



ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΖΕΡ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

***ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΤΜΩΝ
ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΕΝΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΜΜΩΝΙΑΣ***

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΡΑΝΤΖΙΩΤΗ ΕΛΕΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΗ ΜΑΡΙΑ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ 2023

| | |
|--|-----------|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 3 |
| ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ | 4 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 5 |
| ABSTRACT | 5 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο | 7 |
| <i>Εισαγωγή</i> | 7 |
| 1.1. Αισθητήρες οπτικών ινών | 8 |
| 1.1.1. Αισθητήρες οπτικών ινών με φράγματα περίθλασης..... | 11 |
| 1.1.2. Αισθητήρες οπτικών ινών με κοιλότητες Fabry-Pérot..... | 13 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο | 14 |
| <i>Θεωρία</i> | 14 |
| 2.1. Οπτικές ίνες..... | 14 |
| 2.2. Φράγματα περίθλασης Bragg οπτικών ινών | 20 |
| 2.2.1. Αρχή λειτουργίας | 20 |
| 2.2.2. Θεωρία συζευγμένων κυμάτων..... | 22 |
| 2.2.3. Υπό γωνία φράγματα περίθλασης Bragg | 27 |
| 2.3. Συμβολόμετρα Fabry-Pérot..... | 31 |
| 2.3.1. Αρχή λειτουργίας συμβολόμετρων Fabry-Pérot | 32 |
| 2.3.2. Συμβολόμετρα Fabry-Pérot και οπτικές ίνες | 35 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο | 37 |
| <i>Κατασκευή αισθητήρων</i> | 37 |
| 3.1. Κατασκευή αισθητήρων με φράγμα περίθλασης..... | 37 |
| 3.1.1. Εναπόθεση γραφενίου στην εξωτερική επιφάνεια οπτικής ίνας..... | 42 |
| 3.2. Κατασκευή αισθητήρων με κοιλότητες Fabry-Pérot | 46 |
| 3.3. Πειραματική διάταξη μελέτης αισθητηρίων | 51 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο | 54 |
| <i>Μελέτη αισθητήρων: Μετρήσεις και πειραματικά αποτελέσματα</i> | 54 |
| 4.1. Ανίχνευση ατμών αμμωνίας..... | 54 |
| 4.2. Ανίχνευση ατμών αλκοολών..... | 64 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο | 76 |
| <i>Συζήτηση αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα</i> | 76 |
| ΑΝΑΦΟΡΕΣ | 78 |

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Φωτονικών Υλικών και Διατάξεων του Ινστιτούτου Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ στο Ι.Τ.Ε. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που συνέβαλαν σημαντικά στην ολοκλήρωση της.

Αρχικά, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στη Δρ. Κωνσταντάκη Μαρία η οποία με δέχτηκε στο εργαστήριο, με δίδαξε και με συμβούλεψε. Με την καθοδήγηση της καθώς και με την αμέριστη εμπιστοσύνη που μου έδειξε, με βοήθησε με κάθε τρόπο στην εκπόνηση αυτής της έρευνας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Πισσαδάκη Σταύρο, τον υπεύθυνο του εργαστηρίου, για τις πολύτιμες συμβουλές του και για την βοήθεια που πρόσφερε στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου που ήταν πρόθυμοι να με βοηθήσουν με κάθε τρόπο στις δυσκολίες που αντιμετώπισα και να λύσουν κάθε μου απορία. Επίσης, τον Δρ. Γιαννόπουλο Σπύρο και τους συνεργάτες του καθώς, στο Ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής (ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ) πραγματοποιήθηκε τμήμα της κατασκευής των αισθητήρων.

Τέλος, την οικογένεια μου για την πολύτιμη υποστήριξη τους σε κάθε μου βήμα.

Δημοσιεύσεις

1. E. Grantzioti, S. Pissadakis, M. Konstantaki, “Miniature optical fiber sensor with photopolymerizable resin cavity for VOC vapor sensing” SPIE Optics + Optoelectronics 2023, 24 - 27 April 2023 Prague, Czech Republic
2. E. Grantzioti, S. Pissadakis, M. Konstantaki, “Compact Fabry Perot Optical Fiber End-face Probe for VOC Vapor Monitoring” CLEO/Europe-EQEC, 26 – 30 June 2023, Munich, Germany (submitted)
3. E. Grantzioti, K. Bhorkar, N. Samartzis, S. Pissadakis, S. N. Yannopoulos, M. Konstantaki, “Fluorinated Graphene Flakes as Overlayer on a Tilted Optical Fiber Bragg Grating for Ammonia Vapor Detection” CLEO/Europe-EQEC, 26 – 30 June 2023, Munich, Germany (submitted)
4. E. Grantzioti, N. Samartzis, K. Bhorkar, S. Pissadakis, S. N. Yannopoulos, M. Konstantaki, “Tilted optical fiber Bragg grating with fluorinated graphene-like overlayer for Ammonia detection” EWOFS 2023, 23- 26 May 2023 Mons, Belgium, (submitted)

Περίληψη

Τα αισθητήρια ατμών είναι συσκευές που μπορούν να ανιχνεύσουν την παρουσία και την συγκέντρωση ατμών συγκεκριμένων ουσιών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων αισθητήρων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη και η μελέτη δύο αισθητήριων οπτικών ινών για ανίχνευση ατμών πτητικών οργανικών ενώσεων και υδατικής αμμωνίας, αντίστοιχα. Οι αισθητήρες οπτικών ινών προτείνονται έναντι των συμβατικών αισθητήρων καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία, αντοχή σε αντίξοες συνθήκες, δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία, είναι φορητοί και χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος και βάρος.

Η αμμωνία σε αέρια (NH_3) ή υδατική (υδροξείδιο του αμμωνίου- NH_4OH) φάση χρησιμοποιείτε σε ένα πλήθος εφαρμογών αποτελώντας δομικό συστατικό για λιπάσματα, φάρμακα, ουσίες καθαρισμού, πλαστικά και άλλα βιομηχανικά προϊόντα. Παρά την ευρύτατη χρήση της, η ίδια η αμμωνία είναι τοξική για τον άνθρωπο. Ο αισθητήρας αμμωνίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, βασίζεται σε ένα υπό γωνία φράγμα περίθλασης Bragg οπτική ίνας με επικάλυψη φθοριούχου γραφενίου. Το γραφένιο σε περιβάλλον μορίων αμμωνίας τροποποιεί τις ιδιότητες του και κατά συνέπεια, την καθοδήγηση του φωτός εντός της ίνας, επιτρέποντας την ανίχνευση της.

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις είναι οργανικά χημικά τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή τάση ατμών σε θερμοκρασία δωματίου. Ως αποτέλεσμα, εξατμίζονται εύκολα στην ατμόσφαιρα, δημιουργώντας δυνητικά τοξικές συνθήκες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Πτητικές οργανικές ενώσεις αναδύονται από ένα μεγάλο πλήθος προϊόντων όπως βαφές, φυτοφάρμακα και καύσιμα. Για τους παραπάνω λόγους είναι αναγκαία η χρήση αξιόπιστων αισθητήρων για την ανίχνευση τους. Ο αισθητήρα πτητικών οργανικών ενώσεων και συγκεκριμένα αλκοολών που κατασκευάστηκε, αποτελείται από μια κοιλότητα φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης στο άκρο μονότροπης ίνας, δημιουργώντας έτσι ένα συμβολόμετρο Fabry-Pérot. Η παρουσία των ατμών αλκοόλης προκαλεί αλλαγές στο δείκτη διάθλασης και στο μήκος της κοιλότητας και έτσι μεταβάλλει τα φασματικά χαρακτηριστικά του ανακλώμενου φωτός.

Abstract

Vapor sensors are devices that can detect the presence and concentration of specific substances. Several types of vapor sensors are available and their characteristics depend on the requirements of each application. The purpose of this study is the development and study of two optical fiber sensors for the detection of vapors of volatile organic compounds and aqueous ammonia, respectively. Optical fiber sensors offer specific advantages compared to electronic sensors such as high sensitivity, resistance to adverse conditions, immunity to electromagnetic interference, small size and weight and remote operation.

Ammonia in gas (NH_3) or aqueous (Ammonium hydroxide- NH_4OH) phase is used in various applications including fertilizers, pharmaceutical products, cleaning fluids, plastics, and other industrial products. Despite its widespread use, ammonia is a toxic substance harmful to humans. The ammonia sensor developed in the frame of this work is based on a tilted fiber Bragg grating (TFBG) with a fluorinated graphene overlayer. When exposed to Ammonia vapors the properties of Graphene are modified alerting the guiding properties of the TFBG and thus allowing its detection.

Volatile Organic Compounds, (VOCs), are organic chemicals with a high vapor pressure at room temperature. As a result, they readily evaporate into the atmosphere, creating potentially harmful conditions for humans and the environment. VOCs are emitted by a wide array of products such as dyes, pesticides, and fuels. The sensor for volatile organic compounds, specifically alcohols, that was developed, consists of a cavity of photopolymerizable resin at the end of a single-mode fiber, thus creating a Fabry-Pérot interferometer. The presence of alcohol vapors (Methanol, Ethanol and Isopropanol) induce changes in the refractive index and length of the cavity thus altering the spectral characteristics of the reflected light.

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Οι άνθρωποι από την αρχαιότητα χρησιμοποιούσαν το φως για να επικοινωνήσουν ωστόσο, οι γνώσεις, τα μέσα και η τεχνολογία ήταν πολύ περιορισμένα. Με το πέρασμα των χρόνων νέες ανακαλύψεις και τεχνολογικά επιτεύγματα λάμβαναν χώρα προσφέροντας νέες δυνατότητες στην ανθρωπότητα και συγκεκριμένα, οι τρόποι επικοινωνίας και μετάδοσης πληροφορίας εξελίσσονται μέχρι και σήμερα με ραγδαίους ρυθμούς.

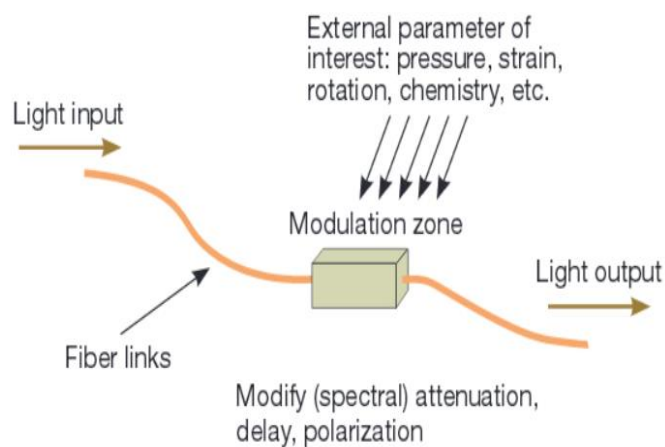
Οι οπτικές ίνες προϋπήρχαν του 1960, της χρονιάς που ανακαλύφθηκε το λέιζερ, αλλά παρουσίαζαν τεράστιες απώλειες, μόνο το 10% του φωτός που εισερχόταν σε μία ίνα σχετικά μικρού μήκους εξερχόταν από αυτή. Αυτό τις καθιστούσε ακατάλληλες για την τηλεπικοινωνία ^[1]. Ήταν γνωστό εκείνα τα χρόνια από την επιστημονική κοινότητα πως οι οπτικές ίνες από γυαλί ήταν κατάλληλοι κυματοδηγοί φωτεινής ακτινοβολίας έτσι, γίνονταν προσπάθειες για την μείωση των απωλειών με στόχο την χρήση τους στις τηλεπικοινωνίες, αντικαθιστώντας τα καλώδια χαλκού.

Η πρώτη επιτυχημένη ίνα με μειωμένες απώλειες ήταν επίτευγμα της εταιρίας Corning το 1970 όπου, κατάφεραν να τις μειώσουν κάτω από 20 dB/Km για περιοχή μήκους κύματος γύρω στα 630 nm. Μετά από 2 χρόνια, η ίδια εταιρία μειώνει τις απώλειες στα 4 dB/Km χρησιμοποιώντας προσμίξεις γερμανίου σε μια ίνα πυριτίου. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας οι απώλειες είχαν μειωθεί μέχρι και στα 0.2 dB/Km για μήκη κύματος στα 1550 nm. ^[1]

Τις τελευταίες δεκαετίες, η τεχνολογία των οπτικών ινών έχει φέρει επανάσταση στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών επιτρέποντας μετάδοση πληροφοριών μεγάλης χωρητικότητας σε μεγάλες αποστάσεις και δικτύωση με εκπληκτικά χαμηλό κόστος. Η εξέλιξη τους, το μέγεθος, το χαμηλό κόστος καθώς και οι ιδιότητες που διαθέτουν συνέβαλαν στο να επεκταθεί η χρήση τους και σε άλλους τομείς πέρα των τηλεπικοινωνιών όπως, στην ιατρική, στην οπτοηλεκτρονική, στη χημεία και στη μηχανική.

1.1. Αισθητήρες οπτικών ινών

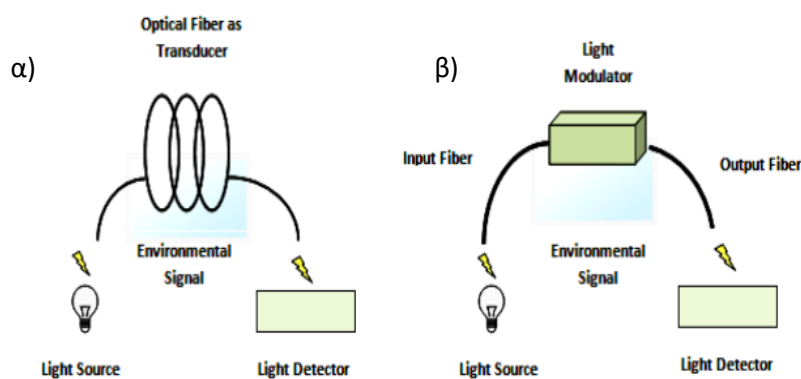
Με την συνεχή πρόοδο στον τομέα των φωτονικών υλικών άρχισε να γίνεται αντιληπτό πως οι οπτικές ίνες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, εκτός από τις τηλεπικοινωνίες, χάρις των ποικίλων πλεονεκτημάτων και ιδιοτήτων τους. Έτσι, από το 1970 ξεκίνησε η ανάπτυξη της τεχνολογίας των αισθητήριων οπτικών ινών. Το φως που διέρχεται εντός μιας ίνας χαρακτηρίζεται από τέσσερις παράγοντες: μήκος κύματος-συχνότητα, φάση, πλάτος και πόλωση. Υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις, όταν το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται η ίνα υποστεί κάποια αλλαγή, τουλάχιστον ένας από τους τέσσερις παράγοντες θα αλλάξει και η μέτρηση αυτής της αλλαγής από το σήμα εξόδου θα μας δώσει χρήσιμες πληροφορίες για το περιβάλλον. Τέτοιου είδους αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να μετρήσουν αλλαγές σε διάφορα φυσικά και χημικά μεγέθη όπως θερμοκρασία, πίεση, καταπόνηση, μετατόπιση, περιστροφή και πολλά άλλα. Επιπλέον, μπορούν να ανιχνεύσουν την παρουσία κάποιων αέριων και ατμών.^[2]



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας ενός αισθητήρα οπτικών ινών ^[3]

Ένα σύστημα αισθητηρίου οπτικών ινών αποτελείται από μια πηγή φωτός (λείζερ, LED), μια οπτική ίνα, ένα στοιχείο ανίχνευσης και από έναν οπτικό ανιχνευτή (οπτικός αναλυτής φάσματος) όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.^[4]

Οι αισθητήρες οπτικών ινών μπορούν να κατανεμηθούν σε 2 κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιείται η οπτική ίνα, στους ενδογενής και στους εξωγενής (Εικόνα 2). Στη πρώτη κατηγορία η περιοχή ανίχνευσης βρίσκεται εντός της ίνας, έχοντας αλλάξει τα φυσικά χαρακτηριστικά της και κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά του φωτός που εισέρχεται (π.χ. φράγματα περίθλασης στο πυρήνα). Επιπλέον, το φως δεν διαφεύγει από αυτή εκτός από το άκρο εξόδου που λαμβάνουμε το σήμα. Στη δεύτερη περίπτωση, η ίνα χρησιμοποιείται για την καθοδήγηση του φωτός. Το φως εξέρχεται από το άκρο της ίνας, φτάνει σε μια περιοχή ανίχνευσης (π.χ. κοιλότητα Fabry-Pérot) και επιστρέφει μέσα στον πυρήνα. Η περιοχή ανίχνευσης είναι προέκταση της ίνας και κατασκευάζεται με πολύ μικρά οπτικά στοιχεία έτσι ώστε να τροποποιεί τις ιδιότητες του φωτός ανταποκρινόμενη στις αλλαγές του περιβάλλοντος.^[4,5]



Εικόνα 2: α) Ενδογενής αισθητήρας οπτικών ινών, β) Εξωγενής αισθητήρας οπτικών ινών ^[5]

Πλέον, οι αισθητήρες οπτικών ινών υπερिशύουν έναντι των συμβατικών ηλεκτρικών αισθητήρων σε ορισμένες περιπτώσεις. Το γεγονός αυτό οφείλετε στα ποικίλα χαρακτηριστικά τους όπως, το μικρό μέγεθος και το μηδαμινό βάρος τους τα οποία καθιστούν εύκολη την χρήση τους και την τοποθέτησή τους. Επιπλέον, είναι ανεπηρέαστες στην παρουσία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και αντέχουν σε αντίξοες συνθήκες όπως σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση.

