Το κόστος των αισθητήρων που χρησιμοποιούν διαμόρφωση φάσης είναι υψηλό λόγω του πολύπλοκου εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους.

Η διαμόρφωση πόλωσης είναι τεχνική παρόμοια με τη διαμόρφωση φάσης. Φως διοχετεύεται σε κρύσταλλο ή ίνα, έτσι ώστε να αποτελείται από δύο ορθογώνιες πολώσεις ίσης έντασης στην κατάσταση ηρεμίας. Οι πολώσεις αυτές υπό την επίδραση κάποιου εξωτερικού αιτίου διαδίδονται με διαφορετικές φασικές ταχύτητες και υποχρεώνονται να περάσουν μέσα από έναν αναλυτή, του οποίου το σήμα εξόδου είναι συνάρτηση της σχετικής ολίσθησης φάσης μεταξύ των δύο πολώσεων, άρα συνάρτηση της ίδιας της εξωτερικής παραμέτρου. Η ευαισθησία της τεχνικής αυτής είναι τυπικά δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερη της διαμόρφωσης φάσης, ενώ προβλήματα μπορούν να προκύψουν από κατασκευαστικές ατέλειες της χρησιμοποιούμενης ίνας.

Η διαμόρφωση μήκους κύματος χρησιμοποιεί τις μεταβολές του δείκτη διάθλασης ή του συντελεστή σύζευξης που προκαλούνται από μεταβολές στο μήκος κύματος της διαδιδόμενης ακτινοβολίας. Αν και η τεχνική αυτή δε χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως, είναι εντούτοις πολλά υποσχόμενη, όσον αφορά στην αύξηση ευαισθησίας των αισθητήρων και τη βελτίωση των επιδόσεών τους μέσω τεχνικών πολυπλεξίας. Το πρόβλημα είναι ότι επί του παρόντος υπάρχει έλλειψη κατάλληλων (ρυθμιζόμενων κατά μήκος κύματος) πηγών.

4. Κύρια δομικά στοιχεία αισθητήρων οπτικών ινών

4.1. Γενικά σχόλια

Αν και τα δομικά στοιχεία ενός αισθητήρα οπτικών ινών υπαγορεύονται από τον τύπο του (π.χ. συμβολομετρικός) και το πεδίο εφαρμογής του (π.χ. μέτρηση

θερμοκρασίας), ένας τέτοιος αισθητήρας θα περιλαμβάνει οπωσδήποτε μια πηγή φωτεινής ή υπέρυθρης ακτινοβολίας (laser ή LED), μία ή περισσότερες οπτικές ίνες (ειδικής τις περισσότερες φορές σύνθεσης και κατασκευής) και έναν οπτικό ανιχνευτή (συνήθως PIN ή χιονοστιβάδας - APD). (Σχήμα 3.1). Τα στοιχεία αυτά τις περισσότερες περιπτώσεις πλαισιώνονται από μηχανισμούς σύζευξης πηγής - ίνας και ίνας - ανιχνευτή, πολωτές και κατευθυντήριους συζεύκτες. Ας σημειωθεί ότι με εξαίρεση την αυξημένη ατρωσία και ασφάλεια των αισθητήρων αυτών (που απορρέουν από την ίδια τη φύση των οπτικών ινών) η αξιοποίηση της υψηλής ευαισθησίας, η βελτίωση της επιλεκτικότητας της περιοχής αίσθησης κ.λπ. εξαρτώνται άμεσα από την ποιότητα και τις επιδόσεις των χρησιμοποιούμενων δομικών στοιχείων.

4.2. Οι χρησιμοποιούμενες οπτικές ίνες

Σε αντίθεση με τις οπτικές τηλεπικοινωνίες, όπου οι χρησιμοποιούμενες οπτικές ίνες είναι σχεδόν αποκλειστικά μονορρυθμικές και λειτουργούν στα μήκη κύματος 1.3 και 1.55 μm , στους αισθητήρες οπτικών ινών εμφανίζονται σε πολύ μεγαλύτερη ποικιλία τόσο στη γεωμετρία, όσο και στην υλική τους σύνθεση. Ο λόγος είναι ότι, ενώ στις τηλεπικοινωνίες η οπτική ίνα είναι ένα καθαρά παθητικό στοιχείο, στους αισθητήρες (κυρίως στους συμβολομετρικούς και εσωτερικής επίδρασης) συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία της αίσθησης και επιλέγεται με βάση τις επιδόσεις της στη διαδικασία αυτή. Έτσι, αν μια οπτική ίνα προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σ' έναν αισθητήρα θερμοκρασίας, πρέπει να έχει καταστεί ευαίσθητη στις μεταβολές, αποκλειστικά και μόνον, της πιο πάνω παραμέτρου π.χ. με την προσθήκη κατάλληλης επένδυσης. Από την άλλη πλευρά, λόγω του σχετικά μικρού μήκους των περισσότερων αισθητήρων (<50m) οι απαιτήσεις για χαμηλή απόσβεση μπορούν να χαλαρώσουν. Αυτό συμβαίνει κυρίως στους αισθητήρες εξωτερικής και εσωτερικής επίδρασης. Έτσι, στους πρώτους χρησιμοποιούνται ακόμη και πλαστικές πολυρρυθμικές ίνες (λόγω της δυνατότητας εύκολου χειρισμού και δύσκολης σύζευξης με τη πηγή και τον ανιχνευτή), ενώ στους δεύτερους (εσωτερικής επίδρασης) χρησιμοποιούνται ευρύτατα τηλεπικοινωνιακές ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης (κυρίως λόγω μεγάλης διαθεσιμότητας, χαμηλής διασποράς και σχετικά μεγάλου μεγέθους). Από την άλλη πλευρά, για τους συμβολομετρικούς αισθητήρες απαιτούνται μονορρυθμικές οπτικές ίνες, ειδικής πολλές φορές κατασκευής, που συνήθως τροφοδοτούνται από laser (συμβατικά ή ημιαγωγών). Ας σημειωθεί ότι η αρχικά ακολουθούμενη πολιτική της επιλογής οπτικών ινών με κριτήριο τη διαθεσιμότητά τους (που μοιραία οδηγούσε σε συμβιβασμούς στις απαιτήσεις και τη σχεδίαση του συστήματος) παραχώρησε τη θέση της στην άποψη ότι οι οπτικές ίνες είναι εκείνες, που σαν δομικά στοιχεία, πρέπει να προσαρμόζονται (κατασκευαστικά) στις απαιτήσεις του συγκεκριμένου αισθητήρα. Στα πλαίσια της άποψης αυτής εντάσσεται και η κατασκευή ινών, που διατηρούν σταθερή την πόλωση της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας (π.χ. D - ίνα [8]) ή και ινών που αποκτούν ευαισθησία σε συγκεκριμέ-

