ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΜΕ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΜΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΛΕΙΤΣΙΩΤΗ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ 2023

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 4

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 6

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 6

1.1. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ 7

1.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ 8

1.2.1. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ 9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 11

ΘΕΩΡΙΑ 11

2.1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ 11

2.1.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ 13

2.2 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΜΕ ΦΡΑΓΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΜΑΚΡΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ (ΦΜΠ) 15

2.2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΦΜΠ 15

2.2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΦΡΑΓΜΑ 20

2.2.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΜΑΚΡΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ (ΦΜΠ) 22

2.3. ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΦΜΠ 25

2.4. ΤΟ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ (CuO) ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ 26

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 28

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ 28

3.1. ΕΓΓΡΑΦΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΜΑΚΡΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ 28

3.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ 32

3.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ 33

3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ 37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 39

ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ 39

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 39

4.1 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΜΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ 39

4.1.1 ΜΕΘΑΝΟΛΗ 39

4.1.2. ΑΙΘΑΝΟΛΗ 42

4.1.3. ΑΚΕΤΟΝΗ 44

4.1.4. ΙΣΟΠΡΟΠΑΝΟΛΗ 46

4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ CuO 49
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ/ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ 53
Αναφορές 54

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας αναλαμβάνοντας είτε καίριο πρακτικό είτε επικουρικό ρόλο. Ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω στην Δρ. Κωνσταντάκη Μαρία για την ευκαιρία που μου προσέφερε, ως υπεύθυνη της παρούσας πτυχιακής. Είμαι ευγνώμων για τη συνεργασία μας, την καθοδήγηση, τις ωφέλιμες υποδείξεις και προτροπές της, καθώς χάρις αυτών η εργασία που ακολουθεί έλαβε την τελική της μορφή. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρ. Μανώλη Γκαγκαουδάκη και Δρ. Βασίλη Μπίνα για την ανάπτυξη της επίστρωσης οξειδίου του χαλκού, στον οποίο στηρίζεται η εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Πισσαδάκη Σταύρο και όλα τα μέλη του εργαστηρίου του, για τις πολύτιμες συμβουλές και την προθυμία τους για συζήτηση κι επίλυση ζητημάτων κατά την πραγματοποίηση της έρευνας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου κι όλους τους δικούς μου ανθρώπους, των οποίων η υπομονή και κατανόηση υπήρξε κινητήριος δύναμη κατά τη συγγραφή της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αισθητηρίου οπτικών ινών με επίστρωση οξειδίου του χαλκού, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση ατμών πτητικών ενώσεων.

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds -VOC's) έχουν κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή τάση ατμών σε θερμοκρασία δωματίου, που έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη εξάτμιση τους. Συναντώνται σε ένα μεγάλο εύρος προϊόντων, όπως είναι, οι βαφές, τα καύσιμα, ο καπνός του τσιγάρου κ.α. Επίσης έχουν συνδεθεί με αναπνευστικές και αλλεργικές επιπτώσεις στους ανθρώπους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω αναγραφόμενα, από τα οποία προκύπτει η σπουδαιότητα των πτητικών οργανικών ενώσεων, καθίσταται σαφές η αναγκαιότητα ανάπτυξης αξιόπιστων αισθητηρίων.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε αισθητήριο οπτικών ινών με επίστρωση CuO για ανίχνευση πτητικών ενώσεων και συγκεκριμένα μεθανόλης, αιθανόλης, ισοπροπανόλης και ακετόνης. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν αισθητήρια οπτικών ινών με φράγμα περίθλασης μακράς περιόδου (ΦΜΠ) και με διαφορετικά πάχη οξειδίου του χαλκού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα ο άνθρωπος χρησιμοποιεί το φως με σκοπό την επικοινωνία και την μετάδοση πληροφορίας. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει καταφέρει να βελτιώσει τους δύο αυτούς τομείς.

Η ανακάλυψη και η εφαρμογή των οπτικών ινών έγινε στις αρχές του 1960 με απώτερο σκοπό τη μετάδοση εικόνας. Όμως, το πρόβλημα εκείνης της εποχής, το οποίο εμπόδιζε τις οπτικές ίνες από το να γίνουν ευρέως αξιοποιήσιμες, ήταν οι υψηλές απώλειες που εμφάνιζαν. Πιο συγκεκριμένα, οι οπτικές ίνες εμφάνιζαν απώλειες της τάξεως των 1000 dB/km[1].

Τον Αύγουστο του 1970 κατασκευάστηκε από την εταιρεία Corning η πρώτη ίνα με μειωμένες απώλειες. Συγκεκριμένα, η ίνα εμφάνιζε εξασθένηση της τάξεως των 17 dB/km. Μόλις 2 χρόνια αργότερα, η ίδια εταιρεία μείωσε τις απώλειες στα 4 dB/km χρησιμοποιώντας προσμίξεις γερμανίου σε ίνα πυριτίου. Το γεγονός αυτό έφερε επανάσταση στο τομέα των τηλεπικοινωνιών καθώς η οπτική ίνα μπορούσε να μεταφέρει πολύ περισσότερη πληροφορία από το υπάρχων καλώδιο χαλκού[2]. Η εξέλιξη των φωτονικών υλικών οδήγησε σε πολλές εφαρμογές των οπτικών ινών. Έτσι, στα μέσα του 1960 έκανε την πρώτη εμφάνιση της η τεχνολογία των αισθητηρίων οπτικών ινών.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας μελετήθηκε η ανάπτυξη αισθητηρίου οπτικών ινών με φράγμα περίθλασης μακράς περιόδου (ΦΜΠ) για την ανίχνευση ατμών πτητικών ενώσεων. Η ευαισθησία στους ατμούς πτητικών ενώσεων επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη επίστρωσης οξειδίου του χαλκού CuO στην επιφάνεια της ίνας στην περιοχή του ΦΜΠ. Χρησιμοποιώντας την τεχνική καθοδικού διασκορπισμού (sputtering) επιστρώσεις διαφορετικού πάχους εναποτέθηκαν στην εξωτερική επιφάνεια του ΦΜΠ ώστε να συσχετιστεί το πάχος της επίστρωσης με την απόκριση του αισθητηρίου.

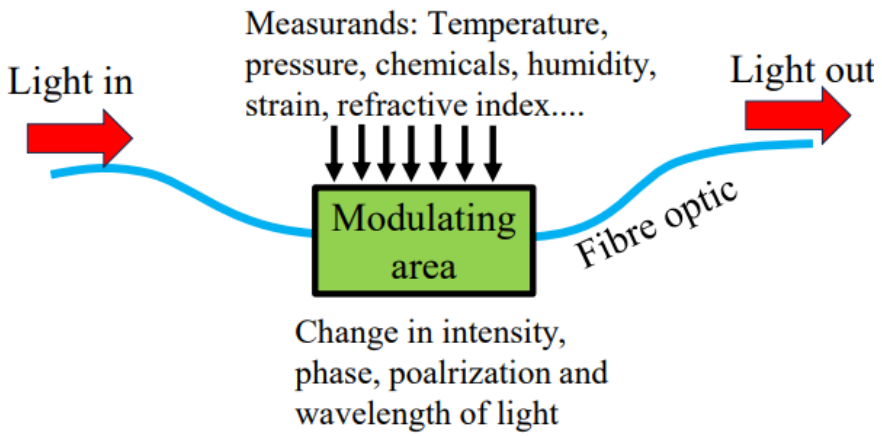
Οι πτητικές ενώσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεθανόλη, αιθανόλη, ακετόνη και ισοπροπανόλη που έχουν εφαρμογές σε μια μεγάλη ποικιλία προϊόντων. Η μεθανόλη εφαρμόζεται κυρίως ως βιομηχανικός διαλύτης για παραγωγή προϊόντων, η ισοπροπανόλη στη παραγωγή καλλυντικών, η ακετόνη ως διαλύτης και βερνίκι αυτοκινήτων και η αιθανόλη ως διαλύτης στη παραγωγή άλλων οργανικών ενώσεων.

1.1. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Το φως που ταξιδεύει στο εσωτερικό της ίνας χαρακτηρίζεται από τους εξής τέσσερις (4) παράγοντες:

- ένταση,
- φάση,
- πλάτος και
- πόλωση.

Η ανίχνευση διαφόρων φυσικών ποσοτήτων (υγρασία, θερμοκρασία, πίεση κ.α.) βασίζεται σε αλλαγές που μπορεί να υποστούν οι τέσσερις (4) παράγοντες που αναφέρθηκαν και πιο πάνω. Ο μηχανισμός ανίχνευσης που θα επιλεχθεί σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από την προς μετρούμενη ποσότητα και τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής[4].



Εικόνα 1: Αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας των οπτικών *ινών*[4]

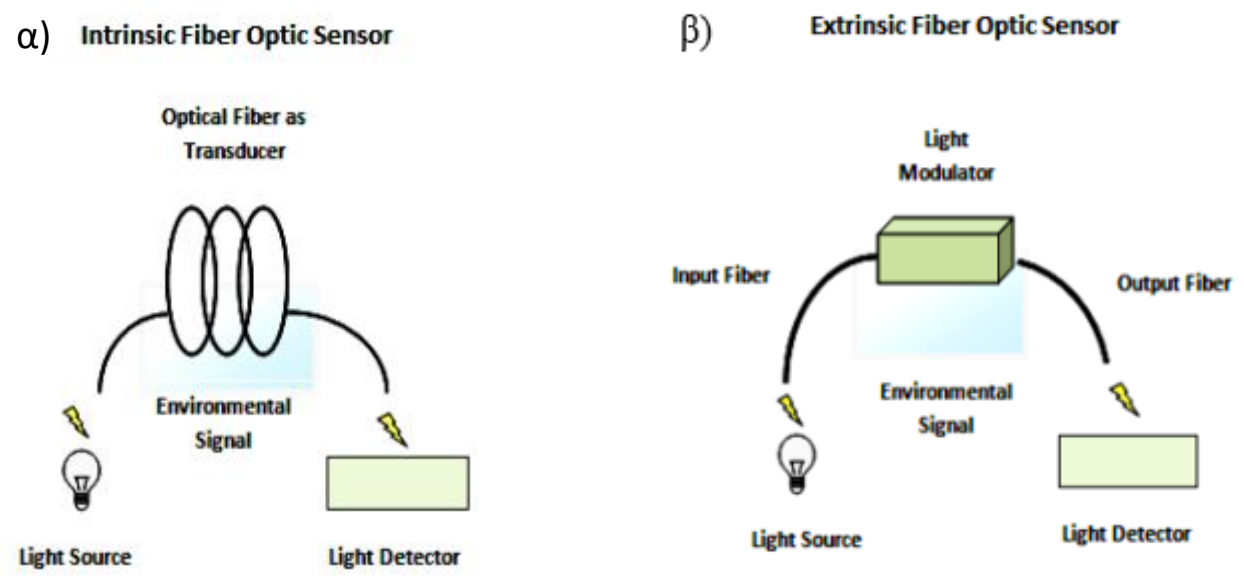
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, ένα σύστημα αισθητηρίου οπτικών ινών αποτελείται από μια πηγή φωτός (LED, λέιζερ), μια οπτική ίνα, μια καθορισμένη περιοχή στην οποία το φως που διαδίδεται στην ίνα θα αλληλεπιδράσει με τις εξωτερικές μετρούμενες παραμέτρους, και έναν ανιχνευτή (οπτικός αναλυτής φάσματος ή ανιχνευτής φωτός).

Οι αισθητήρες των οπτικών ινών χωρίζονται σε δύο (2) κατηγορίες:

- στους ενδογενείς και
- στους εξωγενείς.

Στη περίπτωση των ενδογενών αισθητηρίων, η οπτική ίνα τροποποιείται (πχ, αλλάζοντας περιοδικά το δείκτη διάθλασης ή επικαλύπτοντας την ίνα) έτσι ώστε η προς μετρούμενη ποσότητα να αλλάξει την ένταση, την πόλωση, τη φάση, το μήκος κύματος ή το χρόνο διάδοσης του φωτός που διαδίδεται στην οπτική ίνα (Εικόνα

2α). Επίσης, το φως παραμένει στο εσωτερικό της ίνας.
Αντιθέτως στη περίπτωση των εξωγενών αισθητηρίων (Εικόνα 2β), το φως βγαίνει από την ίνα, φτάνει στη περιοχή ανίχνευσης και επιστρέφει στο εσωτερικό της.



Εικόνα 2:α) Ενδογενείς αισθητήριο, β) Εξωγενείς αισθητήριο[5]

Οι αισθητήρες οπτικών ινών ανταγωνίζονται τους συμβατικούς αισθητήρες λόγω των ποικίλων χαρακτηριστικών τους, όπως είναι το μικρό τους μέγεθος και βάρος. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των αισθητήρων είναι πως μπορούν να φτάσουν σε απρόσιτα σημεία[4]. Επιπλέον χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευαισθησία όσον αφορά την ανίχνευση μεταβολών, αντοχή ακόμα και σε ακραίες εξωτερικές συνθήκες όπως η υψηλή θερμοκρασία και πίεση και από το ότι παραμένουν ανεπηρέαστες παρουσία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

1.2. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ

Οι έρευνες για αισθητήρες πτητικών ενώσεων με χρήση οπτικών ινών ξεκίνησαν τη δεκαετία του 80. Οι πτητικές ενώσεις επηρεάζουν άμεσα τόσο την ανθρώπινη υγεία (ερεθισμούς, ναυτίες, καταπόνηση του κεντρικού νευρικού συστήματος κ.α.) όσο και το περιβάλλον καθώς σχηματίζουν όζον σε χαμηλό υψόμετρο όταν συνδυάζονται με οξείδια του νατρίου[6].

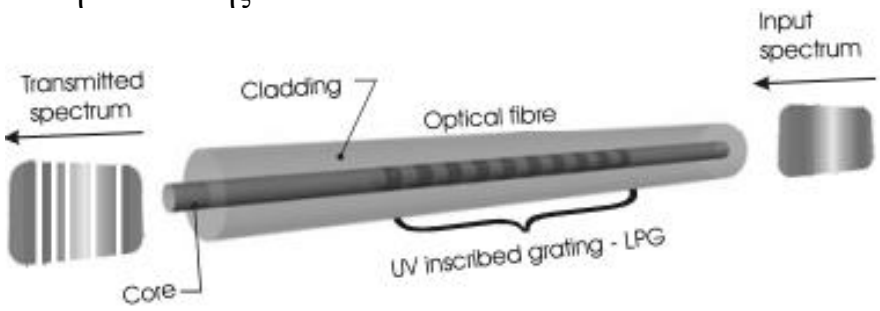
Το γεγονός αυτό έχει ωθήσει την έρευνα γύρω από τους αισθητήρες πτητικών ενώσεων με τη χρήση οπτικών ινών. Μερικά παραδείγματα που έχουν επιδείξει σημαντικά αποτελέσματα είναι οι αισθητήρες ΦΜΠ με επίστρωση νανοράβδων οξειδίου του ψευδαργύρου για την ανίχνευση αιθανόλης και με επίστρωση ινωδοΐνης του μεταξιού για την ανίχνευση μεθανόλης.

Ο αισθητήρας με επίστρωση ινωδοΐνης του μεταξιού εμφάνισε ευαισθησία, στη μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος της ζώνης εξασθένισης, της τάξεως των 0.22 nm/mbar για πίεση στο εύρος των 80-100 mbar.
Από τα αποτελέσματα του ΦΜΠ με διαφορετικές επιστρώσεις νανοράβδων οξειδίου του ψευδαργύρου βγαίνει το συμπέρασμα ότι η φασματική απόκριση του συγκεκριμένου ΦΜΠ εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά και το πάχος της επίστρωσης[7,8].

1.2.1. ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

Μια μεγάλη κατηγορία αισθητηρίων οπτικών ινών, η οποία εξετάστηκε και στο συγκεκριμένο πείραμα, είναι αυτή των αισθητήρων φράγματος περίθλασης οπτικών ινών.
Το κοινό χαρακτηριστικό των αισθητήρων φραγμάτων περίθλασης είναι ότι έχουν μια περιοδική αλλαγή στο δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Οι εν λόγω αισθητήρες χωρίζονται σε οπτικές ίνες με φράγμα περίθλασης μακράς περιόδου (Εικόνα 3) και οπτικές ίνες με φράγμα περίθλασης Bragg.

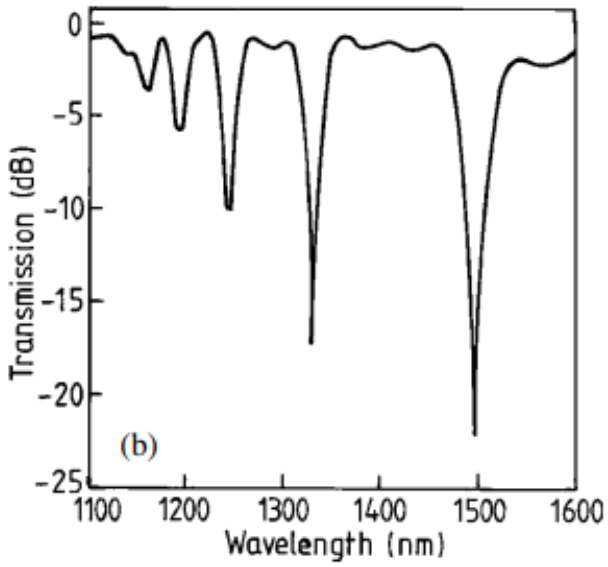
Η περιοδική αλλαγή στο δείκτη διάθλασης του πυρήνα μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Ο πιο διαδεδομένος είναι η περιοδική έκθεση του πυρήνα σε UV ακτινοβολία. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι αυτή που επιφέρει την αλλαγή στον δείκτη διάθλασης.