Σήμερα, υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων οπτικών ινών που αξιοποιούνται σε ένα πλήθος εφαρμογών. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα αναφερθούμε σε δύο είδη τέτοιων αισθητήρων. Το πρώτο είδος βασίζεται στην εγγραφή φραγμάτων περίθλασης, υπό γωνία στη συγκεκριμένη περίπτωση, εντός του

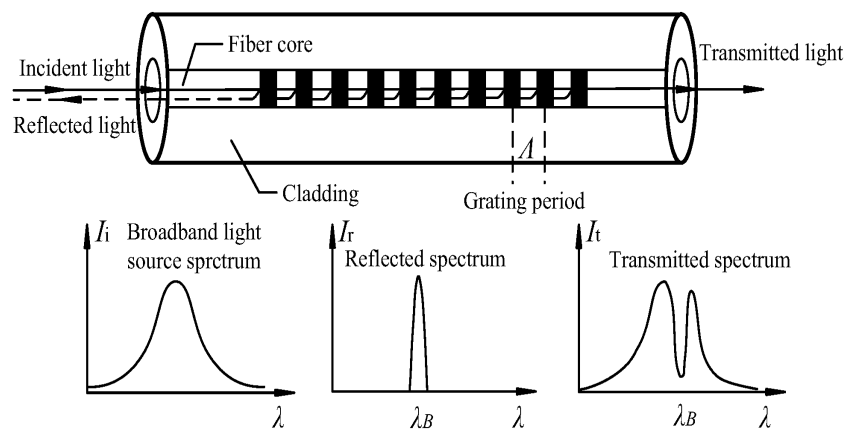
πυρήνα της οπτικής ίνας για την ανίχνευση αερίων αμμωνίας. Ενώ, στην δεύτερη περίπτωση μελετώνται οι αισθητήρες που κατασκευάζονται με ενσωμάτωση κοιλότητας Fabry-Pérot στο άκρο της ίνας. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση ατμών αμμωνίας και ατμών πτητικών οργανικών ενώσεων και συγκεκριμένα ατμών αλκοολών, αντίστοιχα.

1.1.1. Αισθητήρες οπτικών ινών με φράγματα περίθλασης

Η ανάπτυξη αισθητήρων που βασίζονται σε φράγματα περίθλασης ξεκίνησε όταν διαπιστώθηκε για πρώτη φορά πως οι ίνες παρουσιάζουν φωτοευαισθησία κατά την έκθεση τους σε υπεριώδη ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, για πρώτη φορά το 1978 ο K. O. Hill και οι συνεργάτες του ανακάλυψαν ότι για παρατεταμένη έκθεση μιας ίνας πυριτίου με προσμίξεις γερμανίου σε ακτινοβολία, μέσω ενός λείζερ ιόντων αργού, η εξασθένηση της ίνας αυξανόταν. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι κατά την διάρκεια της έκθεσης, αυξήθηκε η ανάκλαση του φωτός εντός της ίνας, το οποίο ήταν το αποτέλεσμα της δημιουργίας ενός μόνιμου φράγματος στον πυρήνα. Το φράγμα αυτό είναι μια μόνιμη φωτοεπαγόμενη περιοδική δομή του δείκτη διάθλασης του πυρήνα της ίνας. Η περιοδική μεταβολή του δείκτη διάθλασης έχει σαν αποτέλεσμα να αλλάζει η πορεία του φωτός για συγκεκριμένα μήκη εισερχόμενης ακτινοβολίας.^[6]

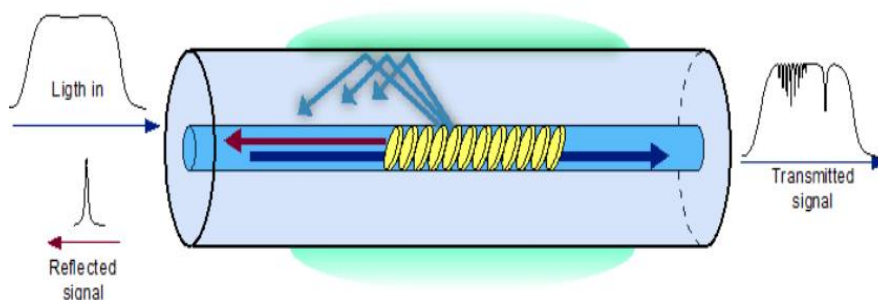
Σήμερα, υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορούμε να εγγράψουμε φράγματα περίθλασης στον πυρήνα της ίνας καθώς και διάφοροι τύποι φραγμάτων. Οι πιο συχνοί είναι τα φράγματα περίθλασης μικρής περιόδου ή αλλιώς φράγματα περίθλασης Bragg, υπό γωνία φράγματα περίθλασης Bragg και φράγματα περίθλασης μεγάλης περιόδου.

Όταν το φως εισέλθει στην ίνα ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος ανακλάται (μήκος κύματος Bragg- λ_B) από το εγγεγραμμένο φράγμα περίθλασης ενώ το υπόλοιπο διαδίδεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Υπό την παρουσία κάποιων εξωτερικών παραγόντων όπως τάση, υγρασία, ατμοί, αλλαγές στη θερμοκρασία κτλ προκύπτει μεταβολή της περιόδου του φράγματος ή του δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε μετατοπισμένα φάσματα σε σχέση με το αρχικό. Σε αυτή την ιδιότητα βασίζονται οι αισθητήρες φραγμάτων περίθλασης.



Εικόνα 3: Φράγμα περίθλασης στο πυρήνα οπτικής ίνας και τα αντίστοιχα φάσματα της εισερχόμενης, διερχόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας [7]

Στη συγκεκριμένη εργασία κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν αισθητήρες με υπό γωνία φράγμα περίθλασης Bragg (Tilted Fiber Bragg Grating). Σε αυτή την περίπτωση, οι ανακλαστικές επιφάνειες σχηματίζουν γωνία με τον άξονα διάδοσης του φωτός η οποία καθορίζεται κατά την διάρκεια εγγραφής (Εικόνα 4). Με την προαναφερόμενη δομή, παρατηρούμαι ένα διαφορετικό φάσμα σε σχέση με τα φράγματα Bragg καθώς, ο τρόπος ταλάντωσης του πυρήνα να συζευγνύεται με τρόπους ταλάντωσης του περιβλήματος. Επιπλέον, ποσοστό του φωτός διαφεύγει εκτός ίνας. Περισσότερα γι' αυτό αναφέρονται στη θεωρία του Κεφαλαίου 2.

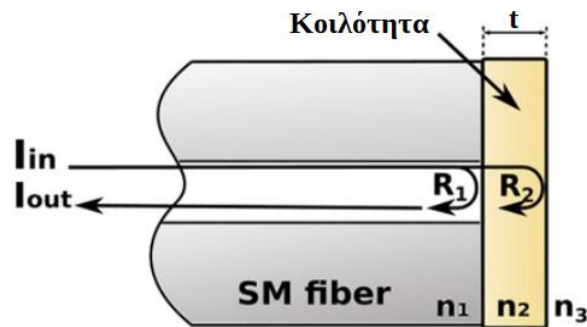


Εικόνα 4: Υπό γωνία φράγμα περίθλασης και τα αντίστοιχα φάσματα της εισερχόμενης, διερχόμενης και ανακλώμενης ακτινοβολίας [8]

Υπό την επίδραση εξωτερικών παραγόντων προκαλούνται αλλαγές στους τρόπους μετάδοσης του φωτός στο περίβλημα, στο πυρήνα καθώς και στις απώλειες φωτός και συνεπώς, αλλαγές στο φάσμα που λαμβάνουμε.

1.1.2. Αισθητήρες οπτικών ινών με κοιλότητες Fabry-Pérot

Ένα είδος αισθητήριων οπτικών ινών είναι οι αισθητήρες που βασίζονται σε συμβολόμετρα Fabry-Pérot. Μια περίπτωση τέτοιας διάταξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Κοιλότητα F-P στο άκρο μονότροπης ίνας ^[9]

Το φως εντός μιας κοιλότητας F-P ανακλάται διαδοχικά ανάμεσα στις δύο ημιανακλαστικές επιφάνειες και συμβάλει ενισχυτικά υπό κάποιες προϋποθέσεις.

Η λειτουργία του αισθητήρα βασίζεται στο γεγονός πως η υπό μελέτη εξωτερική επίδραση αλλάζει τα οπτικά χαρακτηριστικά (δείκτη διάθλασης, απορρόφηση) του υλικού της κοιλότητας καθώς και το μήκος της οπότε, προκύπτει ένα μετατοπισμένο φάσμα απόκρισης σε σχέση με το αρχικό.

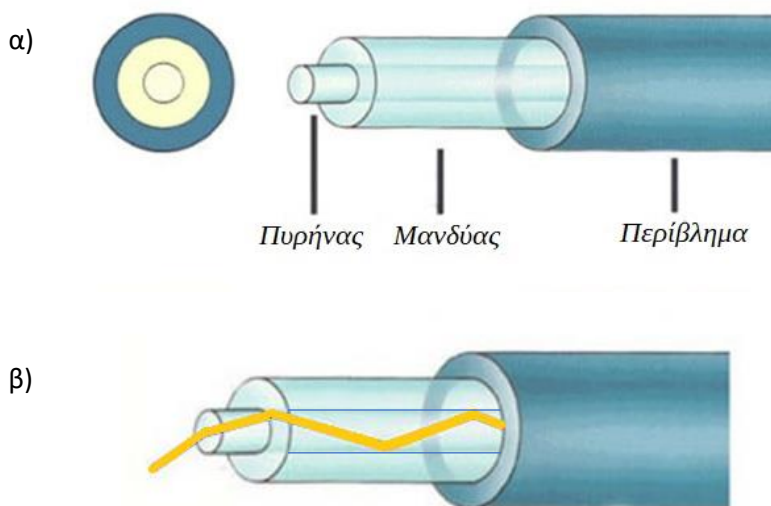
Κεφάλαιο 2^ο

Θεωρία

2.1. Οπτικές ίνες

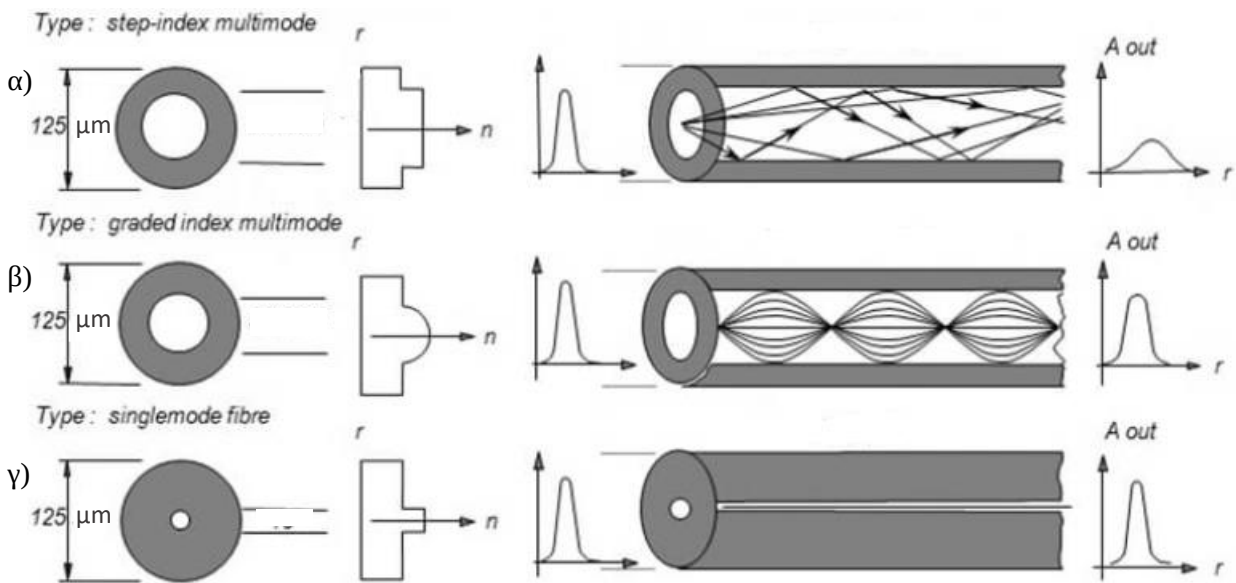
Οι οπτικές ίνες είναι πολύ λεπτοί διαφανείς κυματοδηγοί μέσω των οποίων μεταδίδεται πληροφορία υπό την μορφή φωτός. Το φως εισέρχεται στην ίνα χρησιμοποιώντας είτε πηγή λέιζερ, είτε πηγή LED. Συνήθως, είναι κατασκευασμένες από πλαστικό ή γυαλί και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή διάμετρο (125 μm για τηλεπικοινωνιακές ίνες).

Η δομή τους αποτελείται από 3 βασικά μέρη: τον πυρήνα (core), τον μανδύα (cladding) και το περίβλημα (coating) όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Ο πυρήνας είναι το τμήμα μέσω του οποίου διαδίδεται το φως και κατασκευάζεται από γυαλί. Ο μανδύας είναι και αυτός κατασκευασμένος από γυαλί και περιβάλλει τον πυρήνα. Επιπλέον, έχει δείκτη διάθλασης μικρότερο από αυτό του πυρήνα έτσι ώστε το φως να παραμένει εντός του πυρήνα μέσω του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Τέλος, το πλαστικό περίβλημα προστατεύει την ίνα από εξωτερικούς παράγοντες.