νη παράμετρο (π.χ. συγκέντρωση H₂) με την προσθήκη κατάλληλης επένδυσης (στρώμα Pd/WO₃) [9]. Εντυπωσιακότερο παράδειγμα προς την κατεύθυνση αυτή αποτελούν οι ίνες με προσμίξεις σπάνιων γαιών στον πυρήνα τους, που χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών (όπως lasers οπτικών ινών, οπτικοί ενισχυτές κ.λπ.) και που στον τομέι των αισθητήρων χρησιμοποιούνται επιτυχώς στην ανάπτυξη κατανεμημένων αισθητήρων θερμοκρασίας [5].

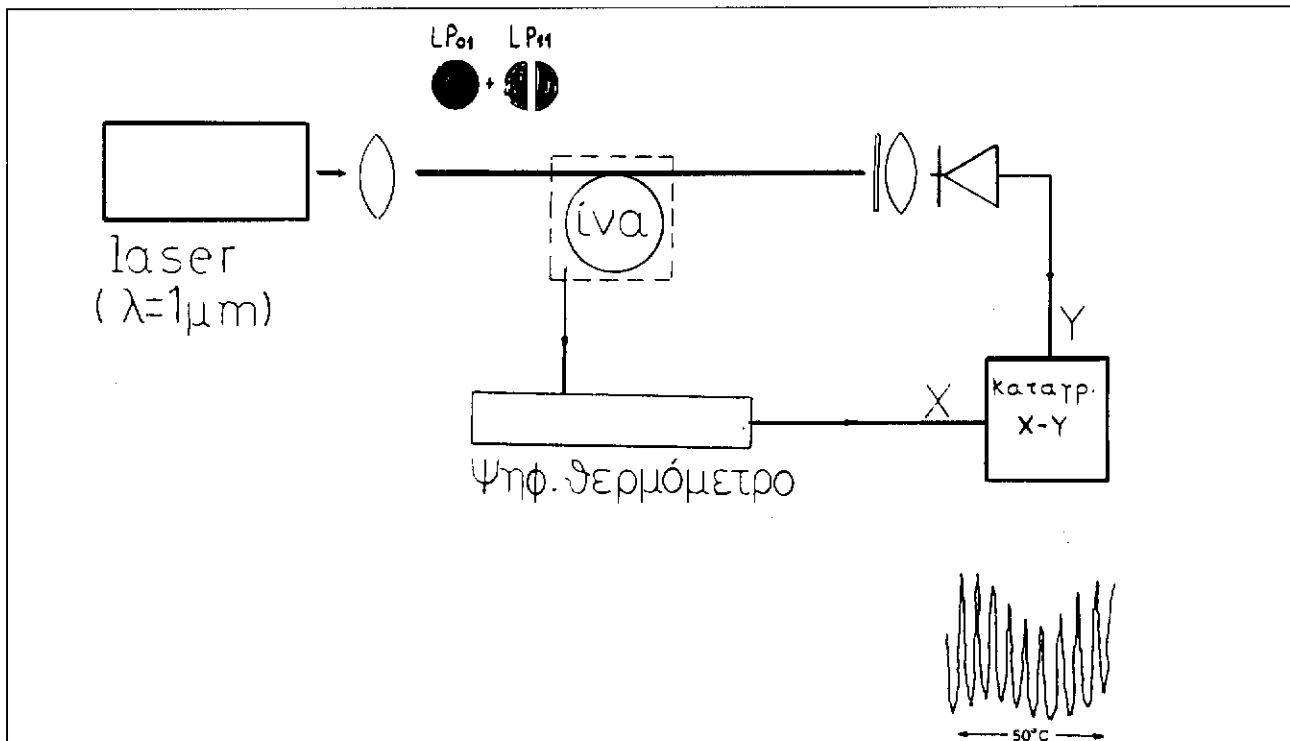
Η ύπαρξη αυστηρά καθορισμένης εγκατάστασης πόλωσης στην κυματοδηγούμενη ακτινοβολία είναι από τις κύριες απαιτήσεις που θέτονται κατά τη σχεδίαση συμβολομετρικών αισθητήρων. Σε αντίθετη περίπτωση, η διαφορά φωτεινότητας (contrast) των κροσσών συμβολής μειώνεται, ενώ, αν τύχει οι συμβαλλόμενες ακτίνες να έχουν κάθετες κατευθύνσεις πόλωσης, οι κροσσοί εξαφανίζονται εντελώς. Ας σημειωθεί ότι και σε περίπτωση επίτευξης ταυτόσημης πόλωσης στην είσοδο του συμβολομέτρου, η κατάσταση μπορεί να ανατραπεί λόγω των κατασκευαστικών ατελειών, που αναπόφευκτα παρουσιάζονται στις χρησιμοποιούμενες ίνες. Πιο συγκεκριμένα ο θεμελιώδης ρυθμός HE₁₁ μιας μονορρυθμικής ίνας αποτελείται από δύο κάθετες μεταξύ τους πολώσεις, που λόγω κατασκευαστικών ασυμμετριών διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα φάσης. Αυτό έχει σαν συνέπεια την εναλλαγή της πόλωσης (γραμμική - ελλειπτική) κατά απρόβλεπτο τρόπο μέσα στην κάθε οπτική ίνα.