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση ενός ΦΜΠ[16]

Λόγω της περιοδικής αλλαγής του δείκτη διάθλασης (που κυμαίνεται από 1 μm ως 1 mm) ο οπτικός τρόπος μετάδοσης του πυρήνα συζεύγνται με τους οπτικούς τρόπους μετάδοσης του περιβλήματος. Η υψηλή εξασθένηση των οπτικών τρόπων μετάδοσης στο περίβλημα προκαλεί ζώνες εξασθένησης (attenuation bands) στο φάσμα διέλευσης του διαδιδόμενου φωτός (Εικόνα 4). Κάθε ζώνη εξασθένησης αντιστοιχεί σε σύζευξη του τρόπου μετάδοσης στον πυρήνα με διαφορετικό τρόπο μετάδοσης στο περίβλημα[16].

Εξωτερικοί παράμετροι (πχ, θερμοκρασία, πίεση, ακτινοβολία) που μεταβάλουν την περίοδο ή το δείκτη διάθλασης του ΦΠΜ προκαλούν μεταβολές στην ένταση και στο μήκος κύματος των ζωνών εξασθένησης και μπορούν να ανιχνευθούν. Επίσης με τη χρήση ευαίσθητων υλικών ως επιστρωμάτων μπορεί να γίνει στοχευμένη ανίχνευση αερίων και στοιχείων. Το επίστρωμα επηρεάζει τους οπτικούς τρόπους μετάδοσης στο περίβλημα και κατ' επέκταση τη συνθήκη αντιστοίχισης φάσης. Τέλος, το πάχος, το μέγεθος και το πορώδες των υλικών που εναποτίθενται είναι πολύ σημαντικά καθώς επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα όπως είναι η ευαισθησία, η επαναληψιμότητα και οι χρόνοι απόκρισης[3].



Εικόνα 4: Φάσμα διέλευσης σε ένα ΦΜΠ[16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΙΑ

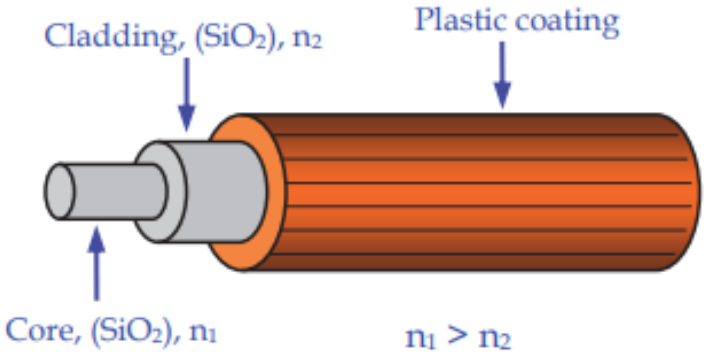
2.1. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτοί κυματοδηγοί κυλινδρικού σχήματος μέσω των οποίων μεταφέρεται πληροφορία με τη βοήθεια του φωτός. Το φως που ταξιδεύει στο εσωτερικό τους προέρχεται είτε από μια πηγή λέιζερ είτε από μια λυχνία LED. Το πιο συνηθισμένο υλικό κατασκευής τους είναι το γυαλί και το πλαστικό, ενώ η διάμετρος τους κυμαίνεται από 8 μm έως μερικά χιλιοστά.

Η οπτική ίνα αποτελείται από τρία (3) τμήματα (Εικόνα 5):

- τον πυρήνα (core),
- τον περίβλημα (cladding)
- το πλαστικό επίστρωμα (coating)

Ο πυρήνας είναι μια γυάλινη κυλινδρική ράβδος μέσω της οποίας το φως διαδίδεται. Το περίβλημα καλύπτει τον πυρήνα και είναι κατασκευασμένο από διηλεκτρικό υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης από αυτό του πυρήνα ($n_2 < n_1$). Λόγω της διαφοράς στο δείκτη διάθλασης, το φως ανακλάται πλήρως και παραμένει στο εσωτερικό του πυρήνα. Τέλος, το πλαστικό επίστρωμα προστατεύει την ίνα από εξωτερικούς παράγοντες.



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση της δομής μιας οπτικής ίνας[9]

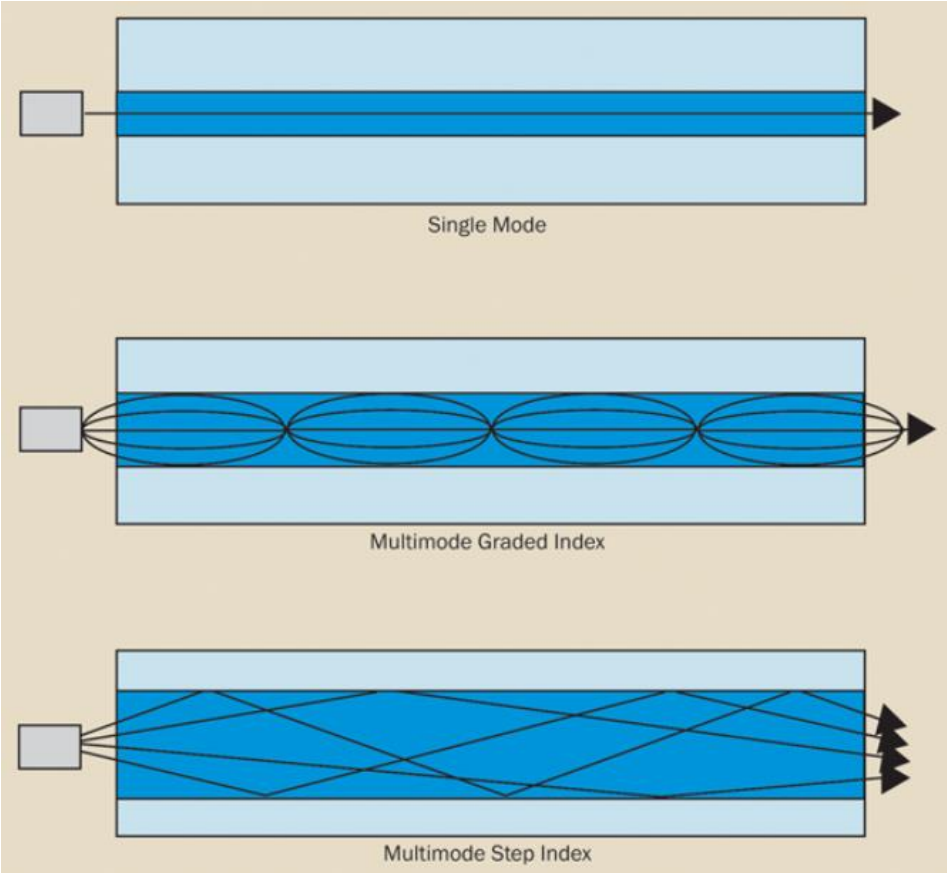
Οι οπτικές ίνες χωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες: τις μονότροπες (Single-mode) και τις πολύτροπες (Multi-mode).

Μονότροπες οπτικές ίνες

Οι μονότροπες ίνες χαρακτηρίζονται από το μέγεθος του πυρήνα του οποίου η διάμετρος είναι στα 9 μm και υποστηρίζουν μόνο τον εγκάρσιο τρόπο διάδοσης του φωτός.

Πολύτροπες οπτικές ίνες

Οι πολύτροπες ίνες χαρακτηρίζονται από το μέγεθος του πυρήνα το οποίο, για εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, είναι στα 50 ή 62.5 μm. Σε αντίθεση με τις μονότροπες οπτικές ίνες, οι πολύτροπες υποστηρίζουν πολλούς διαφορετικούς τρόπους διάδοσης του φωτός. Το κάθε κύμα εισέρχεται στην ίνα από διαφορετικό σημείο και με διαφορετική γωνία το οποίο οδηγεί το καθένα να ακολουθήσει τη δική του πορεία στο εσωτερικό της ίνας. Οι πολύτροπες ίνες χωρίζονται σε ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης και ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης[10].



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση πορείας της δέσμης σε κάθε τύπο οπτικής ίνας[10]

2.1.1. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

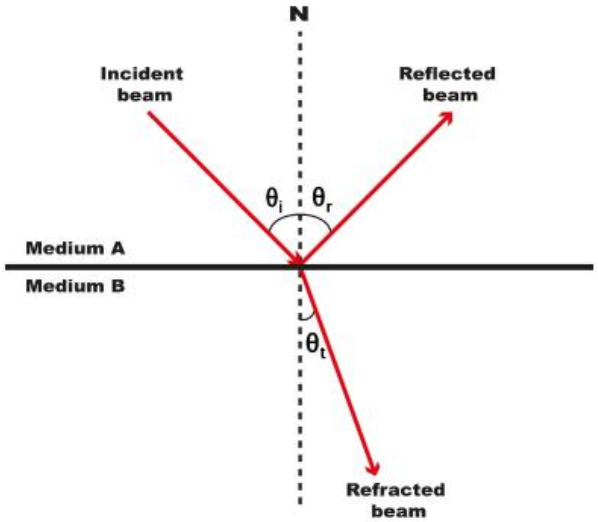
Η λειτουργία των οπτικών ινών βασίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Όταν μια δέσμη διαδίδεται από ένα μέσο (A) με δείκτη διάθλασης n_1 σε ένα διαφορετικό μέσο (B) με δείκτη διάθλασης n_2 ένα κομμάτι της δέσμης ανακλάται και το υπόλοιπο διαθλάται. Η γωνία διάθλασης (θ_t) υπολογίζεται από το νόμο του Snell, γνωρίζοντας τη γωνία πρόσπτωσης (θ_i) και τους δείκτες διάθλασης των μέσων A και B.

$$n_1 * \sin(\theta_i) = n_2 * \sin(\theta_t) \tag{1}$$

Όταν η γωνία διάθλασης $\theta_t = 90^o$, η γωνία πρόσπτωσης ονομάζεται κρίσιμη γωνία (θ_c) και υπολογίζεται με βάση τον νόμο του Snell από τη σχέση:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \tag{2}$$

Όταν $\theta_i > \theta_c$ παρατηρείται το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Δηλαδή, η προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη ανακλάται πλήρως και το φως καταλήγει παγιδευμένο στο εσωτερικό του μέσου διάδοσης.



Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση του νόμου του Snell[11]

Η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης μιας ακτίνας στον πυρήνα της ίνας, η οποία επιτρέπει τη καθοδήγηση της από τον πυρήνα της ίνας, υπολογίζεται από τον τύπο[12]:

$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{1}{n_o} * \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2}\right) \quad (3)$$

όπου n_{core} είναι ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα, $n_{cladding}$ ο δείκτης διάθλασης του περιβλήματος και n_o ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος της οπτικής ίνας.

Με βάση τον παραπάνω τύπο ορίζεται το μέγεθος αριθμητικό άνοιγμα ως :

$$NA = n_o * \sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2} \quad (4)$$

Το σήμα της δέσμης μειώνεται όσο αυτή ταξιδεύει κατά μήκος της ίνας.
Η μείωση αυτή εκφράζεται από την παρακάτω τύπο[13]:

$$S = 10 * \log\left(\frac{P_{ins}}{P_{out}}\right) \quad (5)$$

Όπου P_{ins} και P_{out} είναι η ισχύς της δέσμης που εισέρχεται και εξέρχεται από την ίνα ενώ με S συμβολίζεται η εξασθένηση της δέσμης φωτός και μετράται σε dB.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξασθένηση της δέσμης φωτός είναι:

- **Η σκέδαση Rayleigh**

Η σκέδαση Rayleigh προκαλείται όταν υπάρχουν μικροσκοπικές ανομοιογένειες στο δείκτη διάθλασης του υλικού του πυρήνα. Οι αλλαγές αυτές προκαλούν σημαντική διασπορά με αποτέλεσμα να υπάρξουν αλλαγές στην ισχύ της δέσμης. Η σκέδαση Rayleigh είναι ο κύριος παράγοντας απωλειών σε μια οπτική ίνα. Όταν τα μήκη κύματος του φωτός που διαδίδονται στην ίνα είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος της ανομοιογένειας η σκέδαση Rayleigh θεωρείται αμελητέα[13]

- **Μικροκάμψεις**

Κατά τη διάρκεια κατασκευής της ίνας παράγονται μικροκάμψεις στη γεωμετρία της. Αυτό μπορεί να αναγκάσει τη δέσμη να προσκρούσει στην επιφάνεια του πυρήνα με γωνία μικρότερη από τη κρίσιμη γωνία και να περάσει στο υλικό του περιβλήματος[13].

Ο πραγματικός αριθμός των τρόπων διάδοσης ενός κύματος φωτός στο εσωτερικό της ίνας ονομάζεται κανονικοποιημένη παράμετρος της συχνότητας (V) και εξαρτάται από τη ακτίνα του πυρήνα (a), το αριθμητικό άνοιγμα και το μήκος κύματος της δέσμης που διαδίδεται (λ). Ο τύπος που εκφράζει την παραπάνω εξάρτηση είναι[13] :

$$V = \frac{2*\pi*a}{\lambda} * NA \tag{6}$$

Η συνθήκη για την οποία η ίνα είναι μονότροπη είναι:

$$V \leqslant 2.405$$

2.2 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ ΜΕ ΦΡΑΓΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΜΑΚΡΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ (ΦΜΠ)

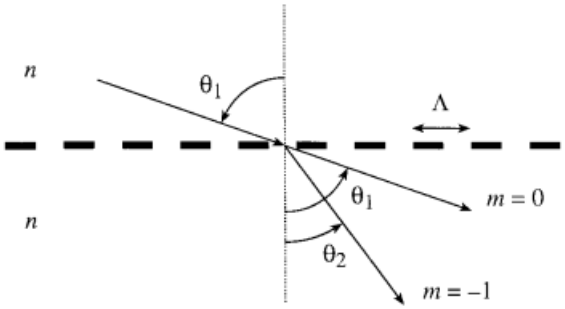
Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω οι ίνες με ΦΜΠ είναι αισθητήρια με φράγμα περίθλασης μεγάλης περιοδικότητας και βάθους μορφοποίησης 10^{-4} μm. Πιο συγκεκριμένα η περιοδικότητα του φράγματος κυμαίνεται από 10-500 μm και έχει μήκος που φτάνει ενδεικτικά τα 2.5 cm[14].

2.2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ ΦΜΠ

Η επίδραση ενός ομογενούς φράγματος περίθλασης στη πορεία προσπίπτοντος φωτός (γωνίας θ_1) μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση[15]:

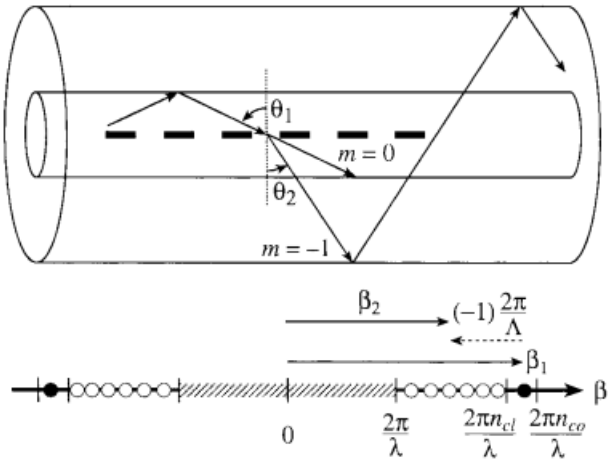
$$n * \sin(\theta_2) = n * \sin(\theta_1) + \frac{m*\lambda}{\Lambda} \tag{7}$$

Όπου n ο δείκτης διάθλασης του φράγματος, θ_2 η γωνία του διαθλώμενου κύματος και m η τάξη περίθλασης.



Εικόνα 8: Η περίθλαση φωτός από ένα ομογενές φράγμα [15]

Στην Εικόνα 9 αναπαριστάται η περίθλαση ενός τρόπου λειτουργίας υπό γωνία θ_1 σε ένα φράγμα περίθλασης μακράς περιόδου. Με m=0 απεικονίζεται ο τρόπος μετάδοσης στο πυρήνα ενώ με $m = -1$ και θ_2 απεικονίζεται ο τρόπος μετάδοσης του περιβλήματος.



Εικόνα 9: Διαρροή του φωτός στο περίβλημα. Η γραμμή κάτω από το σχήμα απεικονίζει τις συνθήκες του φράγματος σύμφωνα με την εξίσωση και $m = -1$ [15]

Η σταθερά του τρόπου διάδοσης ορίζεται από τον τύπο:

$$\beta = \frac{2 * \pi}{\lambda} * n_{eff} \tag{8}$$

Αν το $n_{eff} = n_{co} * \sin(\theta)$ η σχέση (7) θα πάρει τη μορφή:

$$\beta_2 = \beta_1 + \frac{2*\pi}{\Lambda} * m \tag{9}$$

Όταν $\beta_2 > 0$ το μήκος κύματος συντονισμού σε ένα φράγμα περίθλασης μακράς περιόδου ,παράγεται από τη σχέση (9) , και ισούται με:

$$\lambda_i = \left[n_{eff1}(\lambda_i) - n^i_{eff2}(\lambda_i)\right] * \Lambda \tag{10}$$

Όπου Λ η περίοδος του φράγματος, $n_{eff1}(\lambda_i)$ είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης του τρόπου διάδοσης του πυρήνα και $n^i_{eff2}(\lambda_i)$ είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης του i-οστού τρόπου διάδοσης του περιβλήματος.