Εικόνα 6: α) Δομή οπτικής ίνας, β) Διάδοση φωτός εντός οπτικής ίνας ^[10]

Για τους τύπους οπτικών ινών μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες τις μονότροπες (Single-Mode) και τις πολύτροπες (Multi-Mode). Οι μονότροπες ίνες χαρακτηρίζονται από πυρήνα μικρής διαμέτρου (9 ή 10 μm) και υποστηρίζουν ένα μόνο τρόπο μετάδοσης του φωτός ουσιαστικά, την ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα. Αντίθετα, οι πολύτροπες έχουν πολύ μεγαλύτερο πυρήνα (50 ή 62.5 μm) και υποστηρίζουν εκατοντάδες τρόπους μετάδοσης του φωτός. Το κάθε κύμα εισέρχεται στην οπτική ίνα υπό ελαφρώς διαφορετική γωνία σε σχέση με τα άλλα και ακολουθεί τη δική του διαδρομή μέσω των διαδοχικών ανακλάσεων^[11]. Επιπρόσθετα, οι πολύτροπες ίνες μπορούν να κατανεμηθούν σε ίνες κλιμακωτού δείκτη διάθλασης (Εικόνα 7α) και σε ίνες βαθμιαίου δείκτη διάθλασης (Εικόνα 7β) ανάλογα με την κατανομή του δείκτη διάθλασης. Στη πρώτη περίπτωση, ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα είναι ίδιος σε όλη του την έκταση αλλά υπάρχει μια απότομη μείωση καθώς μεταβαίνουμε στον μανδύα. Στη δεύτερη κατηγορία, ο δείκτης διάθλασης έχει μεγαλύτερη τιμή στο κέντρο του πυρήνα και στη συνέχεια, μειώνεται σταδιακά προς τη διεπαφή πυρήνα-μανδύα.^[12]



Εικόνα 7: α) Πολύτροπη ίνα βαθμιαίου δείκτη διάθλασης, β) Πολύτροπη ίνα κλιμακωτού δείκτη διάθλασης, γ) Μονότροπη ίνα ^[13]

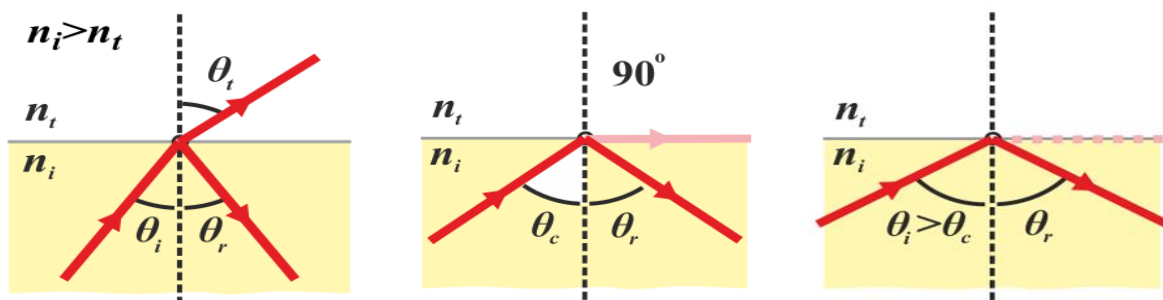
Η αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών βασίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Όταν μια ακτίνα φωτός διαδίδεται από ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n_i σε μέσο με δείκτη διάθλασης n_t με $n_i > n_t$ ένα ποσοστό του φωτός ανακλάται και το υπόλοιπο διαθλάται (Εικόνα 8α). Η γωνία διάθλασης για δεδομένη γωνία πρόσπτωσης θ_i δίνεται από τον νόμο του Snell:

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.1)$$

Όταν η διαθλώμενη ακτίνα διαδίδεται παράλληλα με την διεπιφάνεια των δύο μέσων (Εικόνα 8β) δηλαδή $\theta_t = 90^\circ$, τότε η γωνία πρόσπτωσης ονομάζεται κρίσιμη γωνία θ_c και από τον νόμο του Snell προκύπτει:

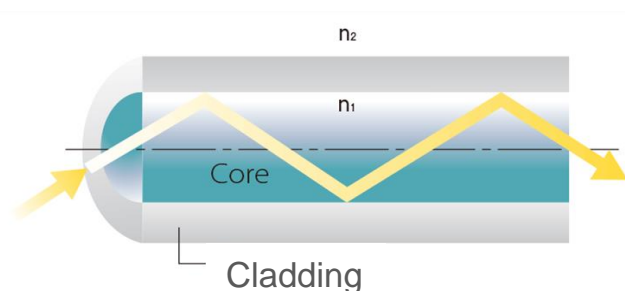
$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_t}{n_i} \right) \quad (2.2)$$

Για $\theta_i > \theta_c$ (Εικόνα 8γ) έχουμε το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης κατά το οποίο όλο το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ανακλάται και έτσι το φως παραμένει παγιδευμένο εντός του μέσου με τον μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.^[15]



Εικόνα 8: α) Διάδοση του φωτός από πυκνό προς αραιό μέσο, β) Κρίσιμη γωνία, γ) Ολική εσωτερική ανάκλαση^[14]

Όπως προαναφέραμε, ο πυρήνας έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από τον μανδύα οπότε, το φως υπόκεινται σε ολική εσωτερική ανάκλαση και παγιδεύεται εντός του πυρήνα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9: Ολική εσωτερική ανάκλαση μεταξύ πυρήνα και μανδύα^[15]

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το φως δεν μπορεί να εισέλθει στην ίνα από οποιαδήποτε γωνία. Η μέγιστη γωνία υπό την οποία μπορεί να εισέλθει η ακτινοβολία για να έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:^[16]

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n_0} \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2} \right) \quad (2.3)$$

Με βάση αυτή την εξίσωση ορίζουμε το αριθμητικό άνοιγμα NA (Numerical aperture) ως το ημίτονο της μέγιστης γωνίας πολλαπλασιασμένο με τον δείκτη διάθλασης του μέσου στο οποίο βρίσκεται η ίνα. ^[16]

$$NA = n_0 \sin \theta_{max} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2} \quad (2.4)$$

Επιπλέον, είναι χρήσιμο να αναφέρουμε άλλο ένα μέγεθος σχετικά με τις ίνες, την κανονικοποιημένη παράμετρο συχνότητας (V). ^[16]

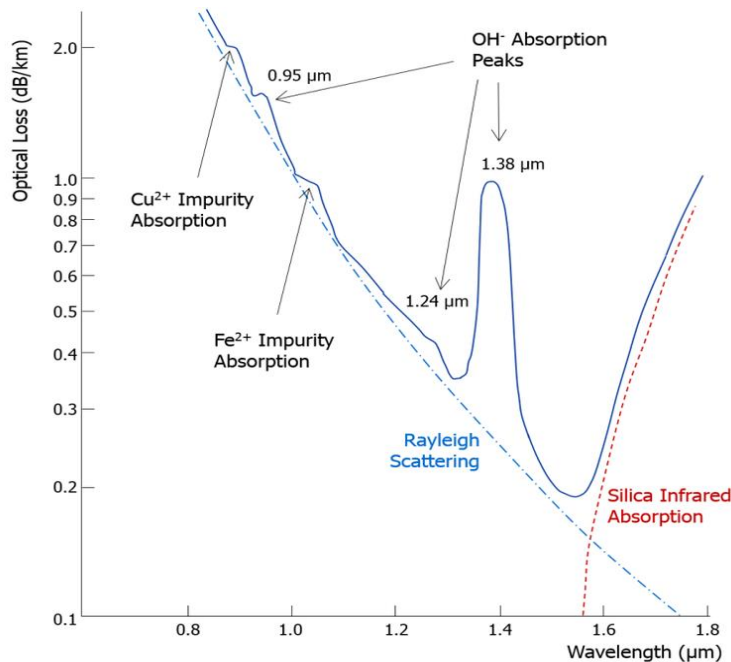
$$V = 2\pi NA \frac{r}{\lambda} \quad (2.5)$$

όπου, r είναι η ακτίνα του πυρήνα και λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Πολλές παράμετροι της ίνας εκφράζονται με βάση το V , όπως ο αριθμός των τρόπων μετάδοσης. Ο αριθμός τρόπων των που μπορούν να διαδοθούν μέσω μιας ίνας εξαρτάται από τη διάμετρο του πυρήνα, το αριθμητικό άνοιγμα και το μήκος κύματος του φωτός που μεταδίδεται. Αυτά μπορούν να συνδυαστούν στην κανονικοποιημένη παράμετρο συχνότητας. ^[16]

Η συνθήκη για μονότροπη ίνα είναι:

$$V \leq V_{cutoff} = 2,405$$

Η ένταση του φωτός που εισέρχεται στην ίνα δεν είναι ίση με εκείνη που εξέρχεται και αυτό οφείλεται στην εξασθένηση της δέσμης κατά μήκος της. Οι απώλειες οφείλονται κυρίως στη σκέδαση Rayleigh, σε απορροφήσεις καθώς και σε ατέλειες της ίνας.



Εικόνα 10: Απώλεια οπτικής ισχύος σαν συνάρτηση του μήκους κύματος της διαδιδόμενης ακτινοβολίας ^[17]

Η αιτία εμφάνισης της σκέδασης Rayleigh είναι οι ανομοιομορφίες του υλικού του πυρήνα με μεγέθη πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ($<0.1 \lambda$). Το μεγαλύτερο ποσοστό της εξασθένησης οφείλεται στη σκέδαση Rayleigh. Επιπλέον, κατά την κατασκευή των ινών εισάγονται προσμίξεις οι οποίες, απορροφούν την οπτική ακτινοβολία στην περιοχή των 0.6-1.6 μm. Για μήκη κύματος 0,95 μm και 1,38 μm σημαντική επίδραση στις απώλειες έχει η παρουσία ιόντων -OH. Απορρόφηση προκύπτει και από την παρουσία μικρής ποσότητας μεταλλικών ιόντων όπως, Fe²⁺, Cu²⁺, Cr³⁺. Ωστόσο, και το ίδιο το υλικό της ίνας απορροφά την ακτινοβολία τόσο στην περιοχή του υπεριώδους όσο και στην περιοχή του υπέρυθρου. Τέλος, κι άλλα φαινόμενα όπως γήρανση και μικροκάμψεις συμβάλουν στην εξασθένηση του σήματος. ^[18]

Η εξασθένιση μετριέται σε decibels (dB) ανά χιλιόμετρο και ο συντελεστής εξασθένισης δίνεται από τον τύπο:

$$\alpha = -\frac{10}{z(\text{km})} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2.6)$$

Όπου, P_{in} η ισχύς της εισερχόμενης ακτινοβολίας και P_{out} η ισχύς της εξερχόμενης και z το μήκος της ίνας .

2.2. Φράγματα περίθλασης Bragg οπτικών ινών

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της ίνας μπορεί να αλλάξει απορροφώντας υπεριώδη ακτινοβολία (φωτοευαισθησία). Αν η ακτινοβολία της ίνας είναι περιοδική, δημιουργείτε ένα φράγμα περίθλασης εντός του πυρήνα, μια μόνιμη φωτοεπαγόμενη περιοδική δομή του δείκτη διάθλασης. Η δομή αυτή, η οποία μπορεί να έχει διάφορες μορφές, επηρεάζει την πορεία του φωτός που διαδίδεται εντός της ίνας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μελετώνται τα φράγματα περίθλασης Bragg (Fiber Bragg Gratings - FBG) δηλαδή, φράγματα περίθλασης μικρής περιόδου καθώς, η περίοδος είναι της τάξης των nm.

2.2.1. Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των φραγμάτων περίθλασης Bragg βασίζεται στο αν ικανοποιείται η συνθήκη Bragg η οποία, καθορίζει το εύρος των μηκών κύματος που θα ανακλαστούν και κατά συνέπεια τι μήκη κύματος θα διασχίσουν ανεπηρέαστα την ίνα^[6]. Ένας από τους βασικότερους κανόνες της φυσικής είναι η διατήρηση της ενέργειας και της ορμής. Με βάση αυτό το κανόνα, η ενέργεια της εισερχόμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να ισούται με την ενέργεια της ανακλώμενης. Επιπλέον, από την διατήρηση της ορμής απορρέει ότι το κυματοδιάγραμμα της εισερχόμενης ακτινοβολίας και το κυματοδιάγραμμα του φράγματος θα πρέπει να ισούται με το κυματοδιάγραμμα της ακτινοβολίας που ανακλάται δηλαδή,

$$k_i + K = k_f \quad (2.7)$$

όπου, $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$ με Λ η περίοδος του φράγματος.

Επιπλέον,

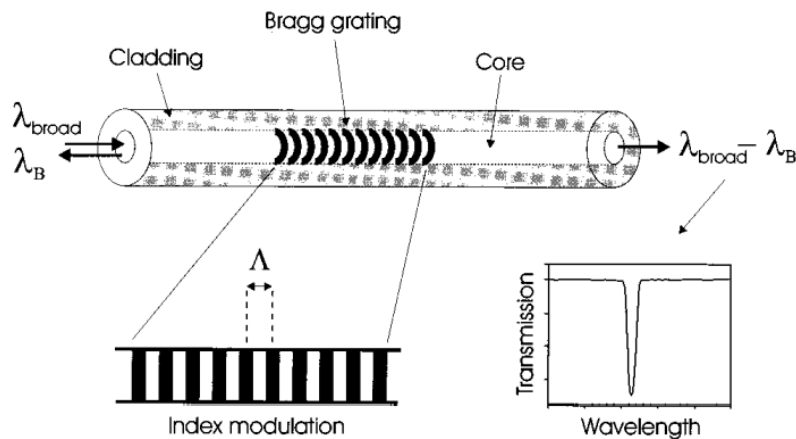
$$k_i = -k_f = -\frac{2\pi n}{\lambda_B} \quad (2.8)$$

Όπου, λ_B το ανακλώμενο μήκος κύματος.

Οπότε, από τις σχέσεις (2.7) και (2.8) προκύπτει :

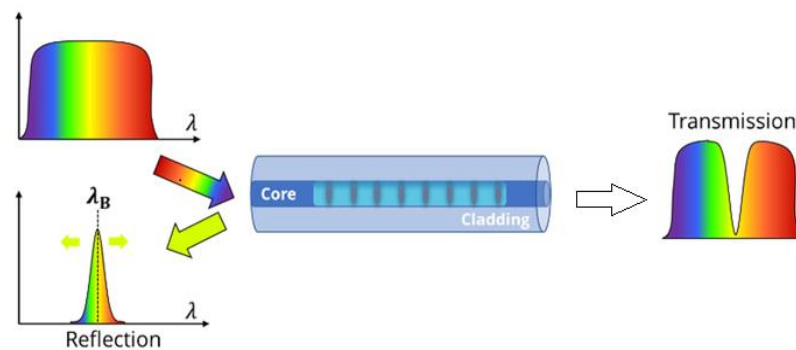
$$2 \left(\frac{2\pi n}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \Rightarrow \lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.9)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί την συνθήκη Bragg^[6]. Πιο αναλυτικά, όταν προσπίπτει ακτινοβολία στο φράγμα περίθλασης, ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, το λ_B από την συνθήκη Bragg, θα ανακλαστεί ενώ, τα υπόλοιπα μήκη κύματος που εμπεριέχονται στο φάσμα θα διαπεράσουν το φράγμα (Εικόνα 11). Κάθε περίοδος ανακλά ένα ποσοστό του φωτός που αντιστοιχεί στο δεδομένο μήκος κύματος Bragg με αποτέλεσμα το συνολικό ανακλώμενο σήμα να προκύπτει από την συμβολή των μερικών ανακλάσεων.