Έχουν προταθεί διάφορες λύσεις στο πρόβλημα, από τις οποίες σημαντικότερες είναι οι διπλοθλαστικές ίνες, όπως η D - ίνα [8] (σχήμα 4.1) καθώς και ίνες με ειδική επένδυση (από ανισοτροπικό κρύσταλλο ή μεταλλική επίστρωση) που απορροφά τη μία από τις δύο κάθετες πολώσεις [10] (σχήμα 4.2).

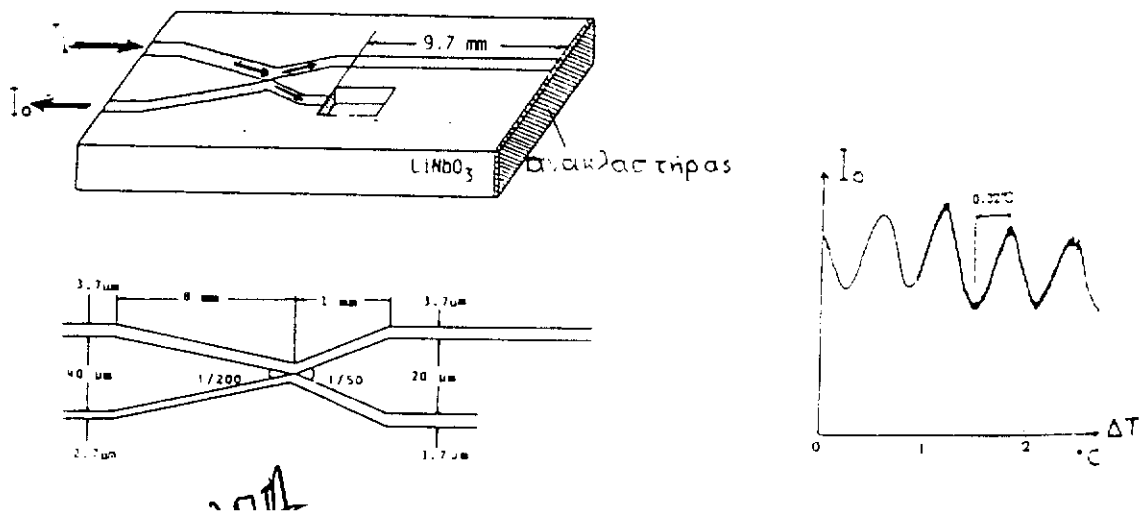
4.3. Λοιπά δομικά στοιχεία

Τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία των οπτικών αισθητήρων, δηλαδή οι πηγές, οι ανιχνευτές, οι κατευθυντήριοι συζεύκτες, οι διαμορφωτές κ.λπ. είναι δανεισμένα από την τεχνολογία των οπτικών επικοινωνιών και περιγράφονται εκτενώς στη βιβλιογραφία (π.χ. [7], [11]). Έτσι, σαν οπτικές πηγές χρησιμοποιούνται κυρίως οι δίοδοι εκπομπής (LEDs) τα "ογκώδη" lasers (He - Ne, Na Yag) και τα lasers ημιαγωγού, ενώ σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πηγές μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Οι δίοδοι εκπομπής χρησιμοποιούνται συνήθως σε συνδυασμό με πολυρρυθμικές ίνες καθώς και σε εφαρμογές με μέσες ή χαμηλές απαιτήσεις ευαισθησίας. Αντίθετα, σε συμβολομετρικούς αισθητήρες (που χρησιμοποιούν μονορρυθμικές ίνες) απαιτούνται lasers που παρέχουν υψηλότερη κατευθυντικότητα, μεγαλύτερη συμφωνία και αυστηρότερα καθορισμένο μήκος κύματος.

Οι κατευθυντήριοι συζεύκτες αποτελούν ένα πολύ βασικό δομικό στοιχείο των συμβολομετρικών αισθητήρων, που επιπλέον, λόγω της ευαισθησίας του φαινομένου σύζευξης σε μεταβολές του μήκους κύματος, προσφέρονται για την υλοποίηση διατάξεων πολυπλεξίας. Η βασική αρχή της επιλογής του μήκους κύματος φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 5.1. Συμβολομετρικός αισθητήρας θερμοκρασίας μιας ίνας δύο ρυθμών [12].



5.2. Συμβολομετρικός αισθητήρας θερμοκρασίας Michelson [13].

Ισχύει ότι

$$\Delta\lambda = \frac{\pi}{2} \left(L \frac{\theta K}{\theta \lambda} \right)^{-1} \quad (4.1)$$

όπου K ο συντελεστής σύζευξης και L το μήκος του συζεύκτη.

5. Περιγραφή συγκεκριμένων τύπων αισθητήρων οπτικών ινών

5.1. Γενικά

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται σε συντομία μερικοί αντιπροσωπευτικοί τύποι αισθητήρων οπτικών ι-

νών που επιλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία. Η επιλογή είναι ενδεικτική και αποσκοπεί κυρίως στην παρουσίαση της εφαρμογής των βασικών αρχών λειτουργίας σε πρακτικά συστήματα καθώς και στην καλύτερη εκτίμηση των δυνατοτήτων και περιορισμών της εν λόγω τεχνολογίας.