Ακόμα μια πολύ σημαντική σχέση (29), η οποία θα αποδειχθεί στη συνέχεια και εκφράζει την ένταση των ζωνών εξασθένησης, για την μελέτη των ΦΜΠ είναι:

$$t_{x,max} = \sin^2(\kappa * L)$$

Όπου κ είναι ο συντελεστής σύζευξης και L είναι το μήκος του φράγματος.

Η διαταραχή του δείκτη διάθλασης που περιγράφεται στην εισαγωγή μπορεί να εκφραστεί από τον τύπο:

$$\delta n_{eff} = \overline{\delta n_{eff}(z)} * \left[1 + u * \cos\left(\frac{2*\pi}{\Lambda} * z + \varphi(z)\right)\right] \tag{11}$$

Όπου $\overline{\delta n_{eff}}$ είναι ο μέσος όρος της μεταβολής του δείκτη διάθλασης σε μια περίοδο Λ, u είναι η ορατότητα του δείκτη διάθλασης και φ(z) περιγράφει ένα ανομοιογενή κομμάτι κατά μήκους του φράγματος της ίνας.

Εάν η οπτική ίνα είναι βηματικού δείκτη και της έχει συμβεί μια επαγόμενη ομοιόμορφη αλλαγή στον πυρήνα τότε ο $\overline{\delta n_{eff}} = \Gamma * \delta n_{co}$. Με Γ συμβολίζεται ο παράγοντας περιορισμού της ισχύος του πυρήνα.

Για γραμμικά πολωμένους τρόπους διάδοσης (LP_{lm}), η παράμετρος του ενεργού δείκτη διάθλασης (b) θα είναι μια λύση της παρακάτω σχέσης διασποράς:

$$V * \sqrt{1-b} * \frac{J_{l-1}(V*\sqrt{1-b})}{J_l(V*\sqrt{1-b})} = -V * \sqrt{b} * \frac{K_{l-1}(V*\sqrt{b})}{K_l(V*\sqrt{b})} \tag{12}$$

Όπου V η κανονικοποιημένη συχνότητα και το b συνδέεται με τον ενεργό δείκτη διάθλασης από τη σχέση:

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_{cl}^2}{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \tag{13}$$

Γνωρίζοντας τα V και b μπορούμε να υπολογίσουμε το Γ από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{b^2}{V^2} * \left[1 - \frac{J_l^2(V*\sqrt{1-b})}{J_{l+1}^2(V*\sqrt{1-b}) * J_{l-1}^2(V*\sqrt{1-b})}\right] \tag{14}$$

Οι οπτικές ιδιότητες ενός φράγματος περίθλασης καθορίζονται ουσιαστικά από τις αλλαγές του ενεργού δείκτη διάθλασης κατά μήκος του άξονα z.

2.2.2 ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Ο τρόπος λειτουργίας των Φραγμάτων περίθλασης Μακράς Περιόδου (ΦΜΠ) μπορεί να περιγραφή λεπτομερώς χρησιμοποιώντας τη θεωρία των συζευγμένων κυμάτων (coupled mode theory) καθώς μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την αποτελεσματικότητα της περίθλασης και τη φασματική εξάρτηση[15].

Στα πλαίσια του ιδανικού τρόπου διάδοσης του φωτός, υποθέτουμε ότι η εγκάρσια συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να γραφτεί σαν υπέρθεση των ιδανικών τρόπων ταλάντωσης (m). Ο τύπος που το εκφράζει αυτό είναι:

$$\overrightarrow{E_t}(x,y,z) = \sum_m [A_m * \exp(i * \beta_m * z) + B_m * \exp(-i * \beta_m * z)] * \overrightarrow{e_{mt}}(x,y) * \exp(-i * \omega * t) \quad (15)$$

Όπου $A_m(z)$ το πλάτος ταλάντωσης του m τρόπου στη κατεύθυνση +z ενώ $B_m(z)$ είναι το πλάτος ταλάντωσης του m τρόπου στη κατεύθυνση -z. Με $\overrightarrow{e_{mt}}(x,y)$ συμβολίζονται τα εγκάρσια πεδία διάδοσης.

Σε έναν ιδανικό κυματοδηγό οι τρόποι διάδοσης είναι ορθογώνιοι και για αυτό δεν ανταλλάσσουν ενέργεια. Παρ 'όλα αυτά, η διηλεκτρική διαταραχή[1] που έχει υποστεί η οπτική ίνα αναγκάζει τους τρόπους διάδοσης να συμβάλλουν και τα πλάτη των A_m και B_m να κινηθούν κατά τη z κατεύθυνση σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\frac{dA_m}{dz} = i * \sum_n A_n * (K_{nm}^t + K_{nm}^z) * \exp(i * (\beta_n - \beta_m) * z) + i * \sum_n B_n * (K_{nm}^t - K_{nm}^z) * \exp(-i * (\beta_n + \beta_m) * z) \quad (16)$$

$$\frac{dB_m}{dz} = -i * \sum_n A_n * (K_{nm}^t - K_{nm}^z) * \exp(i * (\beta_n - \beta_m) * z) - i * \sum_n B_n * (K_{nm}^t + K_{nm}^z) * \exp(-i * (\beta_n + \beta_m) * z) \quad (17)$$

Ο συντελεστής διαμήκους σύζευξης (K_{nm}^z) μπορεί να παραλειφθεί διότι $K_{nm}^z \ll K_{nm}^t$. Επίσης, με K_{nm}^t συμβολίζεται ο συντελεστής εγκάρσιας σύζευξης μεταξύ των οπτικών τρόπων n και m.

Ορίζοντας πρώτα τους συντελεστές $\sigma_{nm}(z)$ ("dc" συντελεστής σύζευξης) και $\kappa_{nm}(z)$ ("AC" συντελεστής σύζευξης) ως:

$$\sigma_{nm}(z) = \frac{\omega * n_{co}}{2} * \overline{\delta n_{co}} * \int\int_{core} dx * dy * \overrightarrow{e_{nm}}(x,y) * \overrightarrow{e_{nm}}(x,y) \quad (18)$$

---

[1] Αλλαγή στο δείκτη διάθλασης

$$\kappa_{nm}(z) = \frac{u}{2} * \sigma_{nm}(z) \qquad (19)$$

Αφού έχουμε ορίσει αυτούς τους 2 συντελεστές μπορούμε να γράψουμε τον συντελεστή εγκάρσιας σύζευξης ως:

$$K_{nm}^{t}(z) = \sigma_{nm}(z) + 2 * \kappa_{nm}(z) * \cos\left(\frac{2*\pi*z}{\Lambda} + \varphi(z)\right) \qquad (20)$$

Οι σχέσεις (16) και (17), στο όριο όπου ένας τρόπος διάδοσης (mode 1 με πλάτος $A_1(z)$) συμβάλλει με έναν άλλο (mode 2 με πλάτος $B_1(z)$), μπορούν να απλοποιηθούν κρατώντας μόνο τους όρους που εμπεριέχουν τα πλάτη των modes και εφαρμόζοντας το synchronous approximation.

$$\frac{dR}{dz} = i * \eth * R(z) + i * \kappa * S(z) \qquad (21)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i * \eth * S(z) + i * \kappa^{*} * R(z) \qquad (22)$$

Με κ συμβολίζεται ο συντελεστής σύζευξης της σχέσης (19). Τα νέα πλάτη R και S που προκύπτουν υπολογίζονται από τους τύπους:

$$R(z) = A_1 * e^{i*\delta*z-\varphi/2} * e^{-i*(\sigma_{11}+\sigma_{22})*z/2} \qquad (23)$$

$$S(z) = B_1 * e^{-i*\delta*z+\varphi/2} * e^{-i*(\sigma_{11}+\sigma_{22})*z/2} \qquad (24)$$

Όπου σ_{11} και σ_{22} είναι οι συντελεστές που προκύπτουν από τον τύπο (18). Το $\eth$ στους τύπους (21) και (22) είναι ο γενικός συντελεστής σύζευξης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eth = \delta + \frac{\sigma_{11}-\sigma_{22}}{2} - \frac{d\varphi}{2*dz} \qquad (25)$$

Ο παράγοντας αποσυντονισμού, που φαίνεται στην εξίσωση (25), συμβολίζεται με δ και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\delta = \pi * \Delta n_{eff} * \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D}\right) \qquad (26)$$

Όπου $\lambda_D = 2 * \Lambda * \Delta n_{eff}$ είναι το μήκος κύματος για ένα πολύ ασθενές φράγμα. Συγκεκριμένα, για τα ΦΜΠ η συνθήκη δ=0 είναι η συνθήκη που ικανοποιεί την εξίσωση (10):

$$\lambda_i = \left[n_{eff1}(\lambda_i) - n^i_{eff2}(\lambda_i)\right] * \Lambda$$

2.2.3 ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΦΡΑΓΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ

Στο ομογενές φράγμα περίθλασης οι ποσότητες $\hat{\sigma}$ και κ είναι σταθερές. Άρα με τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες μπορούν να βρεθούν οι κλειστές λύσεις των εξισώσεων (21) και (22). [15]

Για να βρεθεί η διάδοση ενός φράγματος υποθέτουμε ότι μόνο ένας τρόπος είναι κάθετος. Η εγκάρσια διάδοση $t_x = \left|\frac{S^2(z)}{R^2(0)}\right|$ και η ισχύς $t_= = \left|\frac{R^2(z)}{R^2(0)}\right|$(power bar) αποδεικνύεται ότι μπορούν να υπολογιστούν από τους τύπους (για R(0)=1 και S(0)=0):

$$t_x = \frac{\sin^2\left(\sqrt{\kappa^2+\hat{\sigma}^2 * z}\right)}{1+\frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \tag{27}$$

$$t_= = \frac{\sin^2\left(\sqrt{\kappa^2+\hat{\sigma}^2 * z}\right)}{1+\frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} + \cos^2\left(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2 * z}\right) \tag{28}$$

Για ένα φράγμα μήκους L η μέγιστη εγκάρσια διάδοση θα επιτυγχάνεται όταν $\hat{\sigma} = 0$:

$$t_{x,max} = \sin^2(\kappa * L) \tag{29}$$

Το μήκος κύματος της μέγιστης διάδοσης θα δίνεται από τον τύπο:

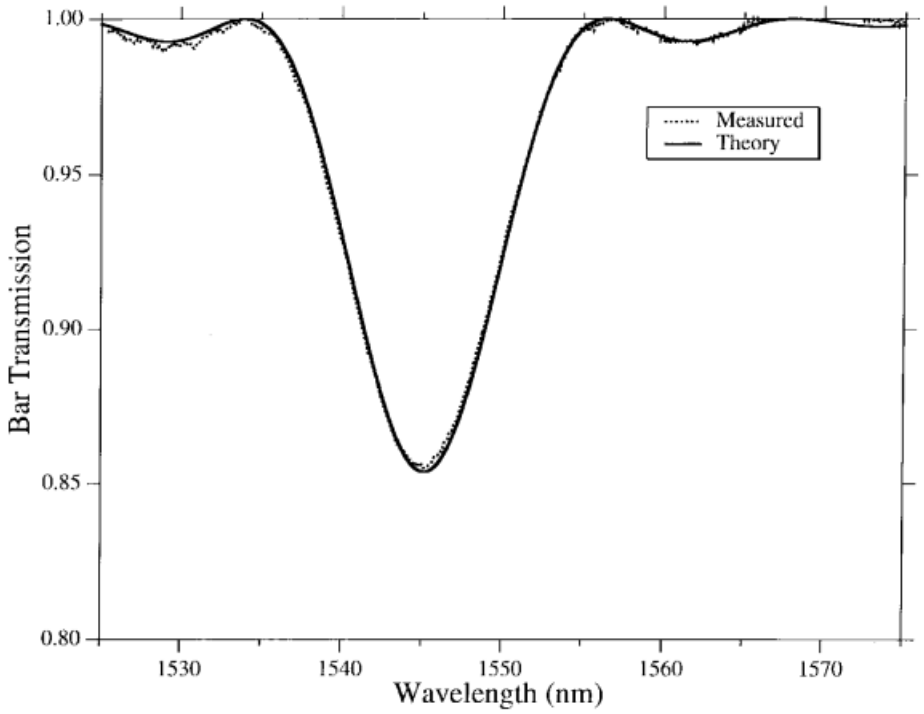
$$\lambda_{max} = \frac{\lambda_D}{1-\frac{(\sigma_{11}-\sigma_{22})*\Lambda}{2*\pi}} \tag{30}$$

Στη περίπτωση συμβολής του τρόπου διάδοσης στον πυρήνα “1” και στο περίβλημα “2” βρίσκουμε ότι $\sigma_{22} \ll \sigma_{11}$. Συνεπώς η σχέση (30) θα πάρει τη μορφή:

$$\lambda_{max} \cong \left(1 + \frac{\overline{\delta n_{eff}}}{\Delta n_{eff}}\right) * \lambda_D \tag{31}$$

Όπου $\overline{\delta n_{eff}}$ η επαγώμενη διαφορά του ενεργού δείκτη διάθλασης πυρήνα-περιβλήματος η οποία $\overline{\delta n_{eff}} \ll \Delta n_{eff}$.

Στην Εικόνα 10 απεικονίζεται μια σύγκριση της θεωρίας που αναφέρθηκε σε σχέση με κάποια πειραματικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, φαίνεται το φάσμα διέλευσης $t_=$ για ένα ασθενές φράγμα. Το παρακάτω φάσμα διέλευσης προέκυψε μετά τη συμβολή του LP_{01} τρόπου διάδοσης του πυρήνα με το χαμηλότερης τάξης τρόπο διάδοσης του περιβλήματος.



Εικόνα 10: Πειραματικό (διακεκομμένες) και θεωρητικό (συμπαγές) φάσμα διέλευσης σε ένα ομοιογενές φράγμα

2.2.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΜΑΚΡΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ (ΦΜΠ)

- **<u>Θερμοκρασία</u>**

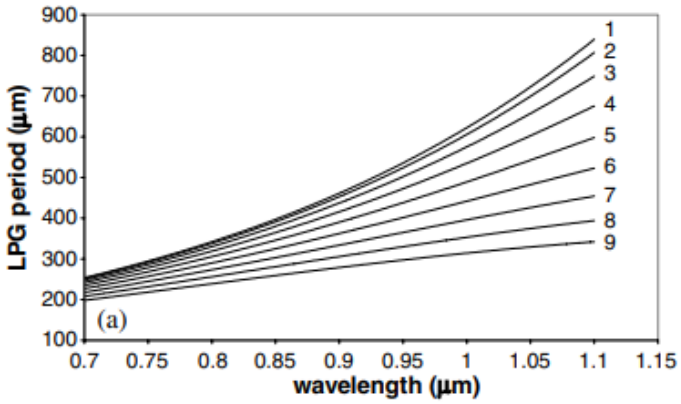
Η επιρροή της θερμοκρασίας (T) στα μήκη κύματος των ζωνών εξασθένησης ενός φράγματος περίθλασης μακράς περιόδου προκύπτει από την εξίσωση (10) και εκφράζεται από τον τύπο[16]:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} * \left(\frac{dn_{eff1}}{dT} - \frac{dn_{eff2}}{dT}\right) + \Lambda * \frac{d\lambda}{d\Lambda} * \frac{1}{L} * \frac{dL}{dT} \qquad (32)$$

Όπου L είναι το μήκος του φράγματος και $\delta n_{eff} = n_{eff1} - n_{eff2}$ είναι η διαφορά του ενεργού δείκτη διάθλασης. Ο παράγοντας i παραλήφθηκε χάριν ευκολίας.

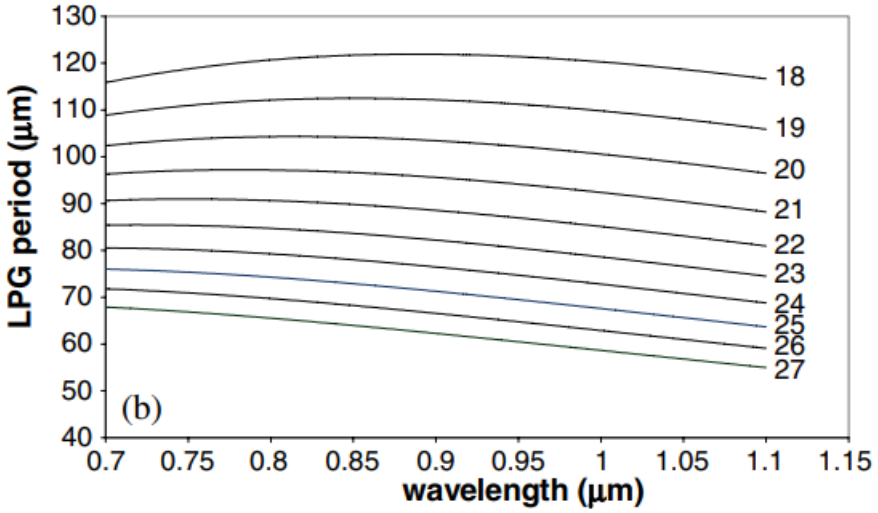
Ο πρώτος όρος του δεξιού κομματιού της εξίσωσης (32) αντιπροσωπεύει την επιρροή του υλικού στη μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος των ζωνών εξασθένησης του σήματος εξόδου του φωτός. Η αλλαγή της θερμοκρασίας στο περιβάλλον της ίνας έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος. Η συγκεκριμένη αλλαγή είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από τα συστατικά της ίνας και από την τάξη του τρόπου διάδοσης στο περίβλημα.