Εικόνα 11: Φράγμα περίθλασης Bragg και ανακλώμενο μήκος κύματος Bragg (λ_B)^[6]

Ουσιαστικά, το Bragg grating μπορεί να θεωρηθεί ως φίλτρο της εισερχόμενης ακτινοβολίας όπως γίνεται αντιληπτό και από την Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Εισερχόμενο, ανακλώμενο και διαδιδόμενο φάσμα από φράγμα περίθλασης Bragg^[19]

2.2.2. Θεωρία συζευγμένων κυμάτων

Από τη θεωρία συζευγμένων κυμάτων (coupled-mode theory) ^[20] μπορεί να υπολογιστεί η εξίσωση που δίνει την ανακλαστικότητα R του εγγεγραμμένου φράγματος περίθλασης (Bragg grating).

Η διαταραχή του ενεργού δείκτη διάθλασης n_{eff} λόγω του φράγματος περίθλασης για κάθε τρόπο μετάδοσης του φωτός (mode) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + u \cdot \cos \left\{ \left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right) \right\} \right\} \quad (2.10)$$

όπου, $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ είναι η “dc” μεταβολή του δείκτη διάθλασης κατά μήκος μιας περιόδου του φράγματος περίθλασης, u η διακριτική ικανότητα των κροσσών του δείκτη διάθλασης, Λ η περίοδος του φράγματος και το $\varphi(z)$ περιγράφει τυχόν μεταβολές κατά μήκος του φράγματος.

Για ιδανικό κυματοδηγό υποθέτουμε ότι η εγκάρσια συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να γραφτεί σαν μια υπέρθεση j ιδανικών τρόπων ταλάντωσης, δηλαδή:

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [A_j(z) \exp(i\beta_j z) + B_j(z) \exp(-i\beta_j z)] \cdot \vec{e}_{jt}(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (2.11)$$

όπου, $A_j(z)$ το πλάτος ταλάντωσης του j τρόπου στην διεύθυνση $+z$ και $B_j(z)$ στην διεύθυνση $-z$. Επιπλέον, $\vec{e}_{jt}(x, y)$ η εγκάρσια συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο xy .

Τα δύο πεδία που θεωρήσαμε αναφέρονται στο προσπίπτον και στο ανακλώμενο πεδίο άρα θα διαδίδονται στις διευθύνσεις $+z$ και $-z$ αντίστοιχα. Καθώς σε έναν ιδανικό κυματοδηγό οι τρόποι ταλάντωσης είναι ορθογώνιοι, υποθέτουμε ότι δεν ανταλλάσσεται ενέργεια μεταξύ τους. Παρ' όλα αυτά, η διαταραχή του δείκτη διάθλασης δημιουργεί μια σύζευξη μεταξύ των τρόπων ταλάντωσης, έτσι ώστε η χωρική εξέλιξη των πλατών A_j και B_j του j τρόπου μετάδοσης να περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{dA_j}{dz} = i \sum_k [A_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[i(\beta_k - \beta_j)z]] + i \sum_k [B_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k + \beta_j)z]] \quad (2.12)$$

$$\frac{dB_j}{dz} = -i \sum_k [A_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[i(\beta_k + \beta_j)z]] - i \sum_k [B_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k - \beta_j)z]] \quad (2.13)$$

Ο όρος K_{kj}^t ονομάζεται συντελεστής εγκάρσιας σύζευξης μεταξύ των οπτικών τρόπων j και k και ορίζεται ως:

$$K_{kj}^t = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} \Delta \varepsilon(x, y, z) \cdot \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}^*(x, y) dx dy \quad (2.14)$$

όπου, $\Delta \varepsilon$ η διαταραχή της επιδεκτικότητας. Για $\delta n \ll n$ ισχύει: $\Delta \varepsilon = 2n \cdot \delta n$.

Επιπλέον, ο K_{kj}^z είναι ο συντελεστής διαμήκους σύζευξης και μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος καθώς $K_{kj}^z \ll K_{kj}^t$.

Υπολογίζοντας το ολοκλήρωμα στην εξίσωση (2.14) καταλήγουμε στη σχέση:

$$K_{kj}^t = \sigma_{kj}(z) + 2\kappa_{kj}(z) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z)\right) \quad (2.15)$$

έχοντας ορίσει κάποιους όρους με τους ακόλουθους συντελεστές

$$\sigma_{kj}(z) = \frac{\omega n_{co}}{4} \overline{\delta n_{co}}(z) \iint_{core} \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}^*(x, y) dx dy \quad (2.16)$$

και

$$\kappa_{kj}(z) = \frac{u}{2} \sigma_{kj}(z) \quad (2.17)$$

Ο $\sigma_{kj}(z)$ είναι ο “dc” συντελεστής σύζευξης και $\kappa_{kj}(z)$ ο “ac” συντελεστής σύζευξης. Ο όρος $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ μπορεί να αντικατασταθεί από τον όρο $\overline{\delta n_{co}}(z)$. Αυτό συμβαίνει διότι η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης προκαλείται στο πυρήνα και είναι αμελητέα έξω από αυτόν.

Γράφοντας τα πλάτη των δύο ταλαντώσεων $A(z)$ και $B(z)$ που θεωρήσαμε προηγουμένως ως:

$$R(z) = A(z)e^{(i\delta z - \frac{\varphi}{2})} \quad (2.18)$$

και

$$S(z) = B(z)e^{(-i\delta z + \frac{\varphi}{2})} \quad (2.19)$$

μπορούμε να γράψουμε τις σχέσεις (2.12), (2.13) απλοποιημένα, έχοντας αγνοήσει τους όρους που συνεισφέρουν ελάχιστα στην αύξηση ή μείωση των πλατών ταλάντωσης, ως εξής:

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \quad (2.20)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^* R(z) \quad (2.21)$$

Με $\hat{\sigma}$ συμβολίζεται ο γενικός “dc” συντελεστής σύζευξης και δίνεται από την σχέση:

$$\hat{\sigma} = \sigma + \delta - \frac{1}{2} \frac{d\Phi}{dz} \quad (2.22)$$

όπου, δ ένας παράγοντας απορρύθμισης (detuning factor) ο οποίος είναι σταθερός κατά μήκος του άξονα z και ισούται με :

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\lambda} = \beta - \beta_B = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (2.23)$$

Επιπρόσθετα, για μονότροπες ίνες προκύπτει και απλοποίηση των σχέσεων (2.16) και (2.17) οι οποίες μπορούν να γραφούν ως:

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}} \quad (2.24)$$

και

$$\kappa = \kappa^* = \frac{\pi}{\lambda} u \overline{\delta n_{eff}} \quad (2.25)$$

Για τα ομοιόμορφα φράγματα περίθλασης, το $\overline{\delta n_{eff}}$ είναι σταθερό οπότε και τα $\hat{\sigma}$, κ , σ είναι επίσης σταθερά. Επομένως, οι εξισώσεις (2.20), (2.21) ανάγονται σε ζεύγος συζευγμένων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης με σταθερούς συντελεστές.

Έστω ότι το φράγμα περίθλασης βρίσκεται στη περιοχή z , όπου:

$$-\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2}$$

Τότε, οι κατάλληλες οριακές συνθήκες που μπορούμε να θέσουμε είναι:

$$R\left(-\frac{L}{2}\right) = 1 \quad \text{και} \quad S\left(\frac{L}{2}\right) = 0$$

Ο συντελεστής ανάκλασης του φράγματος που προκύπτει λύνοντας το παραπάνω πρόβλημα διαφορικών εξισώσεων ισούται με :

$$\rho = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)} \quad (2.26)$$

και άρα η ανακλαστικότητα υπολογίζεται ως:

$$R = |\rho|^2 = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\hat{\sigma}^2 \sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L) + (\kappa^2 - \hat{\sigma}^2) \cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)} \quad (2.27)$$

Θέτοντας $\hat{\sigma} = 0$ στη σχέση (2.27) προκύπτει η μέγιστη ανακλαστικότητα η οποία είναι ίση με

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (2.28)$$

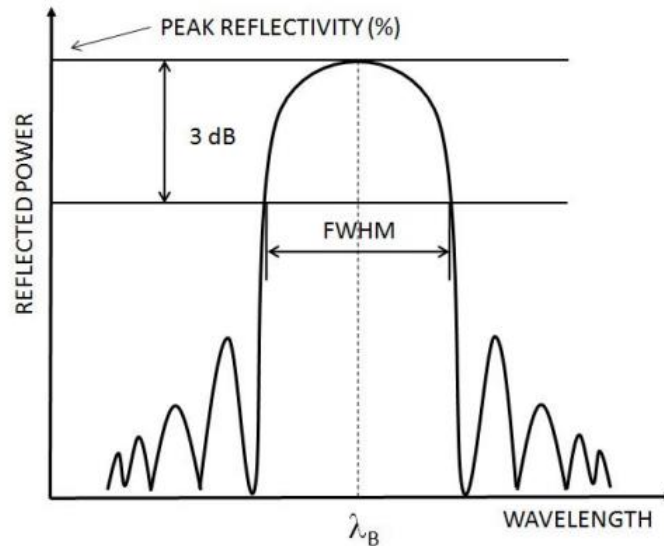
Το φασματικό εύρος του φράγματος περίθλασης $\Delta\lambda$ μπορεί να οριστεί με δύο τρόπους. Είτε, ως το πλήρες εύρος στο μισό του μεγίστου δηλαδή, εκεί που η ένταση έχει μειωθεί στο 50% (Full Width at Half Maximum - FWHM) είτε, ως το εύρος των δύο πρώτων μηδενισμών της ανακλαστικότητας εκατέρωθεν του μεγίστου της (Full Width at Zero – FWZ). Οπότε, προκύπτουν οι δύο ακόλουθοι τύποι για τις αντίστοιχες περιπτώσεις.^[20]

$$\Delta\lambda = u\lambda_B \sqrt{\left(\frac{\delta\bar{n}_{eff}}{2n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_B}{L}\right)^2} \quad (2.29)$$

και

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{u\delta\bar{n}_{eff}}{n_{eff}} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_B}{u\delta\bar{n}_{eff}L}\right)^2} \quad (2.30)$$

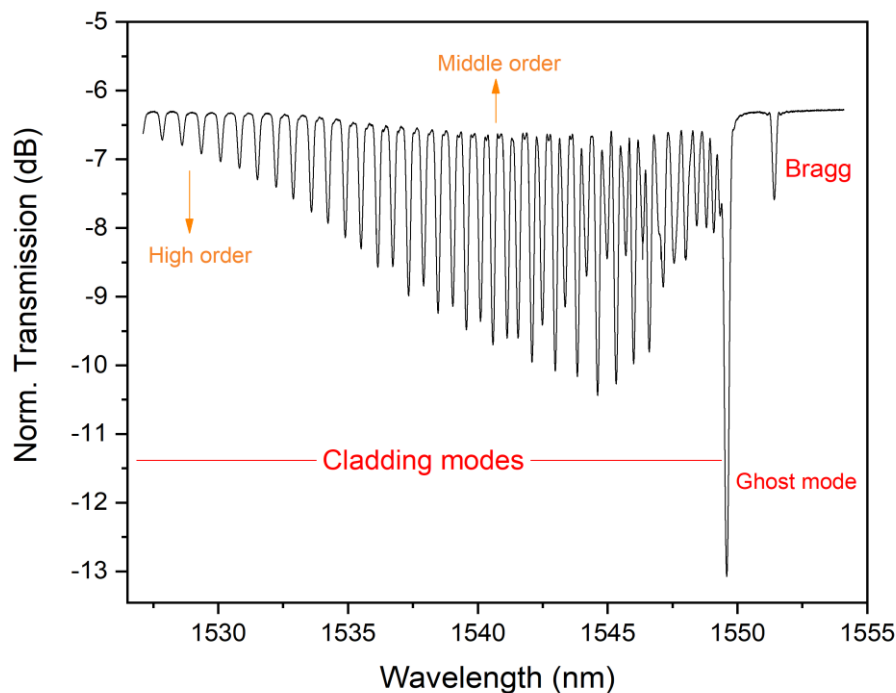
Στη παρακάτω εικόνα εικονίζεται το γράφημα της ανακλαστικότητας ενός φράγματος περίθλασης



Εικόνα 13: Γράφημα της ανακλαστικότητας ενός φράγματος περίθλασης ^[21]

2.2.3. Υπό γωνία φράγματα περίθλασης Bragg

Όπως αναφέρθηκε στον Κεφάλαιο 1, στα υπό γωνία φράγματα περίθλασης Bragg (Tilted Fiber Bragg Gratings - TFBG), τα ανακλαστικά επίπεδα σχηματίζουν γωνία με τον άξονα της ίνας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εισερχόμενο φως να συζευγνύεται με τρόπους μετάδοσης που οδηγούνται στο περίβλημα (cladding modes) ή ακόμα και εκτός της ίνας με την μορφή ακτινοβολίας. Το φάσμα διέλευσης του TFBG εμφανίζει κάποιες χαρακτηριστικές κορυφές συντονισμού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Στο φάσμα εμφανίζεται ένας "κλώνος" (Ghost mode) του συντονισμού Bragg ο οποίος προκύπτει από τη σύζευξη του τρόπου ταλάντωσης του πυρήνα με τους τρόπους ταλάντωσης του περιβλήματος κοντά στην διεπιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος. Όσο μεταβαίνουμε προς μικρότερα μήκη κύματος παρατηρείται αυξημένος αριθμός κορυφών συντονισμού που αντιστοιχούν σε σύζευξη φωτός σε διαφορετικούς τρόπους ταλάντωσης του περιβλήματος. [22]



Εικόνα 14: Κανονικοποιημένο φάσμα διέλευσης ενός υπό γωνία φράγματος περίθλασης Bragg

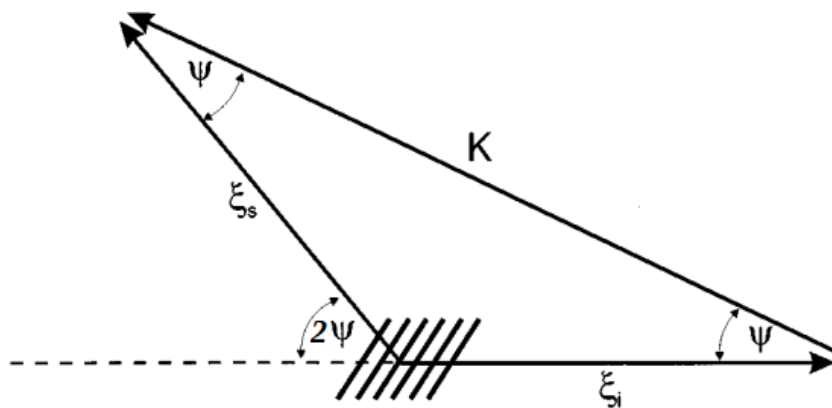
Όπως αναφέρθηκε και στη θεωρία για τα φράγματα περίθλασης Bragg βασικές προϋποθέσεις είναι η διατήρηση της ενέργειας και της ορμής. Βασιζόμενοι στο σχήμα της Εικόνας 15 που εκφράζει την αρχή διατήρησης της ορμής εφαρμόζουμε τον νόμο των συνημιτόνων για τα κυματοδιανύσματα της προσπίπτουσας και σκεδαζόμενης ακτινοβολίας καθώς επίσης και για το κυματοδιάνυσμα που ορίζεται από τα επίπεδα του φράγματος^[6]. Για τα κυματοδιανύσματα ισχύει

$$\vec{\xi}_s = \vec{K} + \vec{\xi}_i \quad (2.31)$$

όπου, $\vec{\xi}_i$ το κυματόνυσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, $\vec{\xi}_s$ το κυματόνυσμα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας και \vec{K} το κυματόνυσμα που ορίζουν τα επίπεδα του φράγματος που σχηματίζουν γωνία ψ με τον άξονα διάδοσης της ίνας.