5.2. Αισθητήρες θερμοκρασίας

Στο σχήμα 5.1 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός συμβολομετρικού αισθητήρα θερμοκρασίας που αξιοποιεί τη συμβολή μεταξύ των ρυθμών LP01 και LP11 μιας τηλεπικοινωνιακής οπτικής ίνας. Η ίνα αυ-

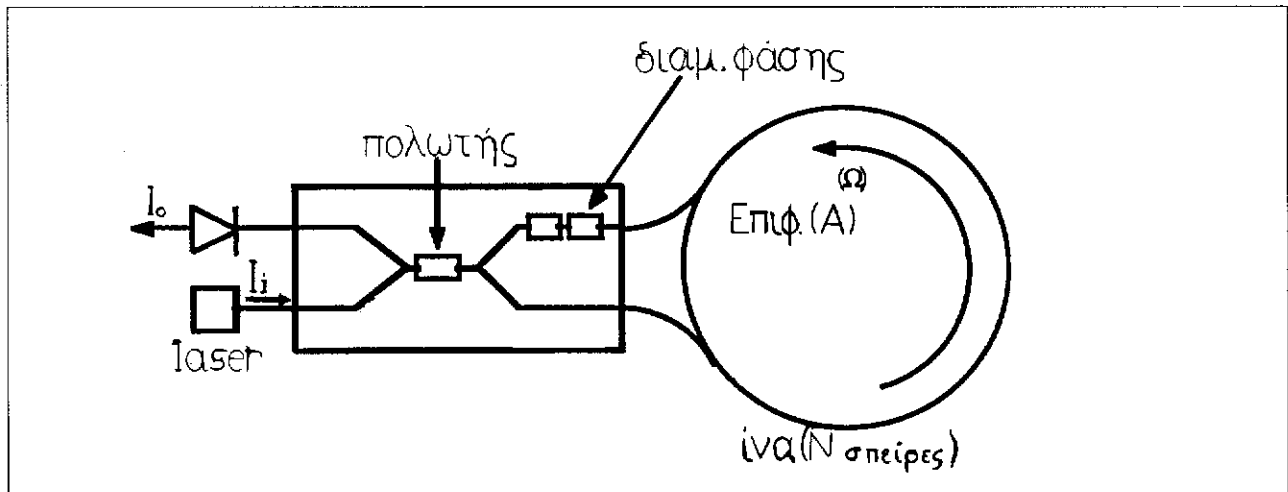
τή έχει επιλεγεί, έτσι ώστε να είναι μονορρυθμική στο μήκος κύματος 1.3 μm , ενώ το πείραμα διεξάγεται περίπου στο 1.0 μm . Μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος επάγουν μια ολίσθηση φάσης $\Delta\phi$, μεταξύ των δύο ρυθμών, που μετατρέπεται (στον ανιχνευτή) σε μεταβολές φωτεινής έντασης σύμφωνα με τη σχέση (3.3). Η ευαισθησία ενός τέτοιου συμβολομετρικού αισθητήρα είναι περίπου 0.4 $\text{rad}/^\circ\text{C}$ (περιοχή αίσθησης μήκους 1m) και είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη από τις αντίστοιχες διατάξεις Mach - Zehnder [12].

Το σχήμα 5.2 απεικονίζεται σχηματικά ένας συμβολομετρικός αισθητήρας Michelson, που έχει κατασκευαστεί με την τεχνική της ολοκληρωμένης οπτικής. Στον αισθητήρα αυτόν ο διαχωρισμός της δέσμης εισόδου καθώς και η συμβολή των ανακλώμενων ακτίνων πραγματοποιείται στο σημείο διασταύρωσης των κυματοδηγών. Η ευαισθησία του εν λόγω συμβολο-

από τις οποίες η μία χρησιμοποιεί μια οπτική ίνα τυλιγμένη σε πλαστικό κύλινδρο, ενώ η άλλη οπτική ίνα με ειδική επένδυση (σχήμα 5.4). Και στις δύο περιπτώσεις, η ύπαρξη ακουστικών κυμάτων δημιουργεί μηχανικές τάσεις στον κύλινδρο ή την ειδική επένδυση που μεταδίδονται στην οπτική ίνα. Οι τάσεις αυτές προκαλούν μεταβολές στη φάση της κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας, που μέσω ενός συμβολομετρικού αισθητήρα Mach - Zehnder, μετατρέπεται σε διαμόρφωση έντασης που συλλέγεται από τον ανιχνευτή. Η ευαισθησία τέτοιων συμβολομετρικών είναι της τάξης των $5,5 \times 10^{-4} \text{ rad}/\text{Pa}$ (για περιοχή αίσθησης μήκους 1m). [14]

5.5. Αισθητήρες μαγνητικού πεδίου

Οι αισθητήρες μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούν συμβολόμετρα Mach - Zehnder, που άποψη φιλοσοφίας σχεδίασης μοιάζουν με τα υδρόφωνα (ενότητα 5.4). Η ίνα αίσθησης είτε τυλίγεται σε κύλινδρο από



Σχήμα 5.3. Συμβολομετρικός αισθητήρας Sagnac.

μέτρου είναι περίπου 5 $\text{rad}/^\circ\text{C}$. [13].

5.3. Αισθητήρες περιστροφής (γυροσκόπια)

Η ανίχνευση περιστροφής γίνεται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα με συμβολομετρικούς αισθητήρες Sagnac (σχήμα 5.3). Δύο οπτικές δέσμες διαδίδονται σε αντίθετες διευθύνσεις και συμβάλλουν στην έξοδο. Η περιστροφή του βρόχου δημιουργεί μια διαφορά φάσης, μεταξύ των δύο αντίθετα διαδιδόμενων ακτίνων, η οποία είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής.