Ο δεύτερος όρος του δεξιού κομματιού της εξίσωσης (32) αντιπροσωπεύει την επιρροή του κυματοδηγού στη μετατόπιση του κεντρικού μήκος κύματος των ζωνών εξασθένησης του σήματος εξόδου του φωτός. Η επιρροή του κυματοδηγού βασίζεται στο τρόπο με τον οποίο αλλάζει η περίοδος του φράγματος σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με την Εικόνα 11, ο όρος $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$ είναι θετικός όταν ο τρόπος διάδοσης του πυρήνα (core mode) συμβάλλει σε έναν τρόπο διάδοσης του περιβλήματος (cladding mode) χαμηλής τάξης.



Εικόνα 11: Εξάρτηση του μήκους κύματος συντονισμού σαν συνάρτηση της περιόδου του ΦΜΠ για τον 1ο-9ο τρόπο μετάδοσης του περιβλήματος [16]

Σύμφωνα με την Εικόνα 12, ο όρος $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$ είναι αρνητικός, όταν ο τρόπος διάδοσης του φωτός στον πυρήνα (core mode) συμβάλλει σε έναν τρόπο διάδοσης του περιβλήματος (cladding mode) υψηλής τάξης.

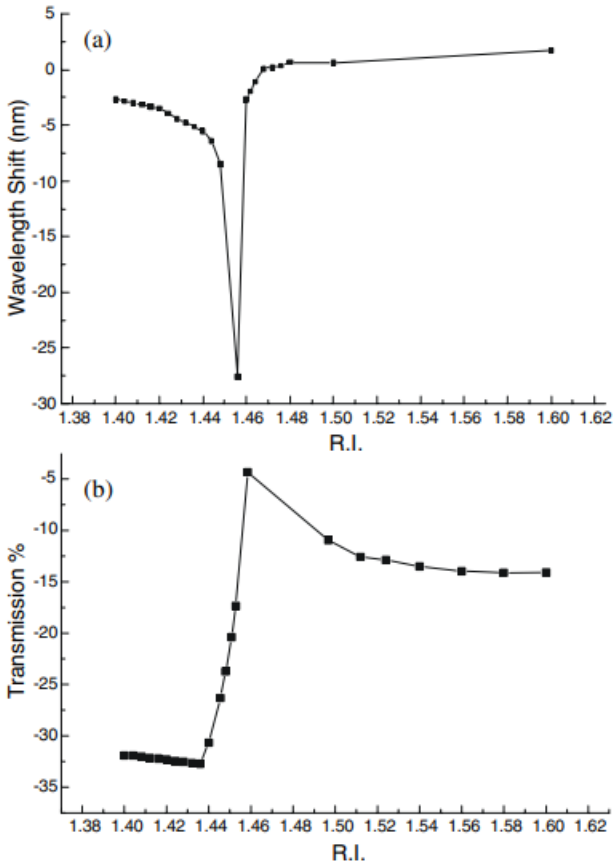


Εικόνα 12: Εξάρτηση του μήκους κύματος συντονισμού σαν συνάρτηση της περιόδου του ΦΜΠ για τον 18ο-27ο τρόπο μετάδοσης του περιβλήματος [16]

Συνήθως, στα φράγματα περίθλασης μακράς περιόδου η επιρροή του υλικού υπερνικά την επιρροή του κυματοδηγού.

- **<u>Δείκτης διάθλασης περιβάλλοντος ίνας</u>**

Η ευαισθησία των ΦΜΠ προκύπτει από την εξάρτηση της συνθήκης συμφωνίας φάσης από τον ενεργό δείκτη διάθλασης των οπτικών τρόπων μετάδοσης στο περίβλημα. Οι ενεργοί δείκτες διάθλασης των οπτικών τρόπων μετάδοσης στο περίβλημα, εξαρτώνται από τη διαφορά μεταξύ του δείκτη διάθλασης του περιβλήματος ($n_{cladding}$) και του μέσου που το περιβάλλει. Η εξάρτηση των κεντρικών μηκών κύματος των ζωνών εξασθένησης από το δείκτη διάθλασης του μέσου (n_3) εμφανίζεται υπό τη προϋπόθεση ότι $n_{cladding} > n_3$.



Εικόνα 13: Διάγραμμα (a) της μεταβολής του μήκους κύματος και (b) της ποσοστιαίας διάδοσης μιας ζώνης εξασθένησης ως συνάρτηση του δείκτη διάθλασης του υλικού (n_3) που περιβάλει ένα ΦΜΠ περιόδου 400 μm[16].

Στη Εικόνα 13 φαίνεται η ευαισθησία ενός ΦΜΠ στην αλλαγή του εξωτερικού δείκτη διάθλασης ως μεταβολή στο κεντρικό μήκος κύματος και στην ελάχιστη τιμή έντασης των ζωνών εξασθένησης. Η μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζεται από τις υψηλότερες τάξεις μετάδοσης όταν ο δείκτης διάθλασης του υλικού που περιβάλλει την ίνα (n_3) προσεγγίζει το δείκτη διάθλαση του περιβλήματος ($n_{cladding} = 1.46$). Όταν το $n_3 = n_{cladding}$, το περίβλημα φαίνεται να έχει άπειρο μήκος με αποτέλεσμα οι τρόποι μετάδοσης σε αυτό να μην είναι διακριτοί. Τότε εμφανίζονται οι απώλειες ακτινοβολίας με μεγάλο φασματικό εύρος (radiation mode coupling loses). Για $n_3 > n_{cladding}$ η ευαισθησία των κεντρικών μηκών κύματος είναι μειωμένη αλλά παρατηρούνται αλλαγές στην ένταση των ζωνών εξασθένησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 13 (b)[16].

2.3. ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΑ ΕΥΑΙΣΘΗΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΦΜΠ

Οι οπτικές ίνες με ΦΜΠ εμφανίζουν ελάχιστη ευαισθησία σε υδατικά περιβάλλοντα και έλλειψη χημικής επιλεκτικότητας. Για αυτό το λόγο σε ορισμένες περιπτώσεις περαιτέρω επίστρωση ευαίσθητων υλικών πάνω στο φράγμα περίθλασης της οπτικής ίνας κρίνεται αναγκαία. Συγκεκριμένα, σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά των ΦΜΠ εμφανίζονται όταν το πάχος της επίστρωσης είναι μικρότερο από το μήκος κύματος του φωτός που διαδίδεται στο εσωτερικό της ίνας και όταν ο δείκτης διάθλασης της επίστρωσης είναι μεγαλύτερος από αυτόν του περιβλήματος. Λόγω του μεγαλύτερου δείκτη διάθλασης της επίστρωσης, το αποσβενόμενο πεδίο ενισχύεται με αποτέλεσμα την ισχυροποίηση της αλληλεπίδρασης του φωτός με το ευαίσθητο επίστρωμα και μεγιστοποίηση της ευαισθησίας του αισθητηρίου. Επίσης, ανάλογα με το πάχος της επίστρωσης μπορεί να αποτελέσει και η ίδια κυματοδηγός. Για ένα συγκεκριμένο υλικό και πάχος επίστρωσης και ταυτόχρονα όταν ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος κυμαίνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, ο υψηλότερης τάξης οπτικός τρόπος μετάδοσης στο περίβλημα απορροφάται στην επίστρωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ενεργός δείκτης διάθλασης του να προσεγγίζει το δείκτη διάθλασης της επίστρωσης αφήνοντας ένα κενό στους ενεργούς δείκτες διάθλασης των οπτικών τρόπων μετάδοσης στο περίβλημα. Έτσι οι ενεργοί δείκτες διάθλασης των υψηλότερων τάξεων οπτικών τρόπων μετάδοσης στο περίβλημα μετατοπίζονται για να καλύψουν αυτό το κενό. Αυτό μεταφράζεται σε μετατόπιση των ζωνών εξασθένησης και αύξηση της ευαισθησίας τους[18].

2.4. ΤΟ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ (CuO) ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ

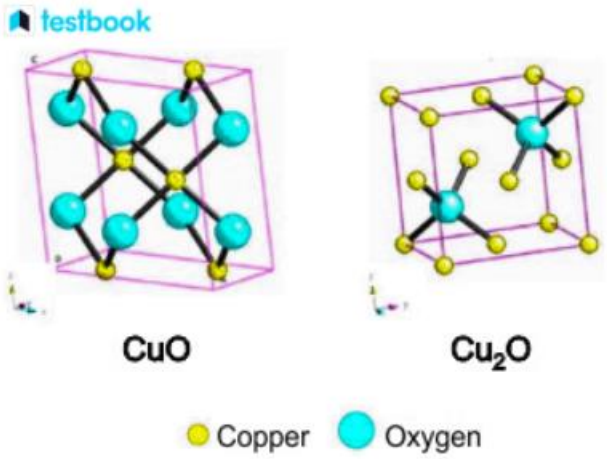
Στους αισθητήρες οπτικών ινών που μελετήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία, είχαν εναποτεθεί στρώματα μονοξειδίου του χαλκού. Συνεπώς παρακάτω θα γίνει μια αναφορά στο μονοξείδιο του χαλκού και σε εφαρμογές αυτού.

Το μονοξείδιο του χαλκού είναι μια ανόργανη ένωση μαύρου χρώματος. Υπάρχουν πολλοί τρόποι ανάπτυξης του μονοξειδίου του χαλκού. Ο πιο διαδεδομένος είναι με θέρμανση του χαλκού σε αέρα στους 300-800 ºC [19].

$$2 * \mathrm{Cu} + \mathrm{O_2} \rightarrow 2 * \mathrm{CuO}$$

Ο χημικός δεσμός που σχηματίζεται μεταξύ χαλκού και οξυγόνου είναι ιοντικός. Κατά τη διάρκεια δημιουργίας του δεσμού ο χαλκός χάνει δυο ηλεκτρόνια (Cu^{+2}) από το οξυγόνο, το οποίο έχει την τάση να προσλαμβάνει ηλεκτρόνια όταν συμμετέχει σε χημικούς δεσμούς (μεγάλη ηλεκτραρνητικότητα).

Σε κρυσταλλική μορφή, το μονοξείδιο του χαλκού εμφανίζεται ως μονόκλινές κρυσταλλικό πλέγμα. Αυτό σημαίνει ότι τέσσερα άτομα οξυγόνου προσανατολίζουν ένα άτομο χαλκού σε τετραγωνική επίπεδη γεωμετρία όπως φαίνεται στην Εικόνα 14[20].



Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση του κρυστάλλου CuO και $\mathrm{Cu_2O}$[20]

Μερικές από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες, της ένωσης, του μονοξειδίου του χαλκού, είναι[19]:

- Είναι πολύ βασική ένωση (pH 9-11)
- Έχει πυκνότητα 6.315 $\frac{gr}{cm^3}$
- Έχει δείκτη διάθλασης 2.63
- Σημείο βρασμού και τήξης στους 1326 ℃ και 2000 ℃, αντίστοιχα
- Δεν εμφανίζει σημάδια διαλυτότητας σε νερό και αλκοόλες, εκτός του διτανθρακικού αμμωνίου.

Μερικές από τις εφαρμογές του οξειδίου του χαλκού είναι[19,20]:

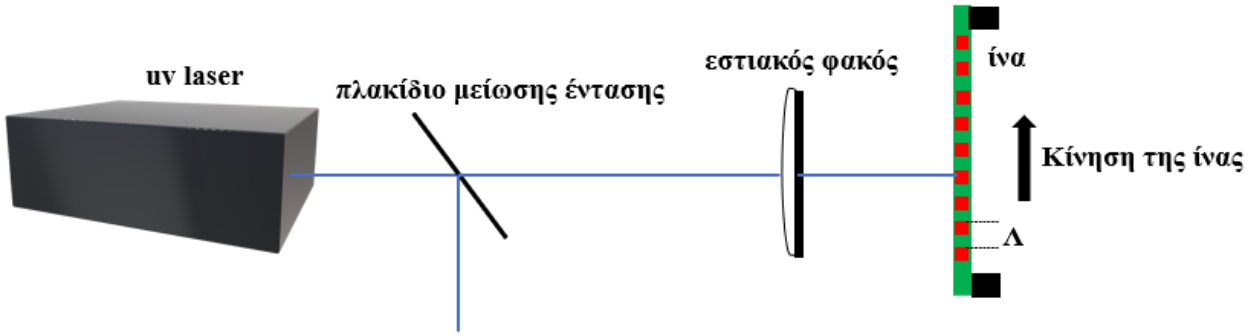
- Σε ουσίες για το χρωματισμό των κεραμικών
- Σε συστήματα φωτοβολταϊκών κυψελών λόγω της ημιαγωγικής συμπεριφοράς του
- Σε χρώματα βαφής πλοίων. Οι μυκητοκτόνες και βακτηριοκτόνες ιδιότητες του το καθιστούν κύριο συστατικό στη δημιουργία των συγκεκριμένων χρωμάτων.
- Στη δημιουργία θερμίτη
- Στην οξείδωση πολλών τοξικών ουσιών έτσι ώστε να πάψουν να είναι τοξικές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

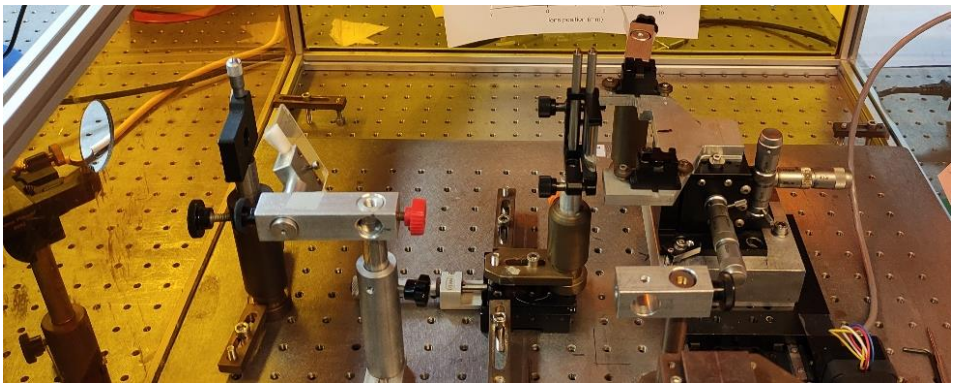
3.1. ΕΓΓΡΑΦΗ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΜΑΚΡΑΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ

Για την εγγραφή των ΦΜΠ χρησιμοποιήσαμε ίνες πυριτίου με προσμίξεις Βορίου (PS1250/1500), λόγω της μεγάλης φωτοευαισθησίας που παρουσιάζουν στην υπεριώδη ακτινοβολία. Η εγγραφή του ΦΜΠ πραγματοποιήθηκε με την έκθεση της ίνας σε υπεριώδη ακτινοβολία λέιζερ (248 nm). Η εγγραφή ΦΜΠ αισθητηρίων στον πυρήνα της ίνας επιτυγχάνεται κυρίως με 2 τεχνικές: εγγραφή μέσω μάσκας πλάτους και εγγραφή σημείο προς σημείο. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική σημείο προς σημείο. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 15 ένας εστιακός φακός εστιάζει τη δέσμη του λέιζερ στο επιθυμητό μέγεθος πάνω στην ίνα (κόκκινα κομμάτια) ενώ μία μηχανική βάση (Εικόνα 18) μας επιτρέπει να μετακινούμε την ίνα ελεγχόμενα ώστε να επιτύχουμε περιοδική ακτινοβόληση. Η διάταξη περιλαμβάνει επίσης μια ίριδα για έλεγχο του πλάτους της δέσμης καθώς και ένα πλακίδιο για εξασθένησή οπτικής ισχύος.



Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης εγγραφής των ΦΜΠ.

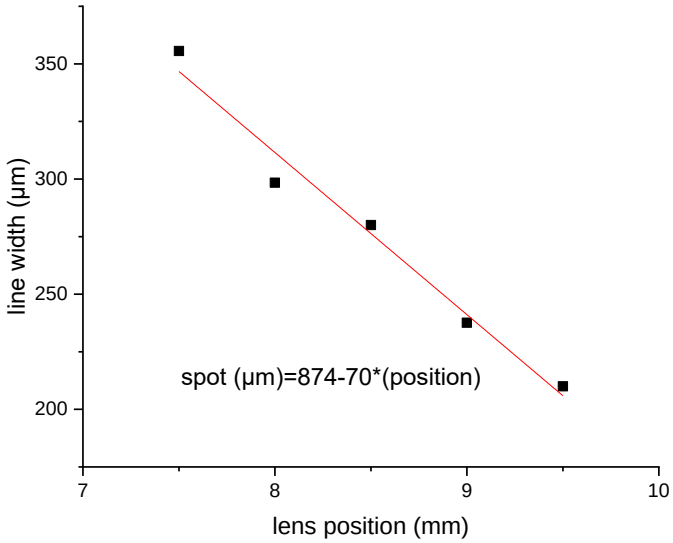
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την εγγραφή φαίνεται στην Εικόνα 16. Πιο συγκεκριμένα, για την εγγραφή χρησιμοποιήθηκε παλμικό KrF excimer λέιζερ με διάρκεια παλμού ~15 ns και συχνότητα 125 Hz.



Εικόνα 16 : Πειραματική διάταξη εγγραφής LPG

Η επιθυμητή περίοδος του ΦΜΠ ήταν ίση 407 μm συνεπώς ο εστιακός φακός τοποθετήθηκε στην κατάλληλη απόσταση από την οπτική ίνα, ώστε το πλάτος της δέσμης φωτός πάνω στην ίνα να ισούται με 203 μm (το μισό της περιόδου Λ).

Για να μελετηθεί η συσχέτιση του πλάτους της δέσμης, πάνω στην ίνα, με την απόσταση του φακού από αυτή, καταγράφηκε και μετρήθηκε το αποτύπωμα της δέσμης πάνω σε επιχρωματισμένο γυαλί και τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17 : Πλάτος εστιασμένης δέσμης συναρτήσει της θέσης του εστιακού φακού.