Άρα, ο νόμος των συνημιτόνων γράφεται ως:

$$|\vec{\xi}_i|^2 + |\vec{\xi}_s|^2 - 2|\vec{\xi}_i||\vec{\xi}_s| \cos(\pi - 2\psi) = |\vec{K}|^2 \quad (2.32)$$



Εικόνα 15: Διανυσματικό διάγραμμα για την συνθήκη Bragg ενός υπό γωνία φράγματος περίθλασης^[6]

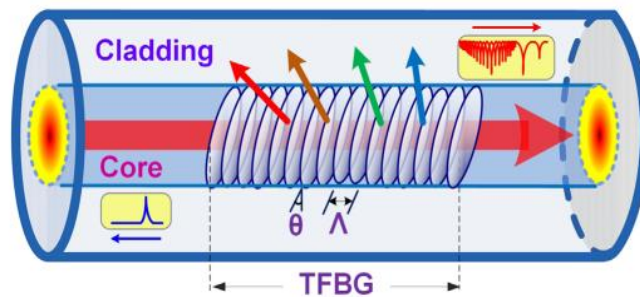
Το μέγεθος των κυματοδιανυσμάτων της προσπίπτουσας και της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι ίσα οπότε θέτουμε: $\xi_i = \xi_s = \xi$ και η εξίσωση (2.32) γίνεται

$$2\xi^2(1 + \cos(2\psi)) = K^2 \Rightarrow 2\xi^2(1 + 2\cos^2\psi - 1) = K^2 \quad (2.33)$$

Από την οποία προκύπτει ότι

$$\cos(\psi) = \frac{K}{2\xi} \quad (2.34)$$

Η εξίσωση (2.34) δείχνει ότι διαφορετικά μήκη κύματος σκεδάζονται σε διαφορετικές γωνίες και διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης του ίδιου μήκους κύματος προκύπτουν σε ελαφρώς διαφορετικές γωνίες λόγω των διαφορετικών σταθερών διάδοσης τους.^[6]



Εικόνα 16: Σχηματική απεικόνιση του υπό γωνία φράγματος περίθλασης Bragg και της διαμόρφωσης του φωτός ^[23]

Η εξίσωση για την διατήρηση της ορμής μπορεί να ξαναγραφεί στη παρακάτω μορφή

$$\lambda_{\text{clad}}^m = \frac{n_{\text{eff,core}} + n_{i,\text{eff,clad}}^m}{\cos \theta} \Lambda \quad (2.35)$$

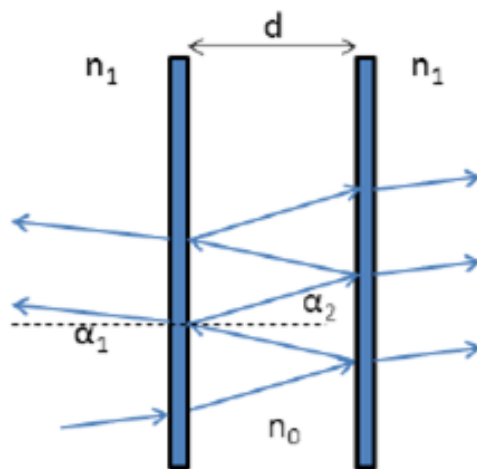
Όπου Λ είναι η περίοδος του φράγματος και θ η γωνία που σχηματίζει με τον οριζόντιο άξονα της ίνας. Το λ_{clad}^m αναφέρεται στο μήκος κύματος συντονισμού μεταξύ του πυρήνα και του m -τρόπου ταλάντωσης του περιβλήματος. Το $n_{\text{eff,core}}$ είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης του τρόπου ταλάντωσης του πυρήνα στο μήκος κύματος συντονισμού, $n_{i,\text{eff,clad}}^m$ ο ενεργός δείκτης διάθλασης του m -τρόπου ταλάντωσης του περιβλήματος.^[22]

Για τους τρόπους ταλάντωσης περιβλήματος υψηλής τάξης, μέρος του πεδίου εκτείνεται και έξω από τα όρια του περιβλήματος. Όταν τα οπτικά χαρακτηριστικά του υλικού που περιβάλλει την ίνα μεταβληθούν αυτό

μεταφράζεται και σε αλλαγή στο μήκος κύματος και στην ένταση των κορυφών συντονισμού των αντίστοιχων τρόπων ταλάντωσης. Βάσει αυτής της αρχής λειτουργεί έχουν μελετηθεί πολλά αισθητήρια οπτικών ινών επικαλύπτοντας εξωτερικά την ίνα με υλικά που εμφανίζουν ευαισθησία σε συγκεκριμένες παραμέτρους (υγρασίας, συγκεκριμένα αέρια κλπ.).

2.3. Συμβολόμετρα Fabry-Pérot

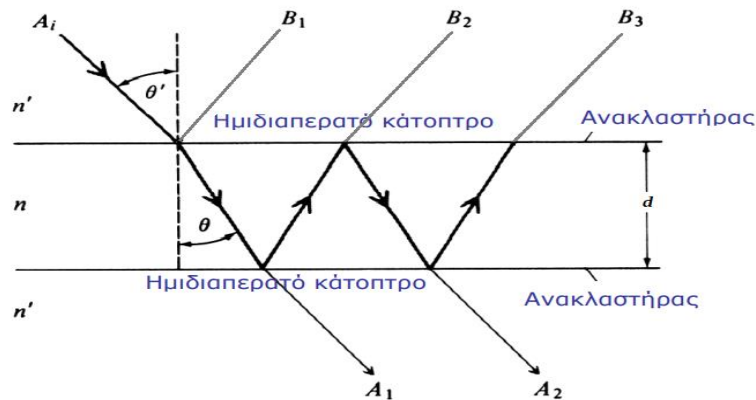
Τα συμβολόμετρα Fabry-Pérot είναι οπτικές κοιλότητες που αποτελούνται από δύο παράλληλες, ευθυγραμμισμένες και ημιδιαπερατές επιφάνειες οι οποίες μπορεί να είναι π.χ. κάτοπτρα, φιλμ ή κάποιο διαφανές υλικό. Με τη χρήση του συμβολομέτρου F-P επιτυγχάνετε παραγωγή μεγάλου αριθμού σύμφωνων φωτεινών δεσμών, σαν αποτέλεσμα της συμβολής των κυμάτων μέσα στη κοιλότητα^[24]. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζετε μια σχηματική αναπαράσταση της διάταξης.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση συμβολόμετρου Fabry-Pérot ^[25]

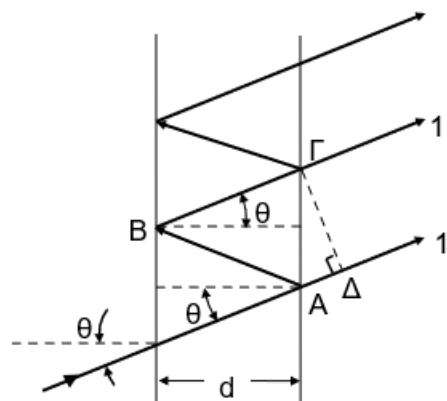
2.3.1. Αρχή λειτουργίας συμβολόμετρων Fabry-Pérot

Φως προσπίπτει στη μια ημιδιαπερατή επιφάνεια, ένα μέρος της διαθλάται και το υπόλοιπο ανακλάται. Το διαδιδόμενο κύμα στη συνέχεια ανακλάται εκ νέου διαδοχικά από τις δύο επιφάνειες όπως φαίνεται στην Εικόνα 18. Έτσι, το φως εντός της κοιλότητας συμβάλλει είτε ενισχυτική είτε καταστρεπτικά.



Εικόνα 18: Πολλαπλή ανάκλαση μεταξύ δύο ημιδιαπερατών κατόπτρων [24]

Οι ακτίνες που εξέρχονται παρουσιάζουν διαφορά φάσης μεταξύ τους λόγω των διαφορετικών οπτικών δρόμων που διανύουν κατά τις διαδοχικές ανακλάσεις.



Εικόνα 19: Διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ δύο ακτίνων [25]

Θεωρώντας δυο εξερχόμενες διαδοχικές ακτίνες η διαφορά των οπτικών δρόμων είναι:

$$\Delta r = (AB) + (B\Gamma) - (A\Delta) \quad (2.36)$$

Επιπλέον, από την τριγωνομετρία προκύπτει ότι:

$$\Delta r = 2d \cos \theta \quad (2.37)$$

Για να συμβάλλουν ενισχυτικά δυο δέσμες θα πρέπει η διαφορά των οπτικών τους δρόμων να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ δηλαδή,

$$\Delta r = m\lambda, \text{ όπου } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.38)$$

Επομένως, η συνθήκη ενισχυτικής συμβολής είναι:

$$2d \cos \theta = m\lambda \quad (2.39)$$

Η διαφορά φάσης δύο διαδοχικών ακτίνων για μια ολόκληρη διαδρομή μέσα στη κοιλότητα δίνεται από τον τύπο^[24]:

$$\delta = \frac{4\pi n \cos \theta}{\lambda} d \quad (2.40)$$

όπου, θ και λ η γωνία διάθλασης και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αντίστοιχα, n ο δείκτης διάθλασης του μέσου της κοιλότητας και d η απόσταση των ημιδιαπερατών επιφανειών.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση η συνθήκη για ενισχυτική συμβολή μπορεί να γραφεί και ως:

$$\frac{4\pi n \cos \theta}{\lambda} d = 2m\pi \quad (2.41)$$

Αν A_i το μιγαδικό πλάτος του προσπίπτοντος κύματος τότε, οι μερικές ανακλάσεις B_1, B_2, B_3 κτλ δίνονται από τις σχέσεις^[24]:

$$B_1 = rA_i$$

$$B_2 = t t' r' A_i e^{i\delta}$$

$$B_3 = t r' r'^3 A_i e^{2i\delta} \text{ κτλ} \quad (2.42)$$

όπου r, t συντελεστής ανάκλασης και διάδοσης αντίστοιχα, για τα κύματα που διαδίδονται από το υλικό με δείκτη διάθλασης n' στο υλικό με δείκτη διάθλασης n . Επιπλέον, r' και t' τα αντίστοιχα μεγέθη για κύματα από το υλικό με n προς υλικό με n' . Έτσι, το μιγαδικό πλάτος του ολικού ανακλώμενου κύματος είναι:

$$A_r = B_1 + B_2 + \dots = \{r + t t' r' e^{i\delta} (1 + r'^2 e^{i\delta} + r'^4 e^{2i\delta} + \dots)\} A_i \quad (2.43)$$

Αντίστοιχα για το διαδιδόμενο κύμα έχουμε τις εξισώσεις:

$$A_1 = tt' A_i$$

$$A_2 = tt' r'^2 e^{i\delta} A_i$$

$$A_3 = tt' r'^4 e^{2i\delta} A_i \quad \text{κτλ} \quad (2.44)$$

Οπότε, το μιγαδικό πλάτος του ολικού κύματος που εξέρχεται:

$$A_t = tt' (1 + r'^2 e^{i\delta} + r'^4 e^{2i\delta}) A_i \quad (2.45)$$

Οι όροι στις παρενθέσεις των εξισώσεων (2.43) και (2.45) αποτελούν όρους γεωμετρικής σειράς και έτσι προκύπτει :

$$A_r = \frac{(1 - e^{i\delta})\sqrt{R}}{1 - R e^{i\delta}} A_i \quad (2.46)$$

και

$$A_t = \frac{T}{1 - R e^{i\delta}} A_i \quad (2.47)$$

όπου, $R = r^2 = r'^2$ και $T = tt'$ η ανακλαστικότητα και η διαπερατότητα αντίστοιχα. Επιπλέον, λήφθηκε υπόψιν η σχέση: $r^2 + tt' = 1$, που εκφράζει την αρχή διατηρήσεως της ενέργειας για κάτοπτρα χωρίς απώλειες.

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση του ανακλώμενου και του διαδιδόμενου κύματος η οποία δίνεται από τους τύπους:

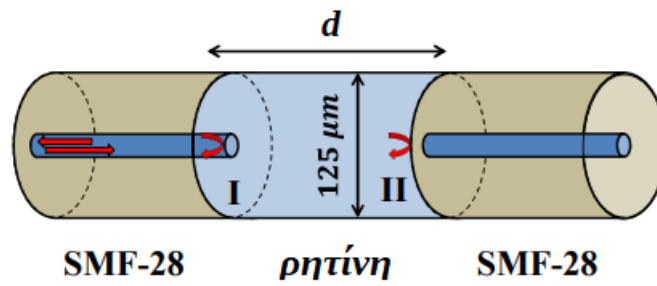
$$I_r = A_r A_r^* \quad (2.48)$$

και

$$I_t = A_t A_t^* \quad (2.49)$$

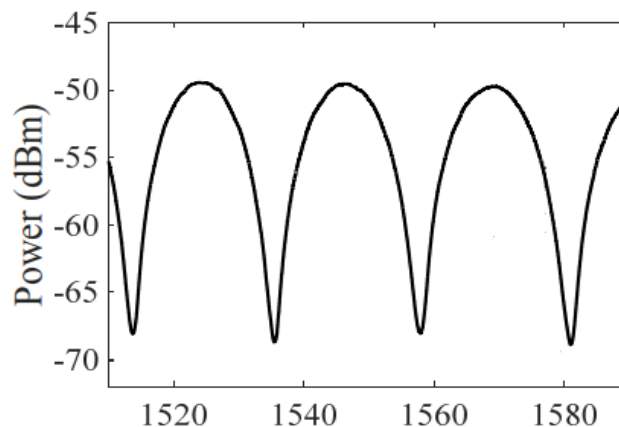
2.3.2. Συμβολόμετρα Fabry-Pérot και οπτικές ίνες

Ένα συμβολόμετρο F-P μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα με την χρήση οπτικών ινών. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους και να κατασκευαστούν διάφοροι τύποι συμβολόμετρων. Συγκεκριμένα, μπορεί να δημιουργηθεί κοιλότητα μεταξύ δύο ινών ή στην άκρη μιας ίνας τοποθετώντας μικρή ποσότητα κατάλληλου υλικού όπως, στη προκείμενη πειραματική εργασία όπου κατασκευάστηκε αισθητήρας F-P αποτελούμενος από μια ίνα και φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη. Στην εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά μια περίπτωση συμβολόμετρου F-P όπου, η ρητίνη αποτελεί την κοιλότητα και οι δύο οπτικές ίνες τις ημιδιαπερατές επιφάνειες.