Ισχύει ότι

$$\Delta\phi = 8\pi N A \Omega / \lambda C \quad (5.1)$$

όπου N, A και Ω ο αριθμός σπειρών, η επιφάνεια και η ταχύτητα περιστροφής αντίστοιχα [3]

5.4. Αισθητήρες πίεσης ακουστικών κυμάτων (υδρόφωνα)

Μία από τις μεγαλύτερες περιοχές έρευνας, όσον αφορά στους συμβολομετρικούς αισθητήρες, είναι η ανίχνευση υποθαλάσσιων ακουστικών κυμάτων. Υπάρχουν δύο σχεδιαστικές προσεγγίσεις στο θέμα,

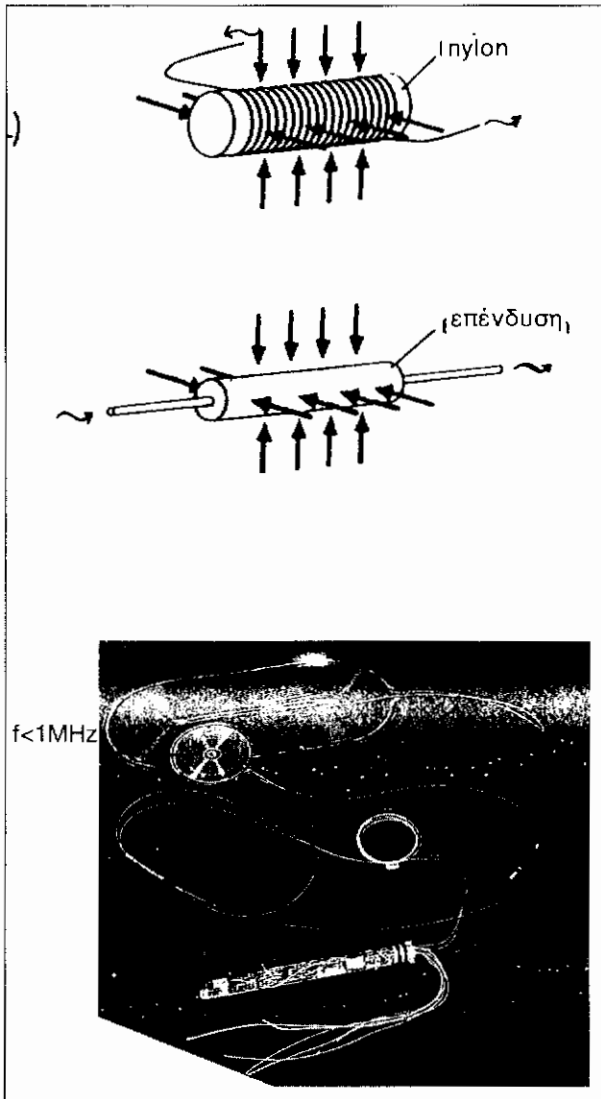
μεταλλικό γυαλί, είτε περιβάλλεται από επένδυση μαγνητικού υλικού. Υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου, επέρχονται μεταβολές στις διαστάσεις του κυλίνδρου ή της επένδυσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία μηχανικών τάσεων πάνω στην ίνα. Η ευαισθησία τέτοιων αισθητήρων είναι της τάξης των $3\pi T / \text{Hz}$ στα 10 Hz. [14]

5.6. Χημικοί αισθητήρες

Η αρχή λειτουργίας ενός αισθητήρα ανίχνευσης λυμάτων (εσωτερικής επίδρασης) φαίνεται στο σχήμα 5.5. Το περίβλημα έχει αφαιρεθεί από ένα τμήμα της οπτικής ίνας (περιοχή αίσθησης), έτσι ώστε σταγονίδια από τα λύματα να έρχονται σε απευθείας επαφή με τον πυρήνα.

Η διαφυγή κυματοδηγούμενης ακτινοβολίας, λόγω του ότι τα σταγονίδια έχουν μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης απ' ότι ο πυρήνας, προκαλεί μείωση της φωτεινής έντασης που είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης των λυμάτων.

Οι αισθητήρες αυτοί ήταν από τα πρώτα εμπορικά ε-



Σχήμα 5.4. (α) Οπτικές ίνες που χρησιμοποιούνται σε υδρόφωνα [14].

(i) Σε πλαστικό κύλινδρο (ii) Με επένδυση (β) Υδρόφωνο οπτικών ινών [6].

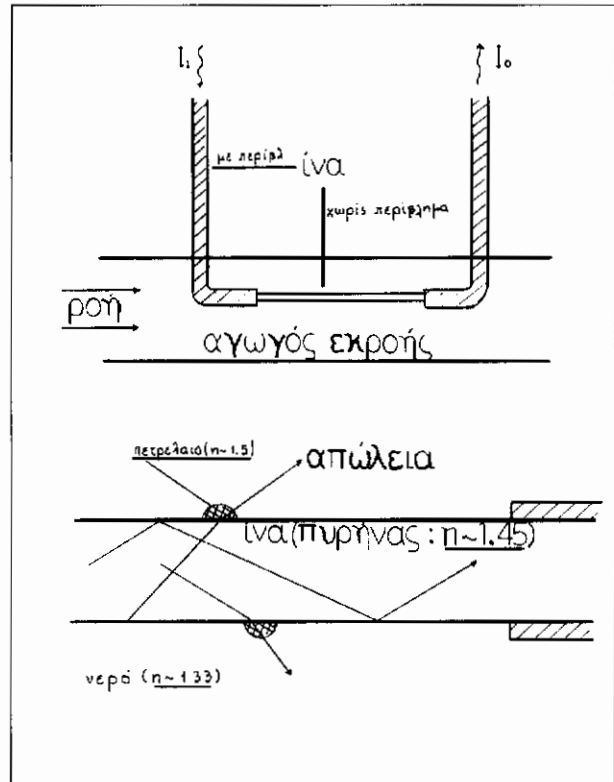
πιτυχημένα προϊόντα της νέας τεχνολογίας και τη δεκαετία του '80 εγκαταστάθηκαν σε 1.000 περίπου πλοία του βρετανικού ναυτικού. [3], [6].