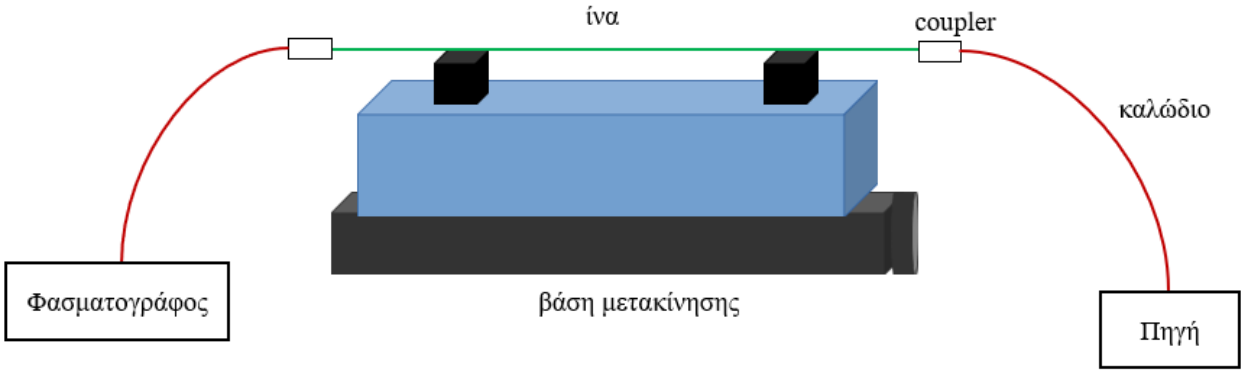
Η εξίσωση που φαίνεται στο διάγραμμα προέκυψε από τη κλίση και τη διατομή της ευθείας. Γνωρίζοντας ότι το μέγεθος της δέσμης που θέλουμε να επιτύχουμε είναι 203 μm προκύπτει από την εξίσωση ότι η θέση του φακού πρέπει να είναι στα 9.5 mm.

Η πυκνότητα ενέργειας της προσπίπτουσας δέσμης υπολογίστηκε στα 300 $\frac{mJ}{cm^2}$. Ο τύπος για τον υπολογισμό της πυκνότητας ενέργειας είναι:

$$f = \frac{E}{A}$$

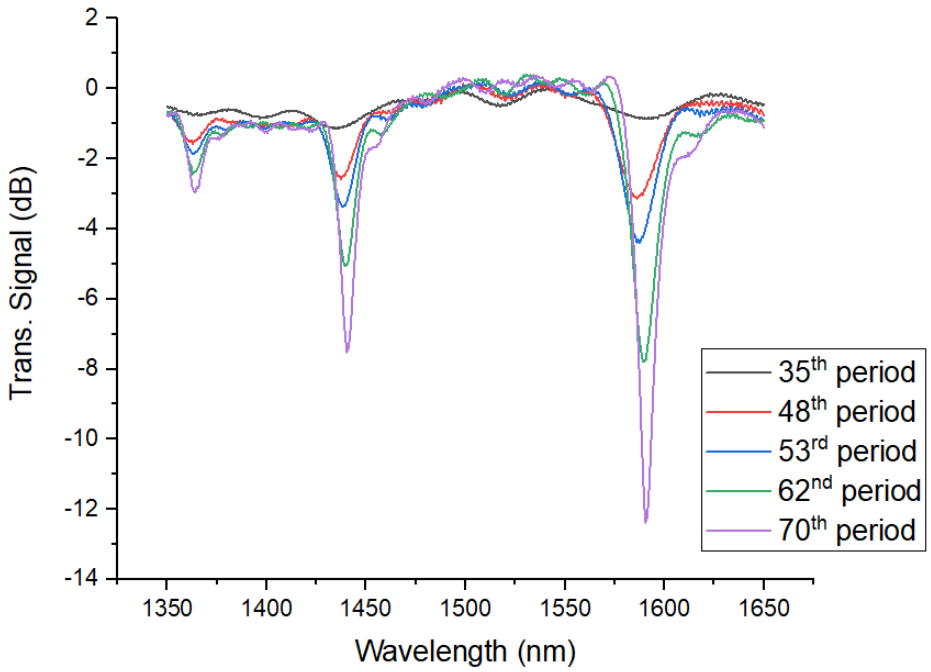
Όπου Ε είναι η ενέργεια της δέσμης η οποία έχει μετρηθεί με powermeter και Α είναι η επιφάνεια της δέσμης.

Η μελέτη του φάσματος διέλευσης κατά τη διάρκεια της εγγραφής πραγματοποιήθηκε με τη συνδεσμολογία που φαίνεται στην Εικόνα 18. Το ένα άκρο της ίνας συνδέεται με μία πηγή με μεγάλο φασματικό εύρος (1350- 1650 nm) (Super Luminescent Diode-SLD) και το άλλο με έναν οπτικό αναλυτή φάσματος (Optical Spectrum Analyzer-OSA).



Εικόνα 18 : Σχηματική αναπαράσταση της συνδεσμολογίας μεταξύ ίνας, πηγής και οπτικού αναλυτή φάσματος

Κατά την περιοδική ακτινοβόληση της ίνας από τη δέσμη λέιζερ, εμφανίζονται αλλαγές στην ένταση και το μήκος κύματος των ζωνών εξασθένισης. Χρησιμοποιώντας τη διάταξη της Εικόνας 18 γίνεται καταγραφή του φάσματος διέλευσης ώστε να προσδιοριστεί ο αριθμός περιόδων που μεγιστοποιεί την ένταση της ζώνης εξασθένισης και άρα το βέλτιστος μήκος του ΦΜΠ. Πιο συγκεκριμένα, οι αλλαγές αυτές φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 19: Φάσμα διέλευσης κατά την εγγραφή του ΦΜΠ.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, για 70 περιόδους ακτινοβόλησης (μήκος ΦΜΠ ίσο με 28.5 mm) στην φασματική περιοχή 1350-1650 nm παρατηρούνται 3 ζώνες απορρόφησης με την πιο ισχυρή ίση με ~12 dB να εμφανίζεται για μήκος κύματος 1590.6 nm. Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία εγγράφηκαν ΦΜΠ τα οποία στη συνέχεια επικαλύφτηκαν με CuO για την ανάπτυξη του αισθητήρα πτητικών ενώσεων.

3.2. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Η επίστρωση του αισθητηρίου υλικού που εξετάστηκε στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε με την τεχνική DC Magnetron Sputtering. Η διαδικασία της εναπόθεσης με "sputtering" λαμβάνει χώρα σε έναν θάλαμο ο οποίος εκκενώνεται σε μια συγκεκριμένη πίεση. Αφού επιτευχθεί η συγκεκριμένη πίεση, οξυγόνο εισέρχεται στον θάλαμο στον οποίο θα παραχθεί πλάσμα. Για την παραγωγή πλάσματος, υψηλή τάση εφαρμόζεται ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο. Η κάθοδος βρίσκεται πίσω από τον στόχο ενώ η άνοδος πίσω από το αντικείμενο που θέλουμε να γίνει η εναπόθεση[21].

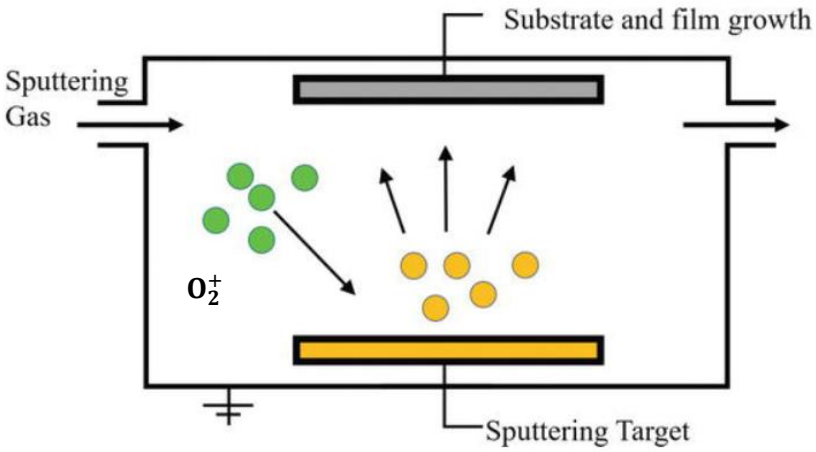
Η διαδικασία του "sputtering" συμβαίνει όταν τα ιόντα του πλάσματος[2] βομβαρδίζουν ένα υλικό-στόχο. Όταν τα ιόντα που προσπίπτουν στο υλικό μεταφέρουν ενέργεια που είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης των ατόμων του υλικού, οι δεσμοί των ατόμων σπάνε και τα άτομα του υλικού ελευθερώνονται από την επιφάνεια του.

Η τεχνική του "Magnetron Sputtering" χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο για να περιορίσει σωματίδια γύρω από τη περιοχή του στόχου. Αυτό αυξάνει τη πυκνότητα του πλάσματος και αυξάνει τους ρυθμούς απόθεσης ατόμων[22].

Στο συγκεκριμένο πείραμα, επιτεύχθηκε αρχικό κενό στα 10^{-6} mbar με τη βοήθεια μηχανικής αντλίας και αντλίας διαχύσεως. Η πίεση που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης ήταν στα 10^{-2} mbar ενώ η ένταση του ρεύματος ήταν 0.45 A. Το προς ιονισμό αέριο ήταν οξυγόνο, ο στόχος ήταν μεταλλικός χαλκός υψηλής καθαρότητας (99.999 %) και η προς εναπόθεση επιφάνεια ήταν η οπτική ίνα. Τέλος το πάχος του κάθε επιστρώματος ήταν ανάλογο του χρόνου εναπόθεσης. Για την εκτίμηση του πάχους, τοποθετήθηκαν δίπλα στις ίνες και επίπεδες γυάλινες επιφάνειες για την εναπόθεση ισοπαχούς επιστρώματος CuO.

---

[2] Κατάσταση της ύλης που χαρακτηρίζεται από σημαντικό ποσοστό φορτισμένων σωματιδίων



Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση του sputtering[23]

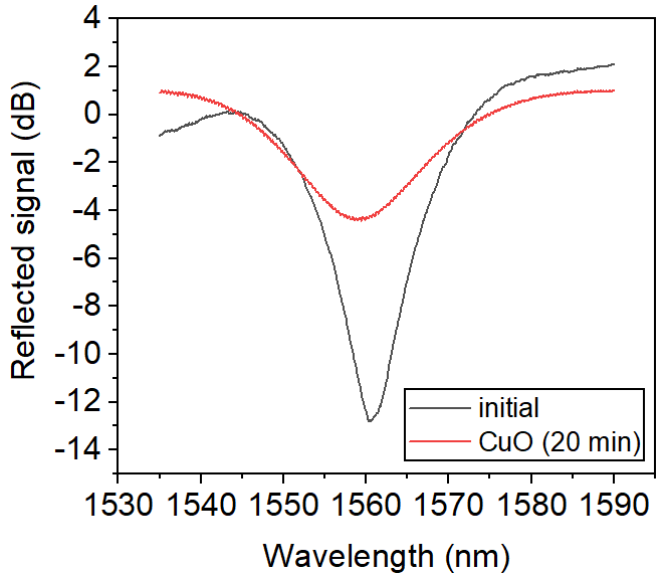
3.2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΧΑΛΚΟΥ ΣΤΟ ΦΑΣΜΑ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Φράγματα μεγάλης περιόδου ΦΜΠ εγγράφηκαν σε οπτικές ίνες, όπως περιεγράφηκε παραπάνω, και στη συνέχεια έγινε ανάπτυξη οξειδίου του χαλκού με διαφορετικούς χρόνους εναπόθεσης ώστε να προκύψουν αισθητήρια με συγκεκριμένο πάχος του ευαίσθητου υλικού. Στο Πίνακα 1 παρουσιάζονται πληροφορίες για το χρόνο εναπόθεσης και το πάχος του οξειδίου του χαλκού που προέκυψαν για καθένα από τα 4 αισθητήρια που μελετήθηκαν. Τα πάχη μετρήθηκαν στα επιστρώματα σε επίπεδες επιφάνειες, που προαναφέρθηκαν, χρησιμοποιώντας κατατομομετρο (profilometer). Από τον Πίνακα 1 γίνεται αντιληπτό πως όσο αυξάνεται ο χρόνος έκθεσης της οπτικής ίνας στα άτομα οξειδίου του χαλκού τόσο αυξάνεται και το πάχος της επίστρωσης.

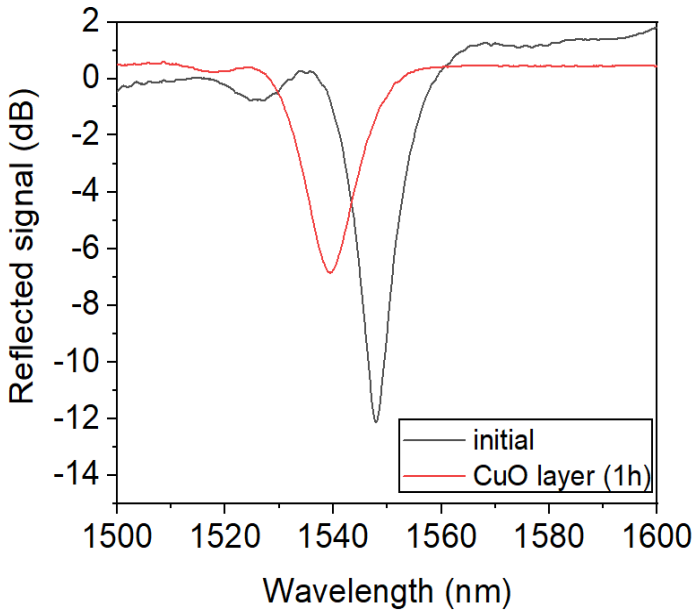
Αριθμός αισθητηρίου	Χρόνος έκθεσης (min)	Πάχος (nm)
1ο	90	2240
2ο	60	1270
3ο	20	330
4ο	1.5	30

Πίνακας 1: Χρόνος έκθεσης των αισθητηρίων σε σχέση με το πάχος της επίστρωσης

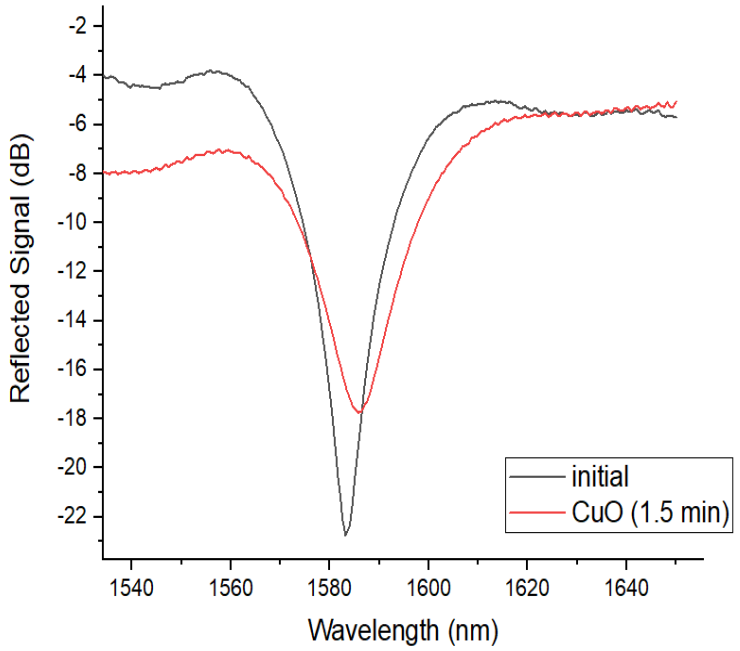
Στη συνέχεια για τον χαρακτηρισμό των αισθητηρίων μελετήθηκαν τα φάσματα διέλευσης καθενός από τα ΦΜΠ του Πίνακα 1 και συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πριν την εναπόθεση του επιστρώματος CuO. Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 21-23 η δημιουργία του επιστρώματος επηρεάζει την ένταση και το μήκος κύματος των ζωνών εξασθένισης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 21: Φάσμα διέλευσης ΦΜΠ πριν και μετά την εναπόθεση επιστρώματος CuO πάχους 330 nm



Εικόνα 22: Φάσμα διέλευσης ΦΜΠ πριν και μετά την εναπόθεση επιστρώματος CuO πάχους 1270 nm



Εικόνα 23: Φάσμα διέλευσης ΦΜΠ πριν και μετά την εναπόθεση επιστρώματος CuO πάχους 30 nm