Εικόνα 20: Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρα F-P αποτελούμενο από δύο οπτικές ίνες ^[26]

Η δέσμη φωτός που ταξιδεύει μέσα στο πυρήνα της πρώτης ίνας ανακλάται από την επιφάνεια I ενώ μέρος της που την διαπερνά, ανακλάται από την επιφάνεια II. Στη συνέχεια, οι δύο δέσμες συμβάλουν ενισχυτικά εντός του πυρήνα και έτσι προκύπτει ένα φάσμα συμβολής της παρακάτω μορφής.



Εικόνα 21: Φάσμα συμβολής ^[26]

Η διαφορά φάσης των δύο ακτίνων προκύπτει από την διαφορά του οπτικού δρόμου που ισούται με $2nd$ και δίνεται από τον τύπο (2.40) θεωρώντας $\cos\theta=0$ για κάθετη πρόσπτωση και n ο δείκτης διάθλασης της ρητίνης.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (2nd) \quad (2.50)$$

Η ένταση του ανακλώμενου σήματος δίνεται από τον ακόλουθο τύπο^[26]:

$$I(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta) \quad (2.51)$$

όπου, I_1 και I_2 οι εντάσεις των δύο ανακλώμενων ακτίνων αντίστοιχα.

Επιπλέον, από την συνθήκη ενισχυτικής συμβολής (2.41) για την διαφορά φάσης προκύπτει ότι το μήκος κύματος μιας κορυφής ισούται με:

$$\lambda_m = \frac{2nd}{m} \quad (2.52)$$

Το ελεύθερο φασματικό εύρος, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο κορυφών εκφράζεται με την παρακάτω σχέση. Το γεγονός ότι FSR είναι συνάρτηση του μήκους κύματος, του δείκτη διάθλασης και του μήκους της κοιλότητας το καθιστά μια πολύ σημαντική παράμετρο.^[26]

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nd} \quad (2.53)$$

Τέλος, ορίζεται η διακριτότητα των κροσσών μέσω της σχέσης:

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.54)$$

όπου, I_{max} και I_{min} οι εντάσεις που υπολογίζονται από την σχέση (2.51)

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, η ανίχνευση των εξωτερικών παραγόντων χρησιμοποιώντας αισθητήρες με κοιλότητες F-P βασίζονται στη μετατόπιση του φάσματος. Αυτό συμβαίνει λόγω μεταβολών του δείκτη διάθλασης και του μήκους της κοιλότητας. Άρα, η μετατόπιση του μήκους κύματος μπορεί να εκφραστεί μέσω των παραπάνω μεταβολών ως:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \right) \lambda_m \quad (2.55)$$

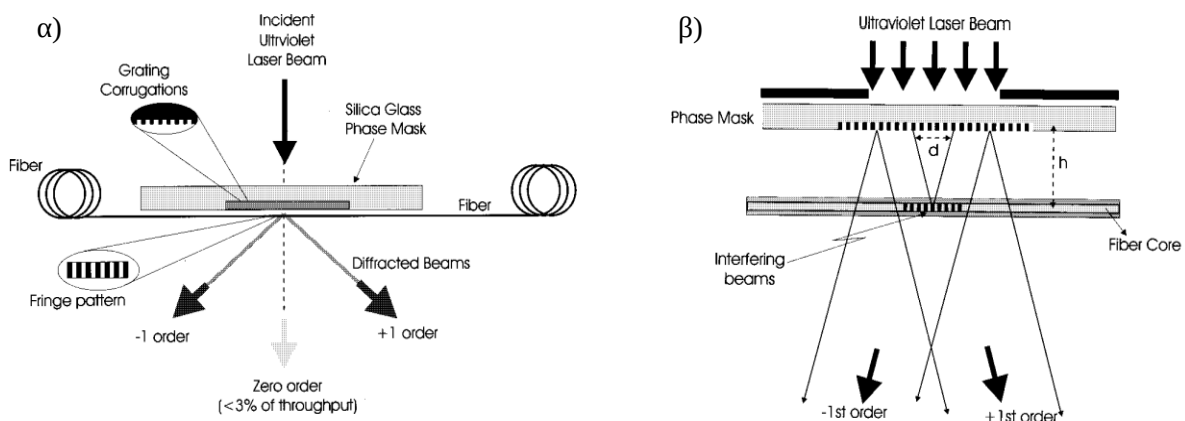
Κεφάλαιο 3^ο

Κατασκευή αισθητήρων

3.1. Κατασκευή αισθητήρων με φράγμα περίθλασης

Για την κατασκευή των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν ίνες GFB1-Nufern καθώς, παρουσιάζουν υψηλή φωτοευαισθησία λόγω προσμίξεων Ge όπως επίσης και μειωμένες απώλειες. Η εγγραφή των φραγμάτων περίθλασης σύμφωνα με την θεωρία του Κεφαλαίου 2 πραγματοποιείται με την έκθεση της ίνας σε υπεριώδη ακτινοβολία λέιζερ.

Κατά κύριο λόγο, υπάρχουν 3 βασικές τεχνικές εγγραφής φραγμάτων περίθλασης στο πυρήνα της ίνας. Στη προκείμενη εργασία, χρησιμοποιήθηκε η εγγραφή μέσω μάσκας φάσης. Η συγκεκριμένη είναι μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος όπου χρησιμοποιείτε ένα περιθλαστικό στοιχείο, η μάσκα φάσης, για να διαμορφώσει χωρικά την δέσμη της UV ακτινοβολίας. Η μάσκα είναι κατασκευασμένη από τηγμένο πυρίτιο (fused silica) και διαθέτει μια περιοδική δομή όπως φαίνεται και στην Εικόνα 22α.

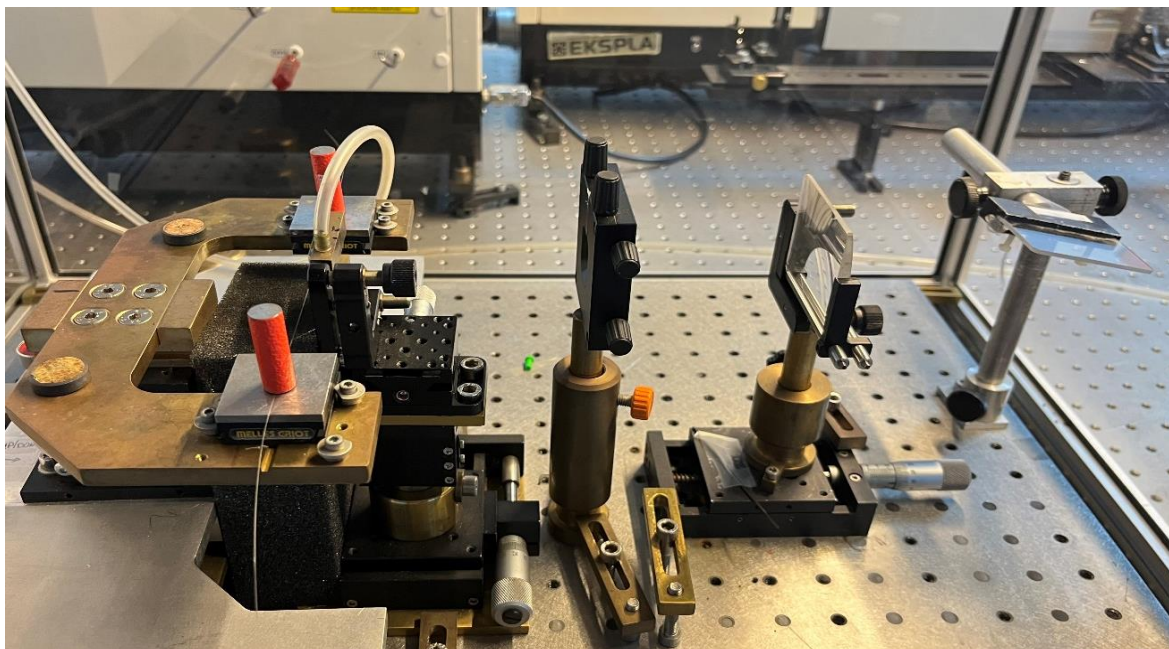


Εικόνα 22: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής μάσκας φάσης για εγγραφή φραγμάτων περίθλασης Bragg στο πυρήνα της ίνας ^[6]

Κατά την ακτινοβολήση, η δέσμη προσπίπτει πρώτα στη μάσκα όπου και υπόκειται σε περίθλαση. Η δομή της μάσκας είναι τέτοια ώστε η μηδενική τάξη

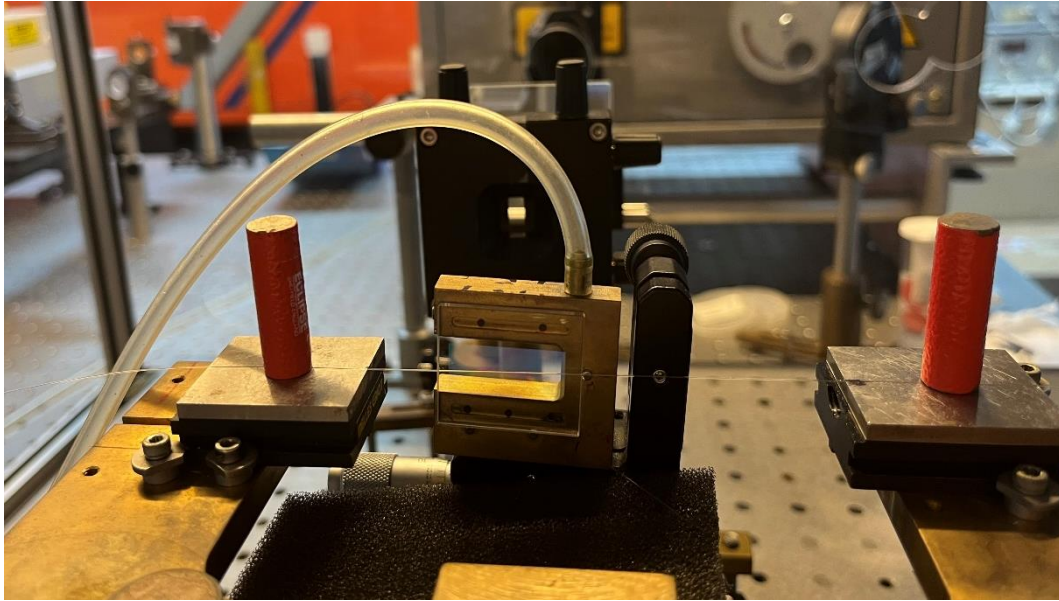
περίθλασης να διαθέτει το μικρότερο ποσοστό φωτός ($< 5\%$) ενώ, στις τάξεις ± 1 συγκεντρώνεται περισσότερο από το 35%. Η περιοδική δομή του δείκτη διάθλασης στο πυρήνα της ίνας είναι αποτέλεσμα της συμβολής των ± 1 τάξεων περίθλασης, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 22β σε μεγέθυνση. Επιπλέον, η περίοδος των φραγμάτων περίθλασης Bragg είναι η μισή από αυτής της μάσκας.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 23. Για την εγγραφή χρησιμοποιήθηκε ένα παλμικό excimer laser ArF με μήκος κύματος στα 193 nm, διάρκεια παλμού 10 ps και συχνότητα 40 Hz. Η περίοδος της μάσκας είναι 1070 nm οπότε, η περίοδος του φράγματος της ίνας 535 nm και το μήκος του 5 mm.



Εικόνα 23: Πειραματική διάταξη εγγραφής φραγμάτων περίθλασης Bragg

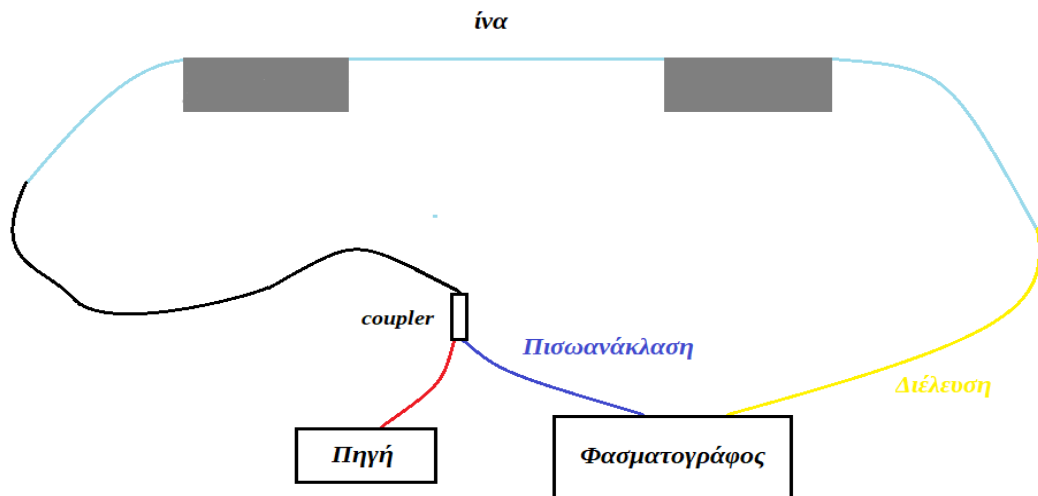
Αρχικά, η ίνα τοποθετείται σε κατάλληλη βάση, κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της δέσμης όπως φαίνεται στην Εικόνα 24. Ακριβώς πριν από την ίνα και σε ελάχιστη απόσταση από αυτή τοποθετείτε η μάσκα στραμμένη σε γωνία 3.5° . Σκοπός είναι η εγγραφή φράγματος περίθλασης υπό γωνία, αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς, όπου και χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, είναι να στραφεί η μάσκα κατά μικρή γωνία.



Εικόνα 24: Σχετικές θέσεις ίνας και μάσκας φάσης στη πειραματική διάταξη

Η δέσμη εξερχόμενη από το λέιζερ, με την χρήση δύο κατόπτρων κατευθύνεται προς ένα κυλινδρικό φακό όπου και εστιάζεται. Έπειτα, η εστιασμένη δέσμη διέρχεται από ένα διάφραγμα το οποίο καθορίζει το πλάτος της και κατ' επέκταση το πλάτος του φράγματος. Τέλος, η δέσμη προσπίπτει στη μάσκα. Κάθε μάσκα μπορεί να αντέξει μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή έντασης ακτινοβολίας χωρίς να καταστραφεί οπότε, πριν την έκθεση της, με ένα εργόμετρο πρέπει να μετρηθεί η ενέργεια της δέσμης ώστε να βρίσκεται στα κατάλληλα όρια.

Για την μελέτη του φάσματος κατά την διάρκεια της εγγραφής πραγματοποιούνται οι συνδέσεις που φαίνονται σχηματικά στην Εικόνα 25. Τα δύο άκρα της ίνας συνδέονται με πηγή μεγάλου φασματικού εύρους (Super Luminescent Diode-SLD) και με έναν οπτικό αναλυτή φάσματος (Optical Spectrum Analyzer-OSA).