Άλλοι χημικοί αισθητήρες οπτικών ινών παρακολουθούν μεταβολές του pH [15], της συγκέντρωσης υδρογόνου [9], της ποσότητας γλυκόζης στο αίμα κ.λπ.

6. Περιοχές εφαρμογής των αισθητήρων οπτικών ινών

6.1. Γενικές επισημάνσεις

Αν και οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν εμφανιστεί ως αυτόνομη περιοχή έρευνας, ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του '70 η εντύπωση είναι ότι υπάρχει αρκετός ακόμη δρόμος να διανυθεί προς την κατεύθυνση της ευρείας αποδοχής των αισθητήρων αυτών από τους κάθε λογής χρήστες. Κύριες προϋποθέσεις για κάτι τέτοιο είναι (α) η παροχή σαφών τεχνικών ή/και οικονομικών πλεονεκτημάτων σε μια συγκεκρι-



Σχήμα 5.5. Χημικός αισθητήρας ανίχνευσης λυμάτων [3].

μένη περιοχή εφαρμογής (β) η επίλυση όλων των επιμέρους τεχνικών προβλημάτων στην πράξη και (γ) η πραγματοποίηση πριν από τη διάθεση του προϊόντος, αξιόπιστων δοκιμών, ώστε να υπερνικηθούν οι διαταγμοί εκείνου που προτίθεται να χρησιμοποιήσει την καινούργια τεχνολογία. Ένα από τα πρώτα παραδείγματα ικανοποίησης των πιο πάνω προϋποθέσεων ήταν εγκατάσταση, στις αρχές της δεκαετίας του '80, σε 1.000 περίπου βρετανικά εμπορικά πλοία, αισθητήρων οπτικών ινών για την παρακολούθηση των λυμάτων του [3], [6]. Τέλος, μια καλή κίνηση προς την κατεύθυνση της εγκαθίδρυσης της νέας τεχνολογίας στην αγορά είναι και η επισήμανση νέων περιοχών εφαρμογής, στις οποίες οι εναλλακτικές (συμβατικές) τεχνολογίες προσφέρουν λίγα ή και κανένα πλεονέκτημα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι καταναμεμημένοι αισθητήρες (ενότητα 3.3), των οποίων η κατασκευή είναι σχεδόν αδύνατη με άλλες τεχνολογίες και οι οποίοι με την ατρωσία τους έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών αποτελούν την ιδεωδέστερη λύση για συστήματα αισθητήρων σε πλοία και αεροπλάνα.

Ανεξάρτητα από τα επιμέρους τεχνικά προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν οι ασχολούμενοι με την τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών, είναι γεγονός ότι οι ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα αυτόν έχουν ενταθεί σημαντικά, και με πολύ καλά αποτελέσματα, τα τελευταία χρόνια. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τη διετία 1986-87 έγιναν (σε παγκόσμιο επίπεδο) 530 σχετικές δημοσιεύσεις από τις οποίες ένα

Πίνακας 6.1. Δημοσιεύσεις σχετικές με αισθητήρες οπτικών ινών, 1986-87 [7]

Χώρα	Βιομηχανικές δημοσιεύσεις	Παν/μιακές δημοσιεύσεις	Σύνολο
Ηνωμ. Βασ.	69	118	187
Η.Π.Α.	52	79	131
Ιαπωνία	48	58	106
Γερμανία	16	23	39
Ιταλία	-	20	20
Γαλλία	11	4	15
Ελβετία	3	9	12
Σουηδία	7	5	12
Ολλανδία	1	7	8

Πίνακας 6.2. Κατασκευαστές αισθητήρων οπτικών ινών, 1986-87 [7]

Χώρα	Κατασκευαστές
Η.Π.Α.	120
Ηνωμ. Βασ.	38
Ιαπωνία	33
Γαλλία	6
Γερμανία	5
Ελβετία	5
Βέλγιο	2
Φιλανδία	2
Σουηδία	2

Πίνακας 6.3. Μερικές εφαρμογές των αισθητήρων οπτικών ινών στην ιατρική

Τύπος αισθητήρα	Εφαρμογές
Θερμοκρασίας	Υπερθερμία Παρακολούθηση καρδιάς Θερμικές βλάβες ιστών
Πίεσης	Αρτηριακή πίεση Κρανιακή πίεση
pH, O ₂ , pO ₂	Αναπνευστικά προβλήματα Οξυγόνωση αίματος και ιστών

ποσοστό 40% προήλθε από τη βιομηχανία (πίνακας 6.1), όπου καταμετρήθηκαν 213 κατασκευαστές αισθητήρων οπτικών ινών (πίνακας 6.2) [7]. Τέλος οι αισθητήρες οπτικών ινών περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα τυποποίησης της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC) για το 1993 [16].