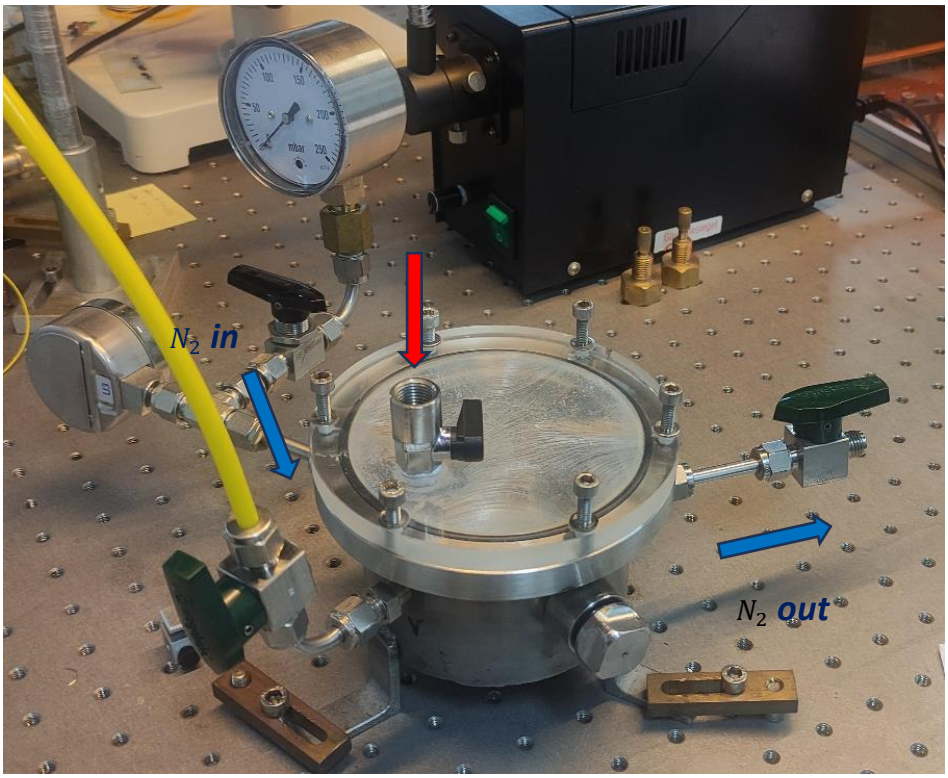
Πάχος (nm)	Δλ (nm)	ΔS (dB)
1270	-8.6	-5.0
330	-1.5	-8.6
30	2.7	-7.0

Πίνακας 2: Επίδραση του πάχους του επιστρώματος στο μήκος κύματος και στην ένταση της ζώνης εξασθένισης

Από τον Πίνακα 2 παρατηρείται πως για το λεπτό επίστρωμα των 30 nm η μετατόπιση της ζώνης εξασθένισης είναι προς μεγαλύτερα μήκη κύματος ενώ όσο το πάχος του επιστρώματος αυξάνεται το φαινόμενο αναστρέφεται (μετατόπιση προς μικρότερα μήκη κύματος)

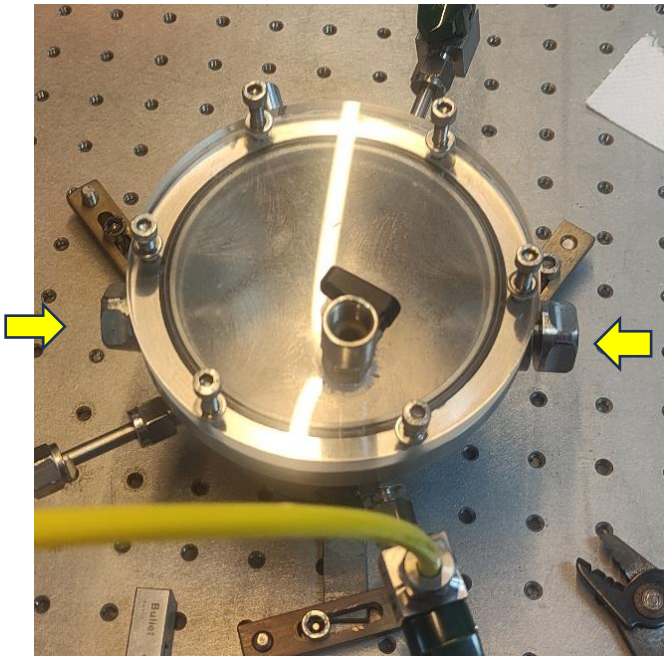
3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Για τη μελέτη των αισθητηρίων χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε θάλαμο από ανοξείδωτο χάλυβα (Εικόνα 24). Η προς μελέτη ουσία εισέρχεται σε υγρή μορφή με απώτερο σκοπό τη δημιουργία ατμών. Η χωρητικότητα του θαλάμου είναι στα 0.5 L και η αυξανόμενη πίεση εντός του θαλάμου μετριέται με τη βοήθεια ενός μανομέτρου.



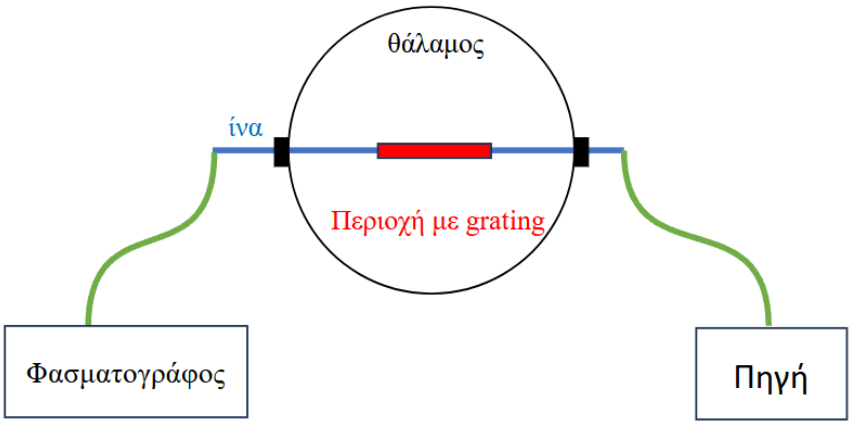
Εικόνα 24: Θάλαμος μελέτης αισθητηρίων υπό την παρουσία υδρατμών

Η εισχώρηση της ουσίας προς ανίχνευση γίνεται από κατάλληλη υποδοχή η οποία βρίσκεται στο καπάκι του θαλάμου (κόκκινο βέλος). Το καπάκι του θαλάμου είναι από διαφανές plexiglass για να μας δίνει ορατότητα εντός του θαλάμου. Επίσης, στο πλάι του θαλάμου υπάρχει μια υποδοχή που συνδέεται με μια φιάλη αζώτου (μπλε βέλος). Το άζωτο χρησιμοποιείται, πριν τη μέτρηση, για να σιγουρευτούμε πως ο θάλαμος είναι αεροστεγώς κλεισμένος και, στο τέλος της μέτρησης, για να επισπεύσουμε τη διαδικασία επαναφοράς του αισθητηρίου.



Εικόνα 25: Κάτοψη θαλάμου

Τέλος, δεξιά και αριστερά του θαλάμου (κίτρινα βέλη) υπάρχουν υποδοχείς για την τοποθέτηση της ίνας (Εικόνα 25). Ο αισθητήρας τοποθετείται στο θάλαμο και συνδέεται με τη πηγή και τον οπτικό αναλυτή φάσματος σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 26).



Εικόνα 26: Σχηματική αναπαράσταση τοποθέτησης και σύνδεσης του αισθητήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

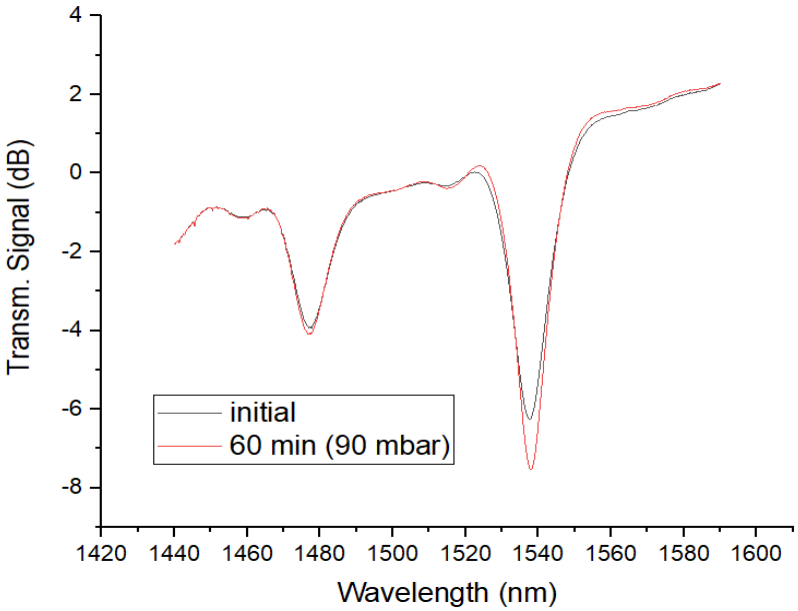
ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΜΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ

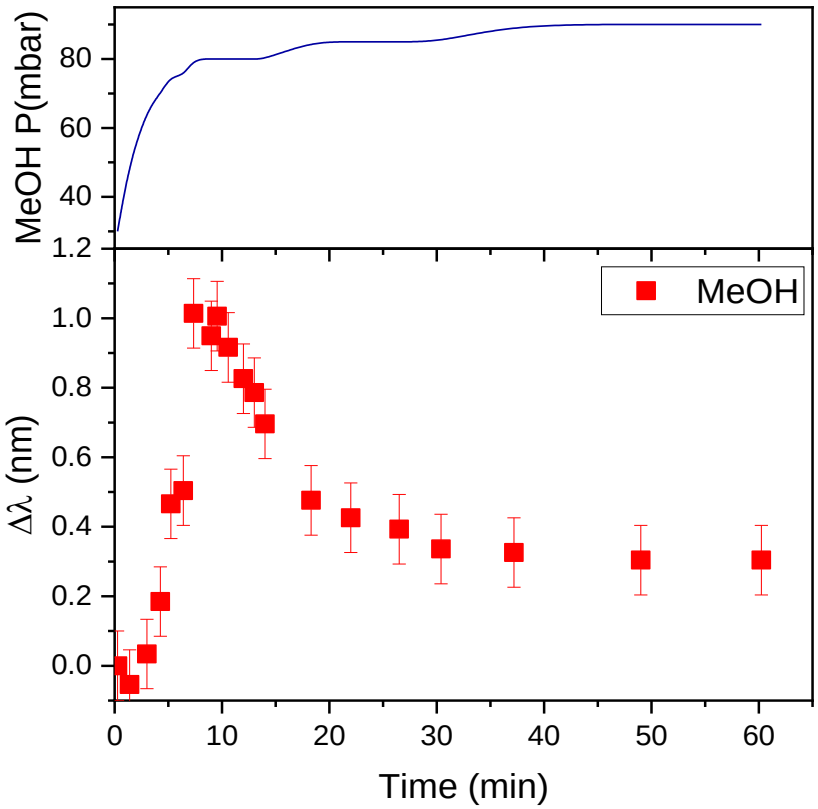
4.1.1 ΜΕΘΑΝΟΛΗ

Η πρώτη έκθεση του αισθητηρίου, πάχους επίστρωσης 1270 nm, ήταν σε 0.5 ml μεθανόλης. Στην Εικόνα 27 απεικονίζεται το αρχικό φάσμα διέλευσης του αισθητηρίου με μαύρο χρώμα και μετά από μια ώρα, που αντιστοιχεί σε πίεση 90 mbar, με κόκκινο χρώμα. Ο οπτικός τρόπος μετάδοσης που μελετήθηκε βρίσκεται σε $\lambda_{max} = 1537.6$ nm. Από το φάσμα διέλευσης είναι ορατό πως η μεθανόλη έχει αυξήσει την ένταση της ζώνης εξασθένησης και έχει μετατοπίσει το μέγιστο μήκος κύματος.



Εικόνα 27: Κανονικοποιημένα φάσματα διέλευσης για 0 και 90 mbar Μεθανόλης

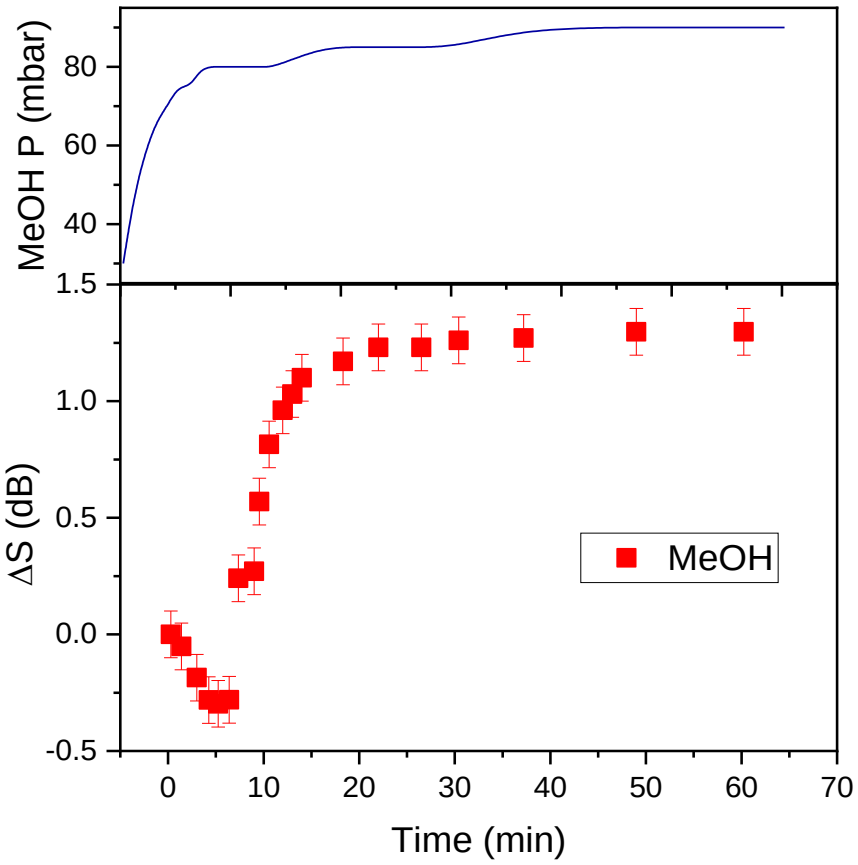
Στην Εικόνα 28 παρουσιάζονται οι μεταβολές του κεντρικού μήκους κύματος της $2^{ης}$ ζώνης εξασθένισης κατά το χρόνο δημιουργίας των ατμών μεθανόλης και για χρονικό διάστημα 60 λεπτών. Στο κάτω διάγραμμα είναι η μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος από τη $2^{η}$ ζώνη εξασθένησης σαν συνάρτηση του χρόνου. Στο πάνω διάγραμμα απεικονίζεται η μεταβολή της πίεσης στο θάλαμο στον αντίστοιχο χρόνο.



Εικόνα 28: Διάγραμμα μεταβολής του κεντρικού μήκους κύματος και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου

Από την Εικόνα 28, φαίνεται πως το μέγιστο μήκος κύματος της ζώνης εξασθένισης, αρχικά αυξάνεται και μεγιστοποιείται με μετατόπιση 1.0 nm μετά από περίπου 10 λεπτά. Στη συνέχεια, παρατηρείται αναστροφή της μετατόπισης προς μικρότερα μήκη κύματος ενώ για χρόνο μεγαλύτερο των 30 λεπτών η απόκριση σταθεροποιείται στα 0.3 nm.

Αντίστοιχα στην Εικόνα 29 προβάλλεται η μεταβολή της έντασης της κύριας ζώνης εξασθένισης της Εικόνας 27 σαν συνάρτηση του χρόνου. Στο πάνω διάγραμμα απεικονίζεται η πίεση στο εσωτερικό του θαλάμου σαν συνάρτηση του χρόνου.

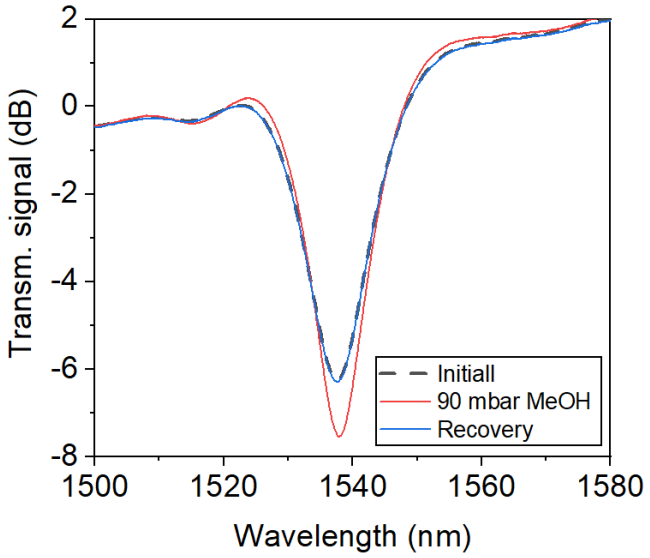


Εικόνα 29: Διάγραμμα μεταβολής της έντασης της ζώνης εξασθένησης και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου

Αντίστοιχα με τις μεταβολές του μήκους κύματος και για την ένταση, οι μεταβολές είναι μη μονοτονικές. Αρχικά η ένταση μειώνεται μέχρι τα -0.4 dB για περίπου τα πρώτα 5 λεπτά της μέτρησης και στη συνέχεια αυξάνεται μέχρι που φτάνει τη τιμή των 1.3 dB και σταθεροποιείται στα 30 λεπτά έκθεσης σε περιβάλλον ατμών μεθανόλης.