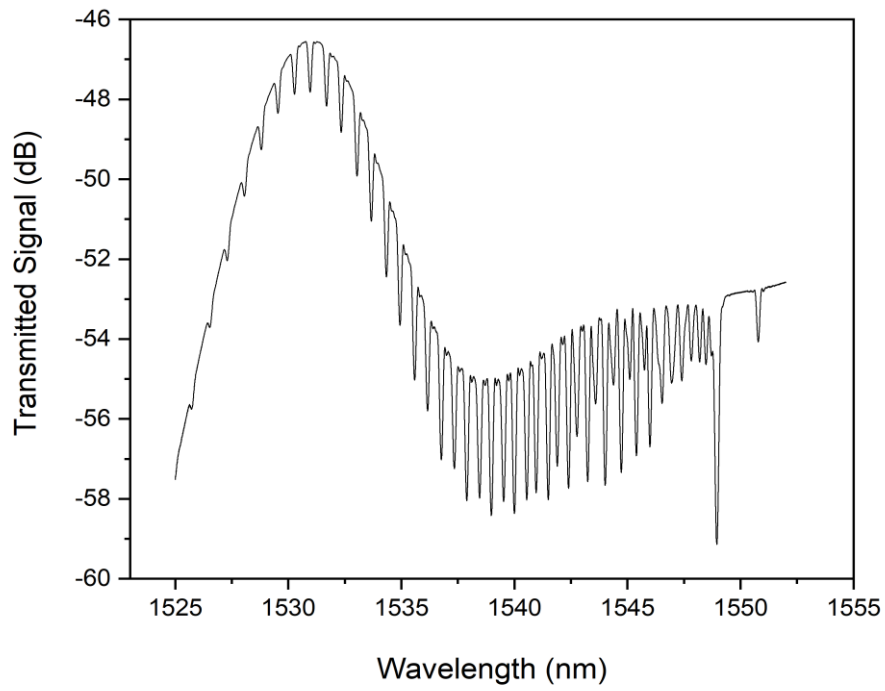
Εικόνα 25: Σχηματική αναπαράσταση της σύνδεσης της ίνας με τον φασματογράφο και την πηγή

Ο μέσος χρόνος εγγραφής για κάθε φράγμα περίθλασης του εγγράφηκε ήταν 6 λεπτά και η πυκνότητα ενέργειας 160-190 mJ/cm². Η πυκνότητα ενέργειας δίνεται από τον τύπο:

$$f = \frac{2E}{A}$$

Όπου E, η ένταση της δέσμης που έχει μετρηθεί με εργόμετρο και A η επιφάνεια της δέσμης. Ο παράγοντας 2 αναφέρεται στις δύο τάξεις περίθλασης που συμβάλλουν.

Κατά την διάρκεια της εγγραφής μελετάται το φάσμα διέλευσης του φωτός που εξέρχεται από την ίνα. Ένα τέτοιο φάσμα παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.

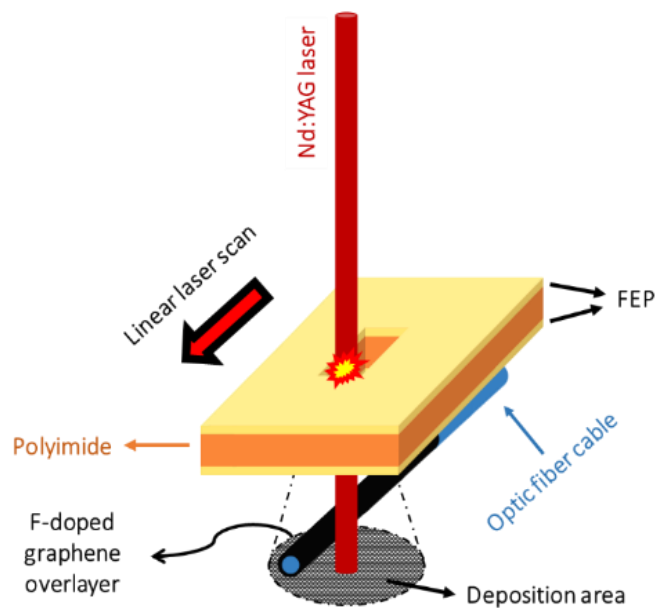


Διάγραμμα 1: Φάσμα διέλευσης ενός υπό γωνία φράγματος περίθλασης εγγεγραμμένο στο πυρήνα μονότροπης ίνας.

3.1.1. Εναπόθεση γραφενίου στην εξωτερική επιφάνεια οπτικής ίνας

Οι αισθητήρες ανίχνευσης αέριων αμμωνίας επικαλύφθηκαν με νιφάδες γραφενίου στο σημείο του φράγματος περίθλασης με την μέθοδο LEST (Laser-mediated Explosive Synthesis and Transfer) ^[27]. Η διαδικασία της επίστρωσης πραγματοποιήθηκε στο ινστιτούτο Επιστημών Χημικής Μηχανικής του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας στη Πάτρα (ΙΤΕ/ΙΕΧΜΗ). Συγκεκριμένα, κάποιοι αισθητήρες επικαλύφθηκαν με επίστρωση από νιφάδες γραφενίου συμπεριλαμβανομένου προσμίξεις φθορίου (3.3 %) και άλλοι, με νιφάδες γραφενίου χωρίς προσμίξεις.

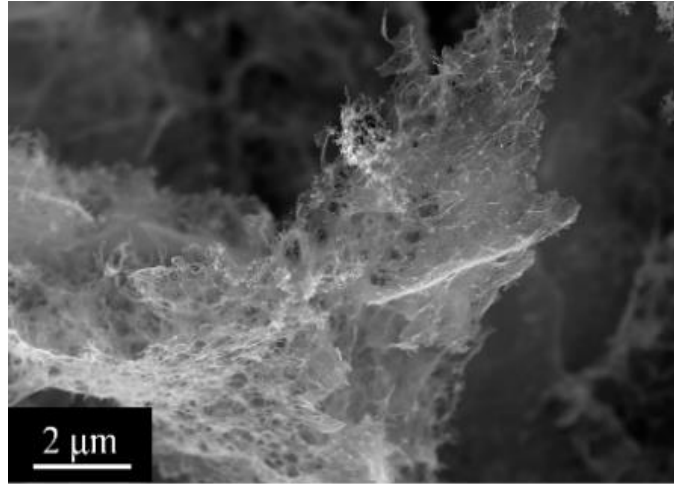
Την τελευταία δεκαετία, το γραφένιο κατέχει κυρίαρχο ρόλο στον τομέα της τεχνολογίας και κυρίως στην μικροηλεκτρονική λόγω των σημαντικών ιδιοτήτων που διαθέτει όπως θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, οπτική διαπερατότητα, υψηλή ευκινησία φορέων ^[28,29]. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από ευαισθησία ως προς την μεταφορά φορτίου από και προς τα προσροφημένα μόρια^[30]. Τέλος, οι τροποποιήσεις του γραφενίου αλλάζουν την αγωγιμότητα σε ένα ευρύ φάσμα και δημιουργούν θέσεις προσρόφησης για τα μόρια. Ανάλογα με το είδος της τροποποίησης, η ενέργεια της αλληλεπίδρασης μεταξύ μορίων και στρώματος γραφενίου μπορεί να διαφέρει σημαντικά και αυτό το καθιστά κατάλληλο για την χρήση του σε αισθητήρες προσδίδοντας τους γρήγορους ρυθμούς προσρόφηση και εκ ρόφησης^[30]. Η μέθοδος LEST παρέχει την δυνατότητα παραγωγής και μεταφοράς νιφάδων γραφενίου σε οποιαδήποτε επιφάνεια όπως, σε πολυμερές, γυαλί, κεραμικά, μέταλλα κτλ^[27]. Για την εκπόνηση της εργασίας, η μέθοδος εφαρμόστηκε σε οπτικές ίνες.



Εικόνα 26: Επικάλυψη του αισθητήρα με νιφάδες γραφενίου συμπεριλαμβανομένου προσμίξεις φθορίου με την μέθοδο LEST ^[27]

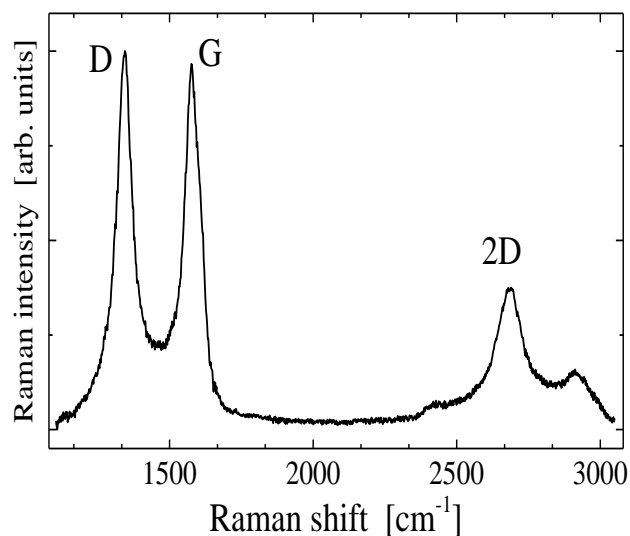
Η διαδικασία της εναπόθεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 26. Η κεντρική ιδέα βασίζεται στην αποδόμηση κατάλληλου υλικού κατά την ακτινοβολήση του με δέσμη λέιζερ. Η αποδόμηση έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία νιφάδων γραφενίου και την εκτόξευση τους προς την επιφάνεια του υποστρώματος, όπου και εναποθέτονται. Συγκεκριμένα, για την ακτινοβολήση χρησιμοποιήθηκε παλμικό Nd:YAG λέιζερ με μήκος κύματος στα 1064 nm. Επιπλέον, το spot size της δέσμης είναι 1.4 mm και η πυκνότητα ενέργειας 74 J/cm². Ως στόχος, προκειμένου να προκύψει το γραφένιο με προσμίξεις φθορίου, ακτινοβολήθηκε ένα φθοριωμένο πολυμερές υλικό το οποίο αποτελείται από τρία στρώματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17. Τα δύο εξωτερικά στρώματα αποτελούνται από φθοριωμένο αιθυλένιο προπυλένιο (FEP) και έχουν πάχος 2,5 μm ενώ το εσωτερικό, είναι πολυιμίδιο (PI) με πάχος 25 μm. Η τοποθέτηση της ίνας γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθεί η ακτινοβολήση της γεγονός που θα αλλοίωνε το φράγμα περίθλασης. Οπότε, η δέσμη σαρώνει το στόχο σε διαδρομή παράλληλη της ίνας όπως φαίνεται σχηματικά στη παραπάνω εικόνα^[27]. Αυτό, εκτός από την προστασία της ίνας εξασφαλίζει ταυτόχρονα την ομοιόμορφη και ομοιογενή επίστρωση στο σημείο του φράγματος περίθλασης.

Στην Εικόνα 27, απεικονίζεται με την χρήση SEM (Scanning Electron Microscopy) η δομή του παραγόμενου γραφενίου με προσμίξεις φθορίου. Από την εικόνα γίνεται αντιληπτή η πορώδης δομή του γραφενίου.



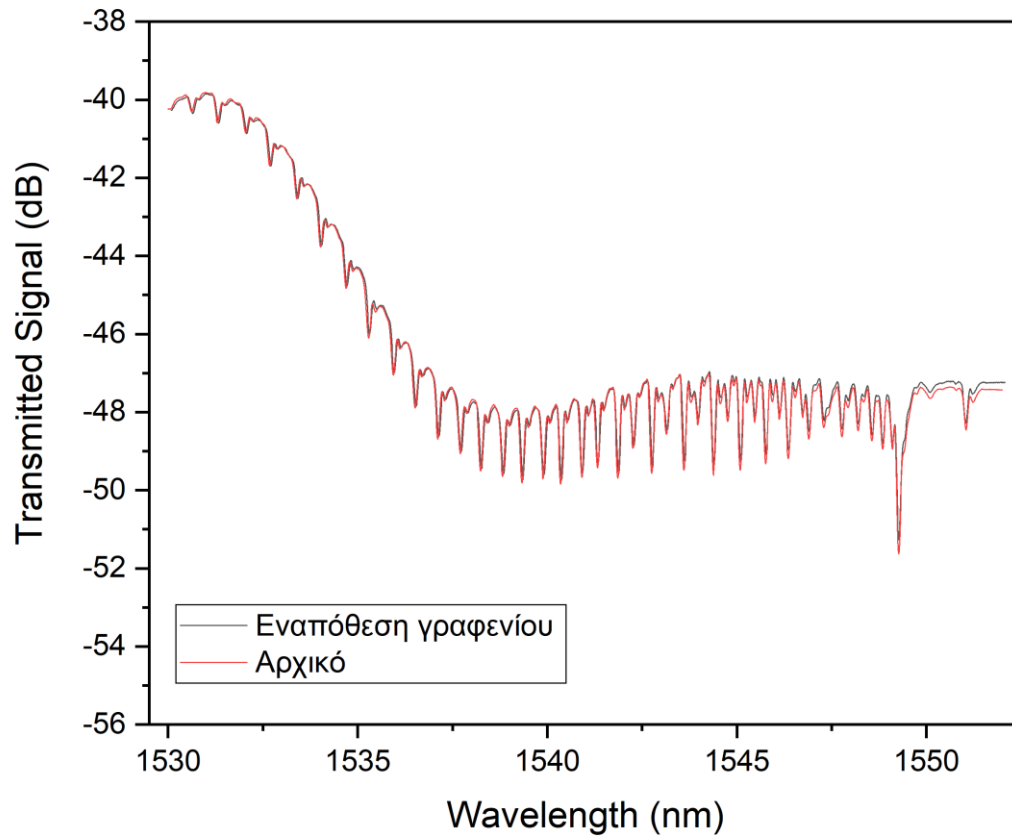
Εικόνα 27: Εικόνα SEM της δομής του παραγόμενου γραφενίου με προσμίξεις φθορίου ^[27]

Ο χαρακτηρισμός του στρώματος μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές φασματοσκοπίας όπως, με φασματοσκοπία Raman και φασματοσκοπία Φωτοηλεκτρονίων Ακτίνων-X. Το πάχος ενός τέτοιο στρώματος έχει εκτιμηθεί ότι κυμαίνεται στα 20-40 nm. Επιπλέον, με Φωτοηλεκτρονική φασματοσκοπία ακτίνων X (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) προκύπτει το ποσοστό του φθορίου το οποίο είναι περίπου ίσο με 3.3%.



Εικόνα 28: Φάσμα Raman του γραφενίου με προσμίξεις φθορίου ^[27]

Στο Διάγραμμα 2 φαίνεται το φάσμα του υπό γωνία φράγματος περίθλασης Bragg πριν και μετά την εναπόθεση του γραφενίου.



Διάγραμμα 2: Φάσμα υπό γωνία φράγματος περίθλασης Bragg πριν και μετά την εναπόθεση γραφενίου.

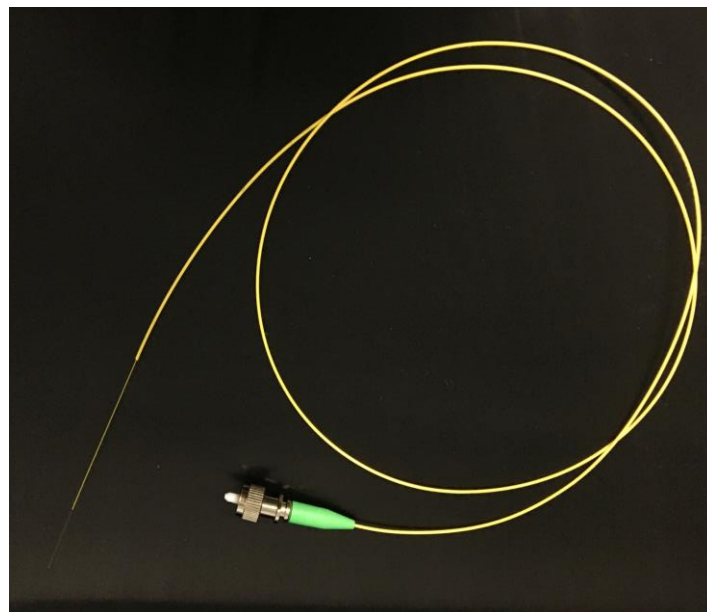
3.2. Κατασκευή αισθητήρων με κοιλότητες Fabry-Pérot

Για την ανίχνευση ατμών πτητικών ενώσεων οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν βασίζονται στη δημιουργία κοιλότητας Fabry-Pérot από φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη στο ένα άκρο μιας μονότροπης ίνας.