6.2. Οι κύριες περιοχές εφαρμογής

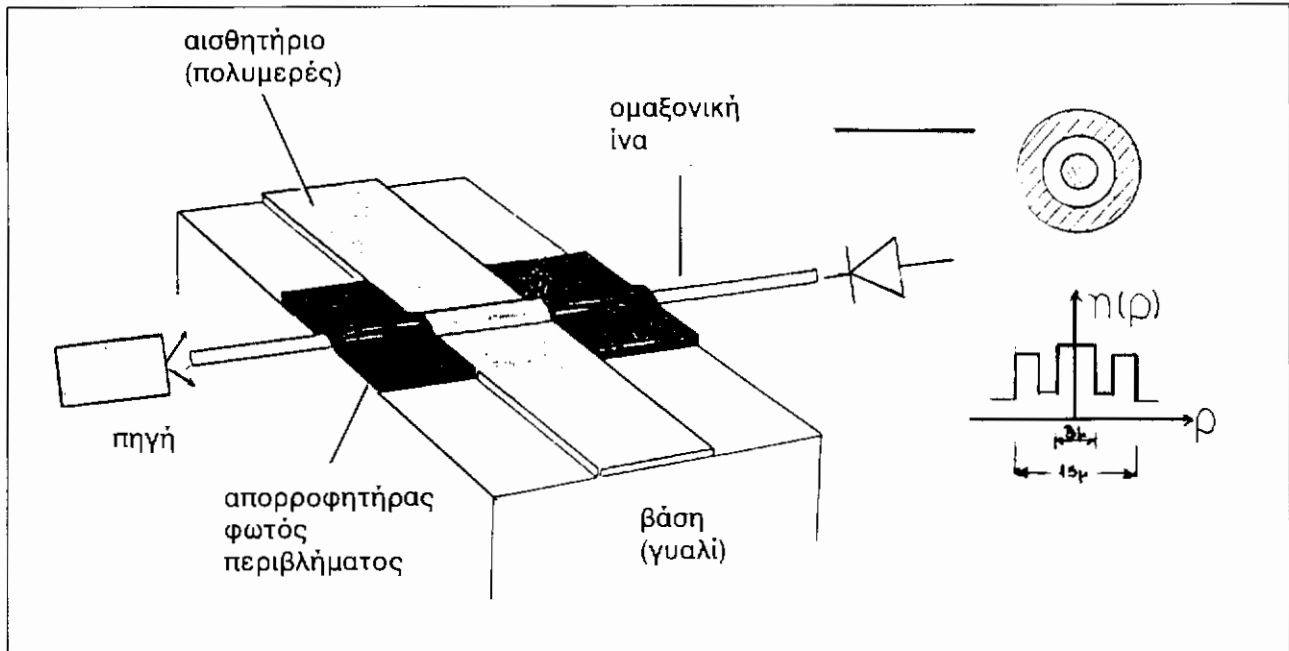
Η αεροδιαστημική βιομηχανία αναμένεται στο εγγύς μέλλον να είναι ένας από τους σημαντικότερους χρήστες αισθητήρων οπτικών ινών. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, κύρια αιτία γι' αυτό είναι η δυνατότητα κατασκευής κατανεμημένων αισθητήρων με αυξημένη ατρωσία έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και με μικρό όγκο και βάρος. Κύριες περιοχές εφαρμογής είναι το σύστημα ελέγχου πτήσης, το σύστημα πλοήγησης (π.χ. γυροσκοπία και αισθητήρες επιτάχυνσης), αλλά ιδιαίτερα ο έλεγ-

χος της κατάστασης του κινητήρα (δυσχερής με αισθητήρες άλλης τεχνολογίας) καθώς και ο εντοπισμός αστοχιών και κόπωσης στα χρησιμοποιούμενα υλικά [7].

Ανάλογα προβλήματα με την αεροδιαστημική συναντώνται και στη ναυπηγική τεχνολογία. Και εδώ η ανάγκη για κατανεμημένους αισθητήρες είναι εμφανής (σχήμα 3.8.γ), ενώ ήδη χρησιμοποιούνται με επιτυχία αισθητήρες παρακολούθησης της συγκέντρωσης λυμάτων (σχήμα 5.5) και υδρόφωνα οπτικών ινών (σχήμα 5.4). Τα τελευταία έχουν κάνει την εμφάνισή τους και σε πλοία που διεξάγουν έρευνες για την ανακάλυψη αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικών αερίων. [17]

Στα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν μέχρι σήμερα περιορισμένη εφαρμογή, αν και με τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν αναμένεται να κάνουν αισθητότερη την παρουσία τους στο μέλλον. Σε τέτοια συστήματα, οι αισθητήρες μπορεί να είναι τοποθετημένοι σε σημείο με δύσκολη πρόσβαση (άρα πρέπει να παρουσιάζουν μεγάλο μέσο χρόνο μεταξύ βλαβών), πρέπει να διαθέτουν ισχυρή μόνωση (λόγω του εξαιρετικά "θορυβώδους" περιβάλλοντος) και να λειτουργούν με χαμηλή ισχύ. Το αποτέλεσμα είναι οι περισσότεροι ηλεκτρικοί αισθητήρες να είναι ογκώδεις και ακριβοί. Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να λυθούν με τη χρήση αισθητήρων οπτικών ινών, όμως παρά τη μέχρι σήμερα εντατική έρευνα και την ανάπτυξη αισθητήρων ηλεκτρικού πεδίου, μαγνητικού πεδίου, ρεύματος, τάσης και εντοπισμού βλαβών [7] οι αισθητήρες αυτοί είναι ευαίσθητοι σε ανεπιθύμητες εξωτερικές παραμέτρους (θερμοκρασία και κραδασμούς) και χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος.

Ο τομέας με την ευρύτερη μέχρι σήμερα χρήση αισθητήρων οπτικών ινών είναι η βιοχημεία και η ιατρική. Εδώ οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ενός μεγάλου αριθμού βιοχημικών και φυσικών παραμέτρων (πίνακας 6.3), ενώ δέσμες οπτικών ινών χρησιμοποιούνται ήδη από τη δεκαετία του '60 για την κατασκευή ενδοσκοπίων και πιο πρόσφατα για τη μεταφορά ακτινοβολίας laser για διαγνωστικούς, θεραπευτικούς και χειρουργικούς σκοπούς. Κύρια πλεονεκτήματα, που αξιοποιούνται εδώ είναι το μικρό μέγεθος των αισθητήρων που πα-



Σχήμα 5.6. Αισθητήρας pH [15].