Μετά το πέρας των μετρήσεων, ανοίχτηκε ο θάλαμος με σκοπό να μελετηθεί η επαναφορά του αισθητηρίου. Το άδειασμα του θαλάμου φαινόταν να τείνει να επαναφέρει το αισθητήριο στην αρχική του κατάσταση αλλά με πολύ αργό ρυθμό. Για αυτό το λόγο, άζωτο διοχετεύθηκε στον θάλαμο με σκοπό την επιτάχυνση της επαναφοράς του αισθητηρίου. Στην Εικόνα 30 παρουσιάζεται το φάσμα διέλευσης του φωτός κατά την επαναφορά του αισθητηρίου. Με διακεκομμένες γραμμές

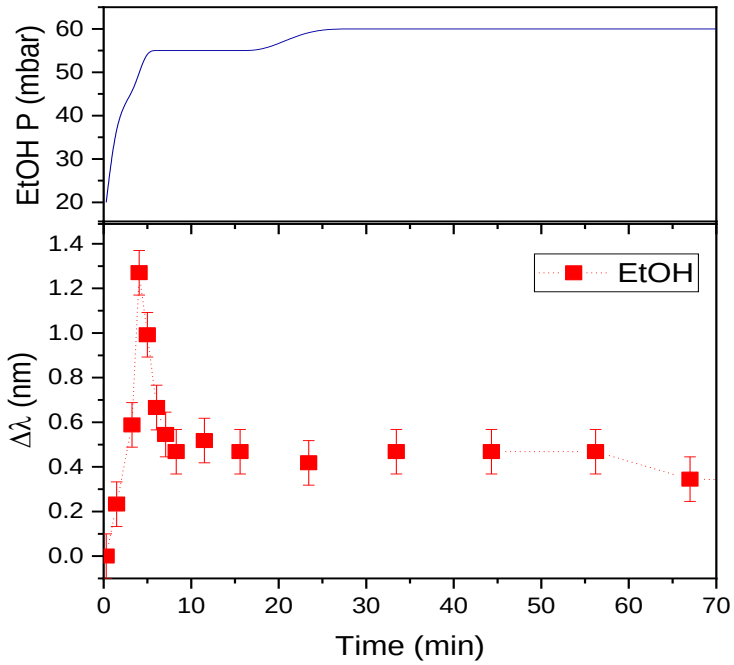
απεικονίζεται το αρχικό φάσμα, με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η τελική μέτρηση και με μπλε η μέτρηση επαναφοράς. Είναι εμφανές ότι ο αισθητήρας επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Το γεγονός αυτό τον καθιστά επαναχρησιμοποιήσιμο.



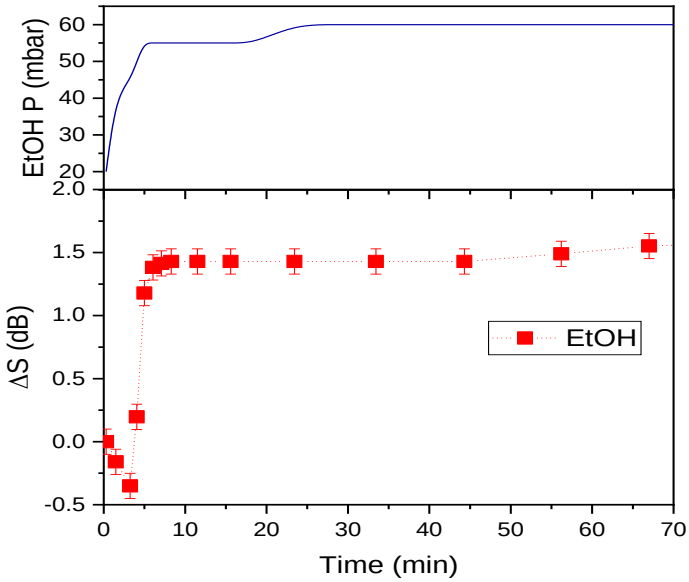
Εικόνα 30: Φάσμα διέλευσης επαναφοράς του αισθητηρίου

4.1.2. ΑΙΘΑΝΟΛΗ

Η δεύτερη έκθεση του αισθητηρίου ήταν σε 0.5 ml αιθανόλης. Τόσο οι μετρήσεις που συλλέχθηκαν όσο και η ανάλυση αυτών έγινε με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω



Εικόνα 31: Διάγραμμα μεταβολής του κεντρικού μήκους κύματος και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου

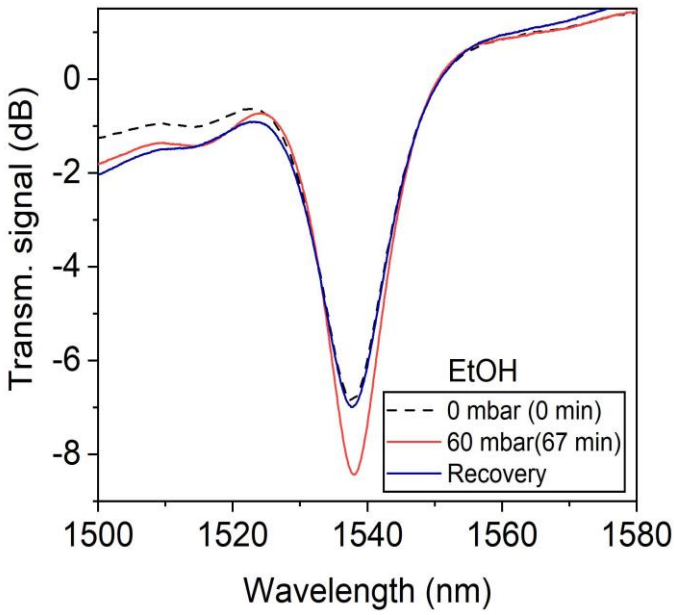


Εικόνα 32: Διάγραμμα μεταβολής της έντασης της ζώνης εξασθένησης και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου

Όπως και με τη μεθανόλη, το Δλ αρχικά αυξάνεται μέχρι τη τιμή των 1.3 nm περίπου στα 5 πρώτα λεπτά και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την τιμή των 0.4 nm και σταθεροποιείται μετά από περίπου 15 λεπτά. Στην Εικόνα 22, φαίνεται πως η

ΔS ακολουθεί ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με τη μεθανόλη μόνο που με την αιθανόλη η ΔS φτάνει τη τιμή των 1.5 dB μετά από περίπου 15 λεπτά μέτρησης.

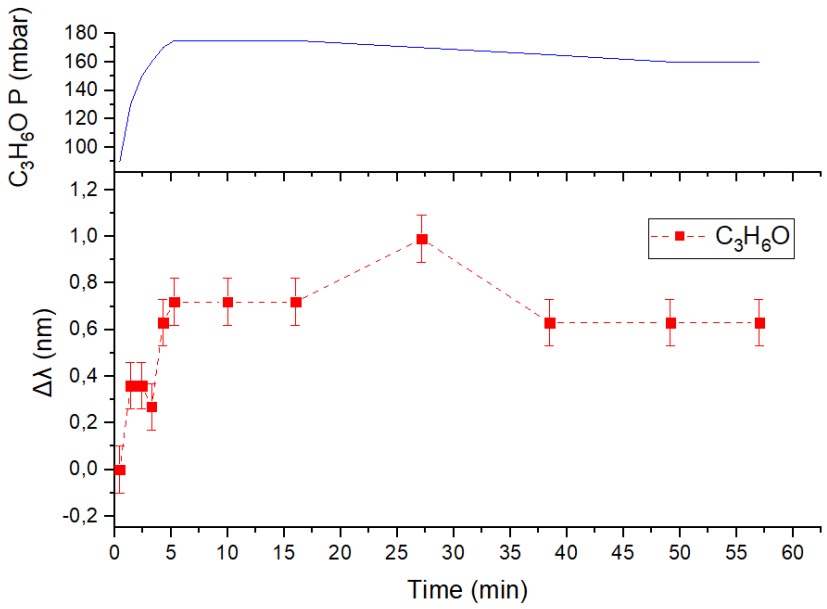
Στην Εικόνα 33 φαίνεται η πλήρης επαναφορά του αισθητήρα στην αρχική του κατάσταση μετά την απομάκρυνση των ατμών αιθανόλης



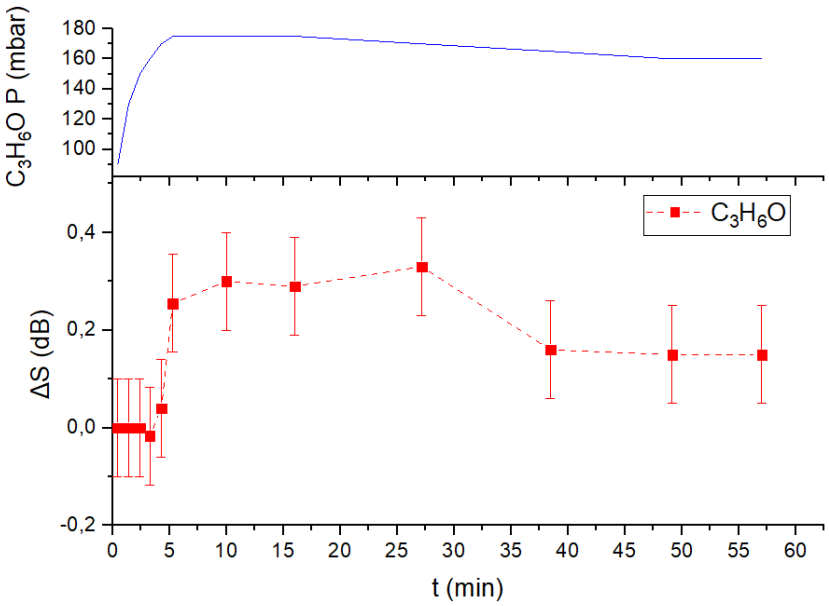
Εικόνα 33: Φάσμα διέλευσης επαναφοράς του αισθητηρίου

4.1.3. ΑΚΕΤΟΝΗ

Η επόμενη πτητική ένωση που μελετήθηκε, χρησιμοποιώντας το ίδιο αισθητήριο με πριν, ήταν η ακετόνη με 0.5 ml διαλύτη να προστίθενται στο θάλαμο για τη δημιουργία ατμών. Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις η παρουσία ατμών στο θάλαμο προκαλεί μεταβολή στην ένταση και το μήκος κύματος της ζώνης εξασθένισής. Για την περίπτωση όμως των ατμών ακετόνης οι μεταβολές είναι μονοτονικές αλλά μικρότερης έκτασης. Παρατηρείται αύξησης στο μήκος κύματος και στην ένταση μέχρι την επίτευξη κορεσμού.

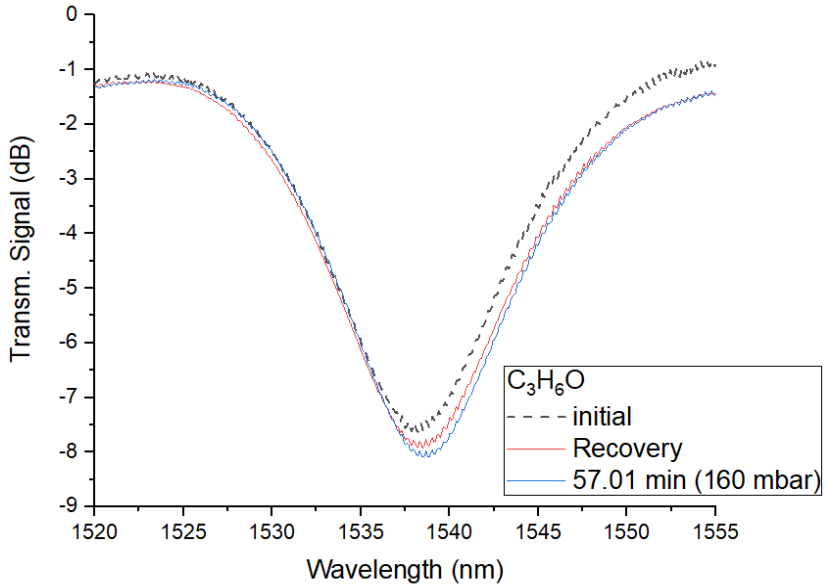


Εικόνα 34: Διάγραμμα μεταβολής του κεντρικού μήκους κύματος και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου



Εικόνα 35: Διάγραμμα μεταβολής της έντασης της ζώνης εξασθένησης και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου

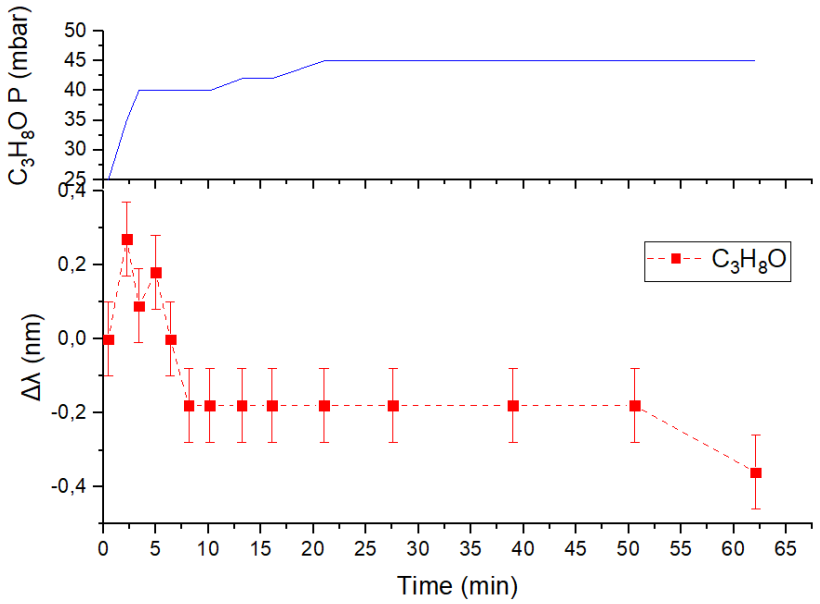
Από την Εικόνα 34, το μήκος κύματος φαίνεται να αυξάνεται κατά 0.6 nm και πολύ γρήγορα (5-7 λεπτά) σταθεροποιείται. Αντίστοιχα η ένταση αυξάνεται κατά 0.2-0.3 dB. Κατά τα τον έλεγχο της συμπεριφοράς επαναφοράς του αισθητηρίου παρατηρήθηκε ότι οι αλλαγές είναι κατά ένα βαθμό μη αναστρέψιμες όπως φαίνεται στην Εικόνα 36.



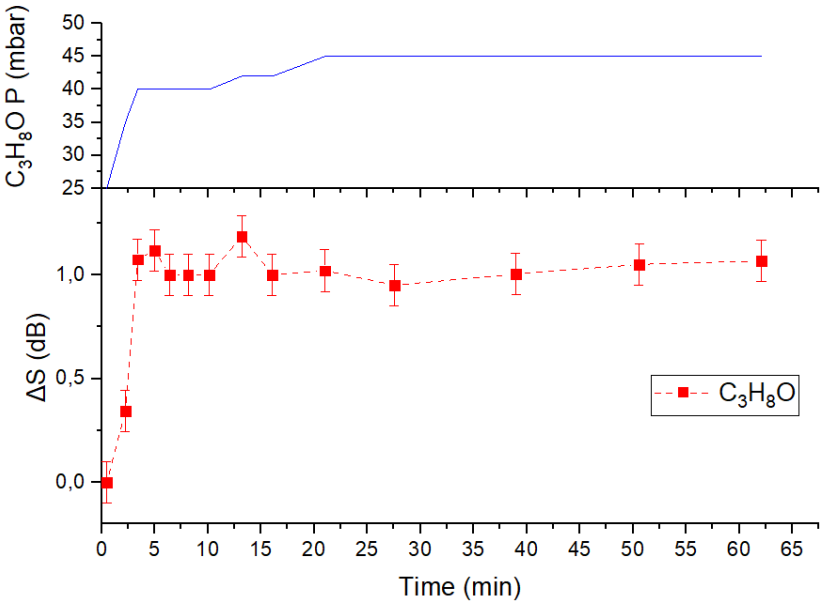
Εικόνα 36: Φάσμα διέλευσης επαναφοράς του αισθητηρίου

4.1.4. ΙΣΟΠΡΟΠΑΝΟΛΗ

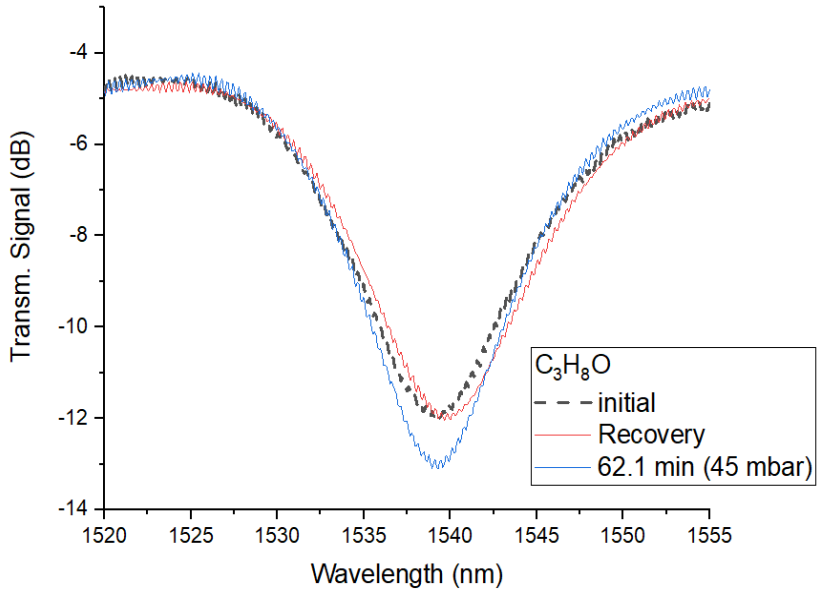
Τέλος μελετήθηκε και ευαισθησία του αισθητηρίου σε ατμούς ισοπροπανόλης (0.5 ml). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 37, το μήκος κύματος αυξάνεται μέχρι τα 0.2 nm για περίπου τα πρώτα 2.5 λεπτά της μέτρησης και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι που φτάνει τη τιμή -0.2 nm . Η ένταση, σε αντίθεση με τη μεθανόλη και αιθανόλη, αυξάνεται μέχρι τη τιμή 1.1 dB. Η επαναφορά του αισθητήριου, μετά την απομάκρυνση των ατμών ισοπροπανόλης είναι επιτυχής (Εικόνα 39).



Εικόνα 37: Διάγραμμα μεταβολής του κεντρικού μήκους κύματος και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου



Εικόνα 38: Διάγραμμα μεταβολής της έντασης της ζώνης εξασθένησης και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου



Εικόνα 39: Φάσμα διέλευσης κατά τη διάρκεια της επαναφοράς του αισθητηρίου

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της απόκρισης του αισθητηρίου ΦΜΠ με επίστρωση CuO πάχους 1270 nm.

	$\Delta\lambda_{peak}$ (nm)	$\Delta\lambda_{final}$ (nm)	ΔS_{min} (dB)	ΔS_{final} (dB)
Μεθανόλη	1.0	0.3	-0.4	1.3
Αιθανόλη	1.3	0.4	-0.4	1.5
Ακετόνη	-	0.6	-	0.2
Ισοπροπανόλη	0.2	-0.2	-	1.1

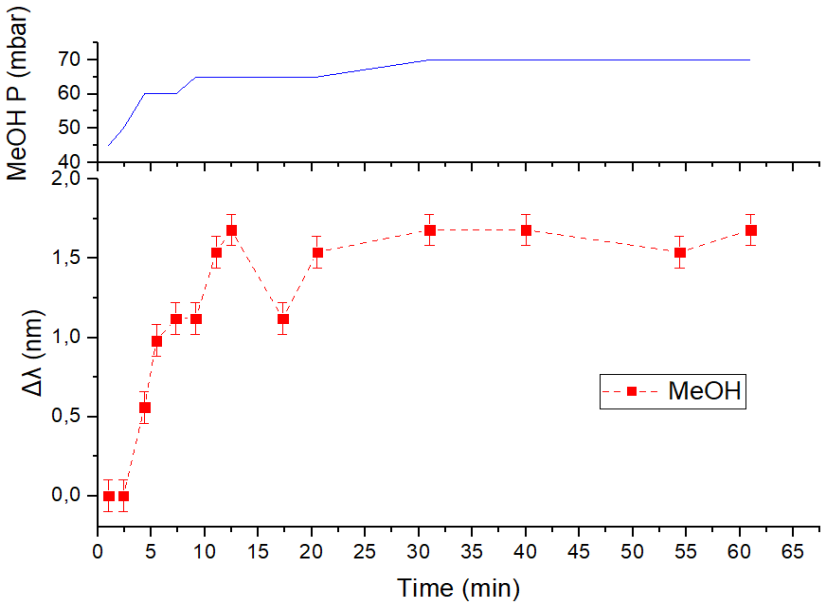
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αισθητηρίου με πάχος επίστρωσης 1270 nm

Από τον Πίνακα 2, γίνεται αντιληπτό πως το αισθητήριο παρουσιάζει ομοιότητα στην απόκριση για μεθανόλη και αιθανόλη. Διαφορές παρατηρούνται στην τιμή μεγιστοποίησης της μεταβολής του μήκους κύματος ($\Delta\lambda_{peak}$) καθώς επίσης και στην τιμή κορεσμού της έντασης του ΦΜΠ. Επίσης, από τα αποτελέσματα του Πίνακα 2 γίνεται εμφανές πως το ΦΜΠ, με επίστρωση πάχους 1270 nm, είναι ικανό να ανιχνεύσει και να διαχωρίσει την παρουσία ατμών ισοπροπανόλης. Το συμπέρασμα αυτό προέκυψε παρατηρώντας πως η ισοπροπανόλη είναι η μοναδική πτητική ένωση που τείνει να μετατοπίσει το μήκος κύματος συντονισμού προς το κυανό τμήμα του φάσματος. Επιπλέον, αν επικεντρωθούμε στις μεταβολές στην έντασή της ζώνης εξασθένισης, παρατηρείται σχεδόν μηδενική ευαισθησία σε ατμούς ακετόνης.

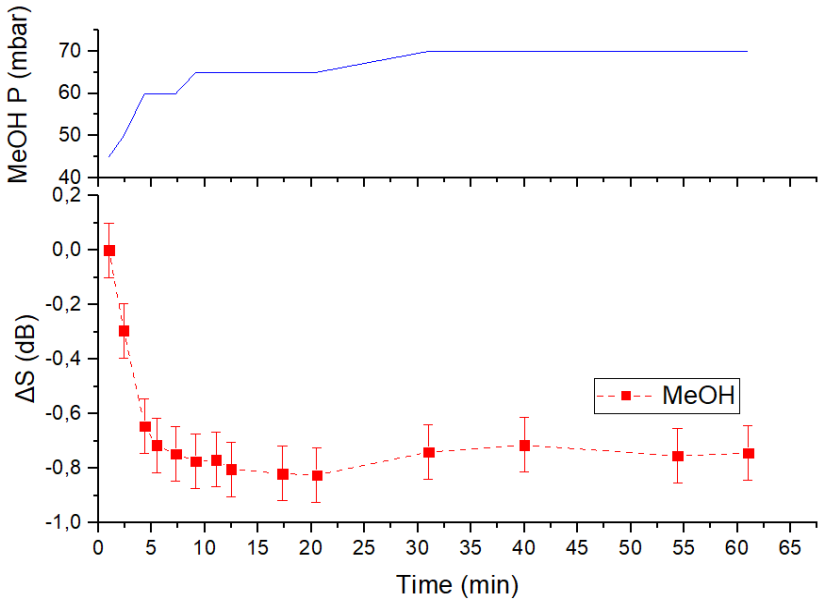
4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΜΑΤΟΣ CuO

Για να μελετήσουμε την επίδραση του πάχους του επιστρώματος CuO στην απόκριση του αισθητηρίου κατασκευάστηκαν νέα ΦΜΠ και δημιουργήθηκαν επιστρώσεις CuO διαφορετικού πάχους και συγκεκριμένα 2240, 330 και 30 nm. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασίας μελετήθηκε, διαδοχικά, η απόκριση τους σε 0.5 ml μεθανόλης.

Στις Εικόνες 40 &41 παρουσιάζεται η απόκριση για το επίστρωμα πάχους 2240 nm.



Εικόνα 40: Διάγραμμα μεταβολής του κεντρικού μήκους κύματος και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου για το επίστρωμα 2240 nm.

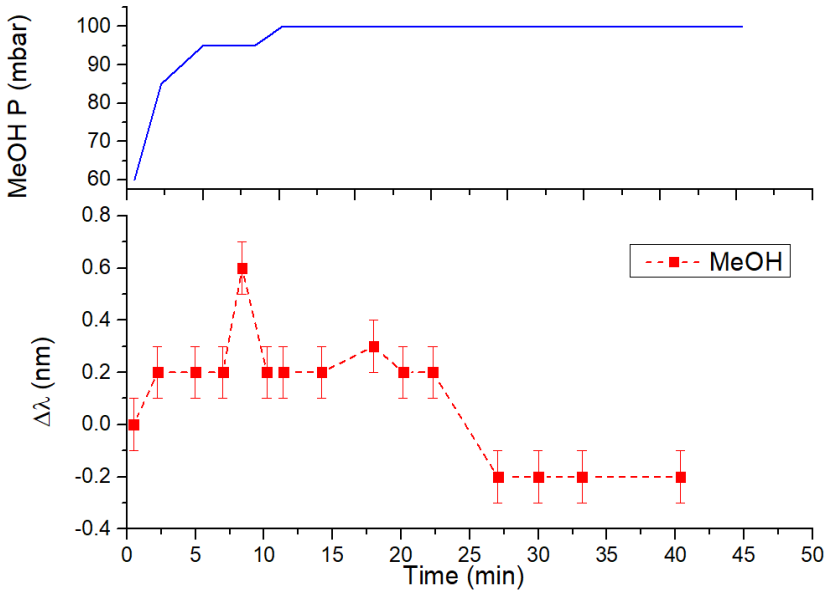


Εικόνα 41: Διάγραμμα μεταβολής της έντασης της ζώνης εξασθένησης και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου για το επίστρωμα 2240 nm.

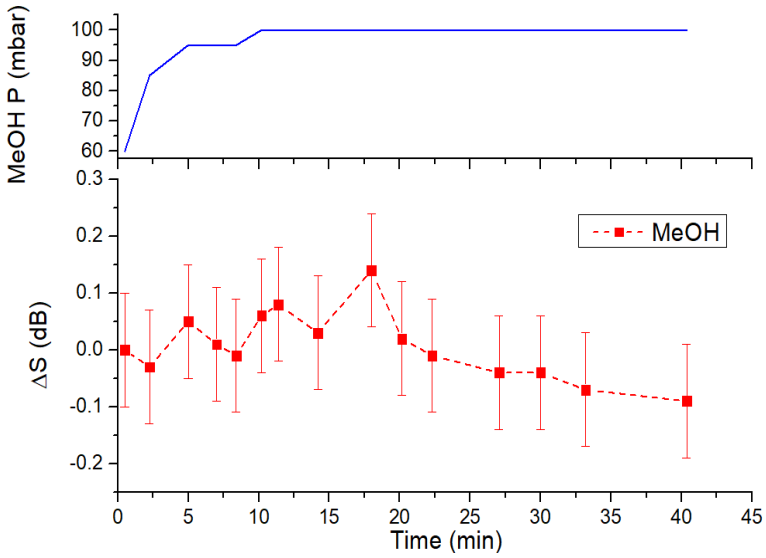
Για το αισθητήριο με επίστρωση πάχους 330 nm η μεταβολή τόσο του κεντρικού μήκους κύματος όσο και της έντασης της ζώνης εξασθένησης ήταν αμελητέα.

Ο λόγος που επιλέχτηκε το πάχος των 30 nm επίστρωσης είναι για να μελετηθούν οι αλλαγές στο σήμα της οπτικής ίνας όταν δεν γίνεται καθοδήγηση σε αυτό.

Τέλος για το αισθητήριο με επίστρωση 30 nm όπως φαίνεται στην Εικόνα 42 το μήκος κύματος αυξάνεται, στα πρώτα 2.5 λεπτά της μέτρησης, μέχρι τη τιμή των 0.2 nm και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τη τιμή των -0.2 nm. Από την Εικόνα 43, φαίνεται πως η ένταση παρουσιάζει μικρές μεταβολές γύρω από το 0 οι οποίες θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν αμελητέες.



Εικόνα 42: Διάγραμμα μεταβολής του κεντρικού μήκους κύματος και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου επίστρωμα 30 nm



Εικόνα 43: Διάγραμμα μεταβολής της έντασης της ζώνης εξασθένησης και της πίεσης σαν συνάρτηση του χρόνου επίστρωμα 30 nm

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται συγκριτικά η απόκριση του αισθητηρίου συναρτήσει του πάχους του επιστρώματος CuO.

Μεθανόλη				
Δείγμα	Πάχος (nm)	Πίεση (mbar)	$\Delta\lambda_{final}$ (nm)	ΔS_{final} (dB)
1ο	2240	70	1.6	-0.7
2ο	1270	90	0.3	1.3
3ο	330	120	~0	~0
4ο	30	100	-0.2	~0

Πίνακας 3: Πίνακας σημαντικότερων αποτελεσμάτων και για τα 4 αισθητήρια

Από τον Πίνακα 3 παρατηρούμε ότι για το πολύ λεπτό επίστρωμα (30 nm) CuO η μετατόπιση του μήκους κύματος είναι αρνητική. Όσο αυξάνεται το πάχος η τιμή μηδενίζεται (επίστρωμα 330 nm) και για μεγαλύτερα πάχη το φαινόμενο αναστρέφεται και καταγράφονται, αυξανόμενες θετικές μεταβολές.

4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ/ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία αναπτύχθηκαν και μελετήθηκαν αισθητήρια φράγματος περίθλασης μακράς περιόδου (ΦΜΠ) οπτικών ινών με διαφορετικά πάχη επίστρωσης οξειδίου του χαλκού για την ανίχνευση ατμών πτητικών οργανικών ενώσεων και συγκεκριμένα μεθανόλης, αιθανόλης, ισοπροπανόλης και ακετόνης. Η μελέτη επικεντρώθηκε στη μεταβολή του φάσματος διέλευσης του ΦΜΠ και συγκεκριμένα στα χαρακτηριστικά των ζωνών εξασθένισης του, παρουσία των προαναφερόμενων ατμών. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση του πάχους του επιστρώματος CuO στη απόκριση του αισθητήρα καθώς και η συμπεριφορά επαναφοράς τους, μετά την απομάκρυνση των ατμών.

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι ο αισθητήρας με πάχος επίστρωσης 1270 nm μπορεί να ανιχνεύσει ατμούς και των 4 πτητικών οργανικών ενώσεων που μελετήθηκαν αφού προκαλούν μεταβολές στο μήκος κύματος ή/ και στην ένταση των ζωνών εξασθένισης του ΦΜΠ. Παρατηρούνται διαφορές μεταξύ του μεγέθους των προκαλούμενων αλλαγών, γεγονός που υποδεικνύει την πιθανότητα επιλεκτικής ανίχνευσης. Συγκεκριμένα, παρουσία ατμών ισοπροπανόλης, η μετρούμενη μεταβολή του μήκους κύματος της ζώνης εξασθένησης είναι αρνητική σε αντίθεση με τις υπόλοιπες πτητικές ενώσεις που είναι θετική. Επίσης, εστιάζοντας στις αλλαγές στην ένταση της ζώνης εξασθένησης, παρουσιάζεται απουσία ευαισθησίας στην ακετόνη και σημαντική επίδραση στους μεθανόλης και αιθανόλης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του πάχους της επίστρωσης του CuO (για τα δείγματα που μελετήθηκαν) αυξάνει και την ευαισθησία του αισθητήριου για την ανίχνευση μεθανόλης.

Επιπλέον μελέτη, με περισσότερα αισθητήρια με επιστρώματα CuO διαφορετικών παχών απαιτείται, ώστε να επιβεβαιωθεί και να ποσοστικοποιηθεί η παραπάνω συμπεριφορά.

Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν επίσης, να επικεντρωθούν στη μελέτη της χρονικής απόκρισης του ΦΜΠ και στη διερεύνηση της ευαισθησίας του συστήματος σε μικρότερες συγκεντρώσεις ατμών πτητικών οργανικών ενώσεων.

Αναφορές

[1] "How Fiber Optics Was Invented" In ThoughtCo., (https://www.thoughtco.com/birth-of-fiber-optics-4091837).

[2] "Corning Introduces Optical Fibers, Enabling the Internet Backbone" In History of Information, (https://historyofinformation.com/detail.php?id=1333)

[3] Esposito, Flavio. (2021). "(INVITED)Chemical sensors based on long period fiber gratings: A review." (https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100196)

[4] Svetlana N. Khonina, Nikolay L. Kazanskiy, Muhammad A. Butt. (2023) "Optical Fibre-Based Sensors—An Assessment of Current Innovations.", (https://doi.org/10.3390/ bios13090835)

[5] Sabri, Naseer & Aljunid, S. & Salim, Muhammed & Ahmad, R. Badlishah & Kamaruddin, Rosliha. (2013). "Toward Optical Sensors: Review and Applications." (doi: %2010.1088/1742-6596/423/1/012064)

[6] https://www.pca.state.mn.us/pollutants-and-contaminants/volatile-organic-compounds-vocs

[7] Maria Konstantaki, Argyro Klini, Demetrios Anglos, Stavros Pissadakis. (2012) "An ethanol vapor detection probe based on a ZnO nanorod coated optical fiber long period grating." Optics Express, Vol. 20, No. 8

[8] M. Konstantaki, D. Skiani, D. Vurro, A. Cucinnota, S. Selleri, A. Secchi, S. Iannota and S. Pissadakis. (2020) "Silk Fibroin Enabled Optical Fiber Methanol Vapor Sensor." IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 32, No. 9: 514-517

[9] Castrellon-Uribe, Jesus. (2012). "Optical Fiber Sensors: An Overview" (DOI: 10.5772/28529)

[10] "Step-Index Multimode Fiber vs Graded-Index Multimode Fiber" In FS (https://community.fs.com/article/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html)

[11] Lopez Morales, Guadalupe & Espinosa-Luna, R. & Reyes, Claudio. (2014). "Optical characterization of amber from Chiapas." (https://doi.org/10.1117/12.2024701)

[12] "Acceptance angle in Fiber Optics" In RP Photonics Encyclopedia, (https://www.rp-photonics.com/acceptance_angle_in_fiber_optics.html)

[13] "Fiber Optics: Understanding the Basics" In Photonics, (https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Optics_Understanding_the_Basics/a25151)

[14] Heather J. Patrick, Member, OSA, Alan D. Kersey, and Frank Bucholtz. (1998) "Analysis of the Response of Long Period Fiber Gratings to External Index of Refraction" Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 9: 1606-1612

[15] Turan Erdogan. (1997) "Fiber Grating Spectra". Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 8: 1277-1294

[16] Stephen W. James, Ralph P. Tatam. (2003) "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application". Measurement Science and Technology, Vol. 14, No. 5: 49-61

[17] Vikram Bhatia. (1999) "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing". Optics Express, Vol. 4, No. 11: 457-466

[18] Consales, M., Pisco, M. & Cusano, A. (2012) "Lab-on-Fiber Technology: A New Avenue for Optical Nanosensors" Photonic Sensors Vol. 2, No.4: 289-314

[19] "Copper (II) oxide" In Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Copper(II)_oxide)

[20] "Copper Oxide: Learn its Formula, Structure, Properties, & Uses" In testbook, (https://testbook.com/chemistry/copper-oxide)

[21] Jessica Stoner. (2022) "What is Magnetron Sputtering and how does it work". Korvus-Technology (https://korvustech.com/magnetron-sputtering/)

[22] "Magnetron Sputtering: Overview" In Angstromengineering, (https://angstromengineering.com/tech/magnetron-sputtering/)

[23] Feng Shi. (2018) “Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering”. IntechOpen, (https://www.intechopen.com/online-first/63559)