ρέχει τη δυνατότητα για ενδοσωματικές εξετάσεις, καθώς και η ηλεκτρική και χημική ατρωσία των οπτικών ινών. Η χρήση των αισθητήριων αυτών αναμένεται να διευρυνθεί σημαντικά, όταν λυθούν κάποια τεχνικά προβλήματα, κυριότερα από τα οποία είναι η σταδιακή απώλεια της χημικής σταθερότητας των αισθητήριων, η μειωμένη ταχύτητα απόκρισης και η χαμηλή επαναληπτικότητα των διαδικασιών κατασκευής τους.

7. Επίλογος - συμπεράσματα

Στο παρόν ενημερωτικό άρθρο επιχειρήθηκε μια συνοπτική παρουσίαση των αισθητήριων οπτικών ινών, που εκμεταλλεύονται την ευαισθησία της φωτεινής διάδοσης στις μεταβολές εξωτερικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η πίεση. Οι αισθητήρες αυτοί διακρίνονται μεταξύ άλλων για την ατρωσία τους έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, την ασφάλεια στη χρήση τους, το μικρό βάρος τους και την υψηλή τους ευαισθησία. Η χρήση τους καλύπτει ένα ευρύ φάσμα περιοχών (όπως η αεροδιαστημική και ναυπηγική τεχνολογία, τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η βιοχημεία και η ιατρική), ενώ στο μέλλον αναμένεται να διευρυνθεί, με την επίλυση στην πράξη ορισμένων τεχνικών προβλημάτων και την περαιτέρω μείωση του κόστους των συστημάτων.

Αφού αναπτύχθηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας των διαφόρων τύπων αισθητήριων οπτικών ινών, έγινε μια σύντομη παρουσίαση των κύριων δομικών στοιχείων που απαρτίζουν έναν τέτοιο αισθητήρα. Από αυτά κεντρικό ρόλο παίζει η οπτική ίνα, της οποίας η σύνθεση (προσαρμοσμένη τις περισσότερες φορές στις απαιτήσεις του αισθητήρα) προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες και τις επιδόσεις του αισθητήρα.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε επιλεκτικά ένας αριθ-

μός αισθητήριων οπτικών ινών. Αν και η παρουσίαση δεν είναι πλήρης (ο αριθμός των αισθητήριων που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικό επίπεδο και επίπεδο ανάπτυξης είναι πολύ μεγάλος), μέσα από αυτή γίνεται μια προσπάθεια να εκτιμηθούν καλύτερα τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί του εν λόγω τεχνολογικού πεδίου.

Αν και οι προοπτικές χρήσης αισθητήριων οπτικών ινών διαγράφονται εξαιρετικά ευοίωνες, πρέπει να λυθούν ορισμένα πρακτικά προβλήματα, πριν οι αισθητήρες αυτοί γίνουν ευρύτερα αποδεκτοί από τους κάθε λογής χρήστες. Σημαντική ώθηση προς την κατεύθυνση αυτή αναμένονται να δώσουν, εκτός των άλλων, η περαιτέρω ανάπτυξη καταναμημένων αισθητήριων, η υιοθέτηση μεθόδων πολυπλεξίας (π.χ. μήκους κύματος) καθώς και η χρήση των τεχνικών της ολοκληρωμένης οπτικής.

Βιβλιογραφία

- [1] Attridge J.W et al, Coaxial Fibre Sensors, JLT, 1985, 1084-1091
- [2] Cozens J.R., Gu Y., Special Fibres for Sensing, SPIE, Vol 1011, 1988, 38-45
- [3] Pitt G.D. et al, Optical Fibre Sensors, IEE Proc., Part J, 1985, 214-248
- [4] Dandridge A., Kersey A.D., Overview of Mach - Zehnder Sensor Technology and Applications, SPIE, Vol 985, 1988, 34-52
- [5] Rogers A.J., Distributed Optical Fibre Sensors, J. Appl. Phys., 1986, 2237-2255
- [6] Giallorenghi T.G. et al, Optical Fibre Sensors, IEEE Spectrum, 1986, 44-49
- [7] Dakin J, Culshaw B., Optical Fibre Sensors, Artech House Inc, 1988



Σχήμα 6.1. Σεισμική ανάλυση για το μαύρο χρυσό [17].

- [8] Dyott R.B., Schrank P.F., Self-locating Elliptically Cored Fibre With Accessible Guiding Region, Electron Lett., Vol 18, 1982, 980-981
- [9] Nishizawa K. et al, Waveguide Type Hydrogen Sensor, Europ. Conf. on Opt. Commun, 99-102
- [10] Bergh R.A et al, Single-mode Fibre-optic Polarizer, Opt. Lett., 1980, 479-481
- [11] Senior J.M., Optical Fibre Communications, Prentice-Hall, 1985
- [12] McMillan J.L and Robertson S.C., Single - mode Optical Fibre Sensors, GEC J. of Research, 1984, 119-124
- [13] Izutsu M. et al, Integrated Optic Temperature and Humidity Sensors, JLT, 1986, 833-836
- [14] Kersey A.D., Dandridge A., Applications of Fibre - optic Sensors, IEEE Trans on Comp., Hybrids and Manuf. Tech., 1990, 137-143
- [15] Attridge J.W. et al, Design of a Fibre - optic pH Sensor, J. Phys. E., 1987, 548-553
- [16] IEC Yearbook 1993, SC 86C
- [17] Σεισμική ανάλυση για το Μαύρο χρυσό, Εφημ. "Το Βήμα", 1-9-91, Β20