Για την επίτευξη της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκαν 2 μονότροπες ίνες Corning SMF-28 Ultra fiber οι οποίες έχουν το ένα άκρο εκτεθειμένο και στο άλλο καλύπτονται με πλαστικό καλώδιο που διαθέτει συνδετήρα όπως φαίνεται στην Εικόνα 29. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα είδος ρητίνης από την εταιρία Norland Products με κωδικό NOA65 που διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

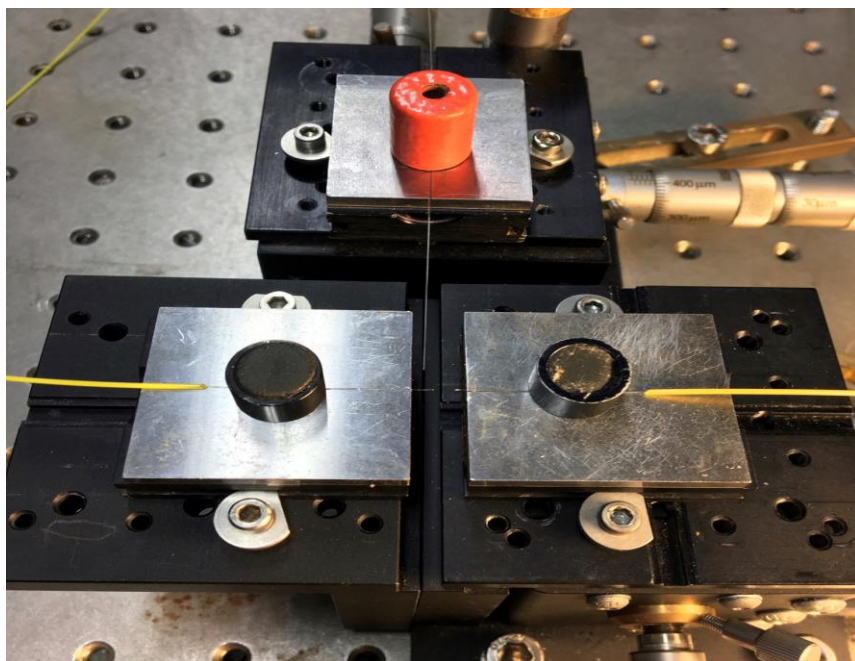
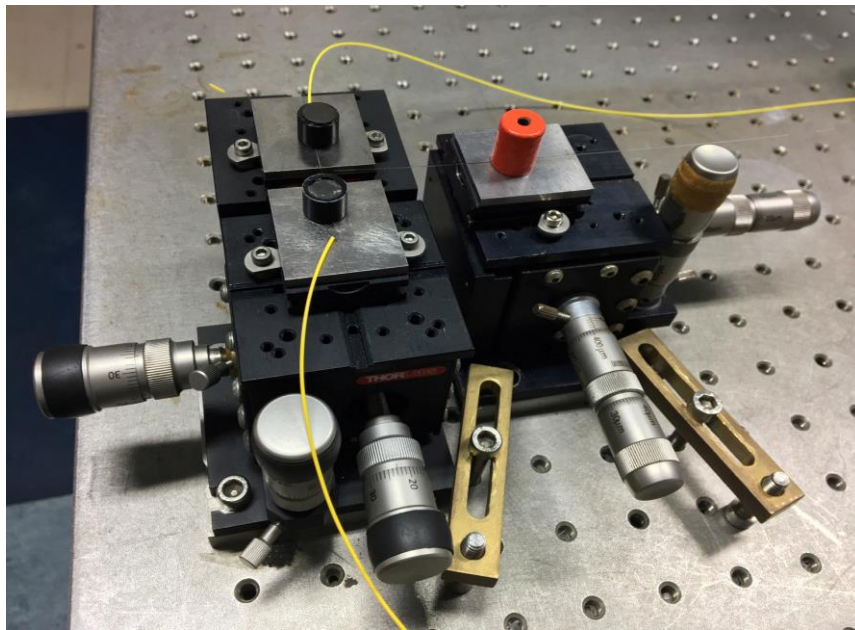
| | |
|-----------------------------------|--------------|
| Solids | 100% |
| Viscosity at 25° C | 1200 cps |
| Refractive Index of Cured Polymer | 1.524 |
| Elongation at Failure | 80% |
| Modulus of Elasticity (psi) | 20,000 |
| Tensile Strength (psi) | 1,500 |
| Hardness - Shore D | 50 |
| Temperature Range | -15 to 60° C |

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά της ρητίνης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της κοιλότητας ^[31]



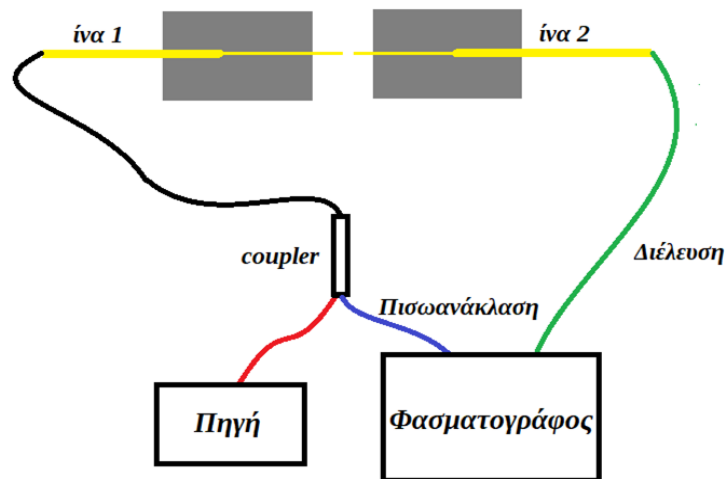
Εικόνα 29: Ίνα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του αισθητηρίου

Αρχικά, αφαιρέθηκε το πλαστικό περίβλημα σε ένα μικρό μήκος των ινών και κόπηκαν τα άκρα με ειδική συσκευή προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν πιο κάθετες επιφάνειες. Όσο πιο επίπεδη είναι η επιφάνεια της ίνας, τόσο περισσότερο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και άρα το σήμα εξόδου μεγιστοποιείται. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε βάση που διαθέτει την δυνατότητα κίνησης κατά τους 3 άξονες με μικρομετρικές κινήσεις. Η τοποθέτηση γίνεται έτσι ώστε οι επιφάνειες τους να είναι παράλληλες. Η προαναφερόμενη διάταξη απεικονίζεται στην Εικόνα 30.



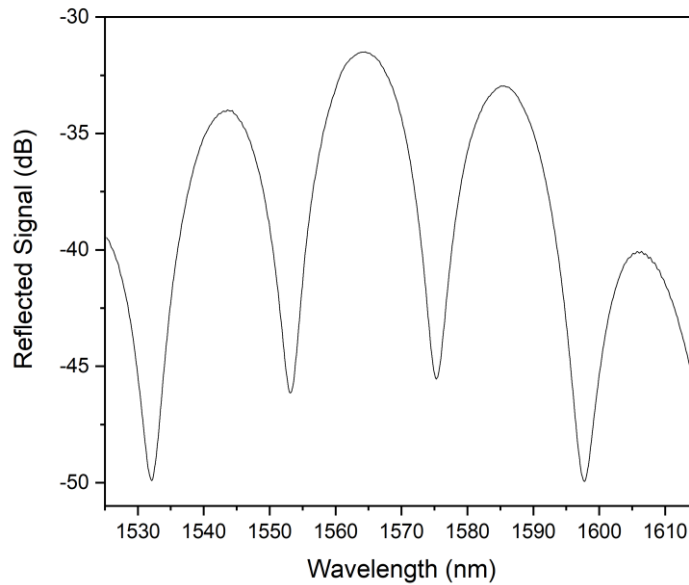
Εικόνα 30: α) Πειραματική διάταξη κατασκευής αισθητηρίων με κοιλότητες F-P, β) Τοποθέτηση ινών στη βάση

Έχοντας τοποθετηθεί κατάλληλα οι ίνες στη βάση, πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες συνδέσεις με τον οπτικό αναλυτή φάσματος και την πηγή όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 31.



Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση συνδεσμολογίας για την κατασκευή του αισθητηρίου

Το αρχικό βήμα είναι να εξασφαλίσουμε την καλύτερη δυνατή ευθυγράμμιση των πυρήνων των ινών για την επίτευξη του μέγιστου σήματος. Για το σκοπό αυτό, μετράμε την διέλευση του φωτός της πηγής από την μία ίνα στην άλλη μέσω του φασματογράφου και παράλληλα με τους μικρομετρικούς κοχλίες μετακινούμε τις ίνες κατά τους τρεις άξονες έως ότου πετύχουμε την βέλτιστη ευθυγράμμιση. Έπειτα, μελετώντας το φάσμα της οπισθοσκέδασης παρατηρούμε τις κορυφές που σχηματίζονται λόγω συμβολής. Ένα ενδεικτικό φάσμα παρατίθεται στο Διάγραμμα 3.

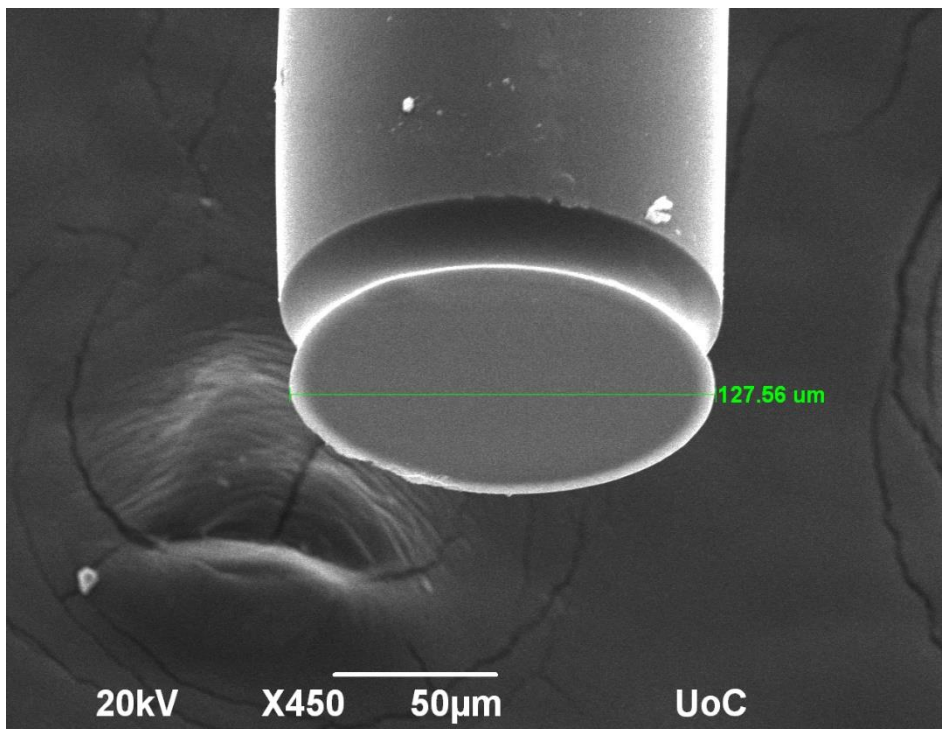
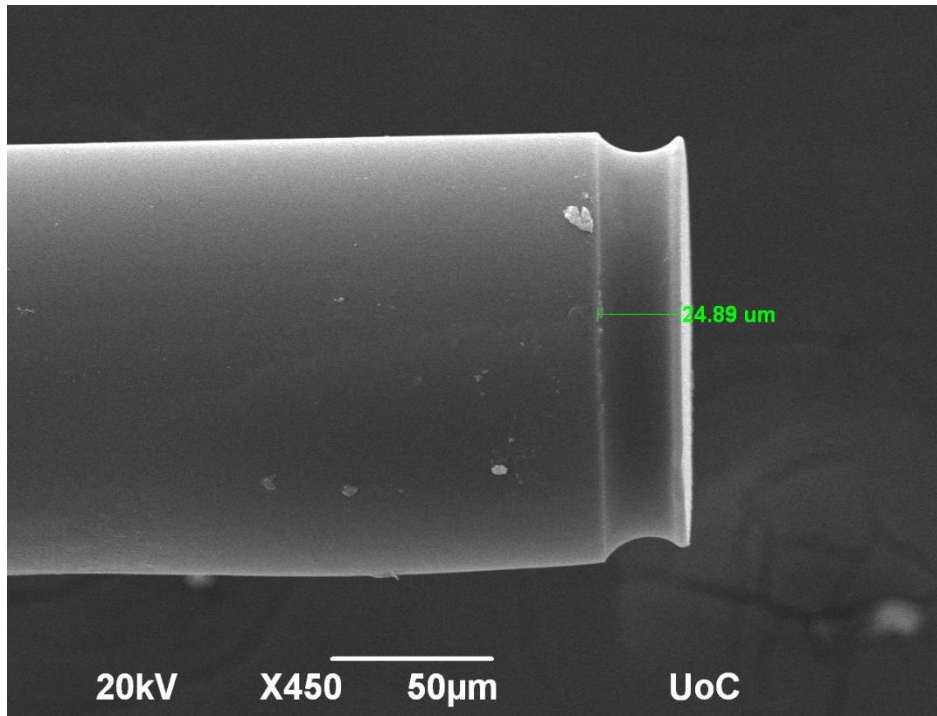


Διάγραμμα 3: Φάσμα ανάκλασης ενός αισθητήρα με κοιλότητα F-P.

Για την κατασκευή της κοιλότητας, τοποθετήθηκε μικρή ποσότητα ρητίνης μεταξύ των δύο ινών. Για μεγαλύτερη ευκολία τοποθέτησης και καλύτερο έλεγχο της ποσότητας αυτό μπορεί να γίνει με την χρήση μιας τρίτης ίνας στην οποία, έχει προσθέσει ελάχιστη ποσότητα από το υλικό με μια καρφίτσα. Κινώντας μικρομετρικά την τρίτη ίνα εναποτίθεται η ρητίνη ανάμεσα στις άλλες δύο. Προκειμένου να στερεοποιηθεί η ρητίνη εκτίθεται για 10 λεπτά σε υπεριώδη ακτινοβολία μέσω χειροκίνητης πηγής μήκους κύματος 370 nm.

Το τελευταίο βήμα είναι η αποκόλληση των 2 ινών η οποία γίνεται χειροκίνητα απλώς τραβώντας την μια ίνα. Έτσι, το τελικό αποτέλεσμα είναι η ρητίνη να μείνει προσκολλημένη στη μία ίνα και να δημιουργηθεί ένα συμβολόμετρο F-P.

Με την χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου σάρωσης (SEM-Scanning-Electron-Microscope) λήφθηκαν οι ακόλουθες φωτογραφίες (Εικόνα 32) για ένα αισθητήρα F-P με μήκος κοιλότητας 25 μm .

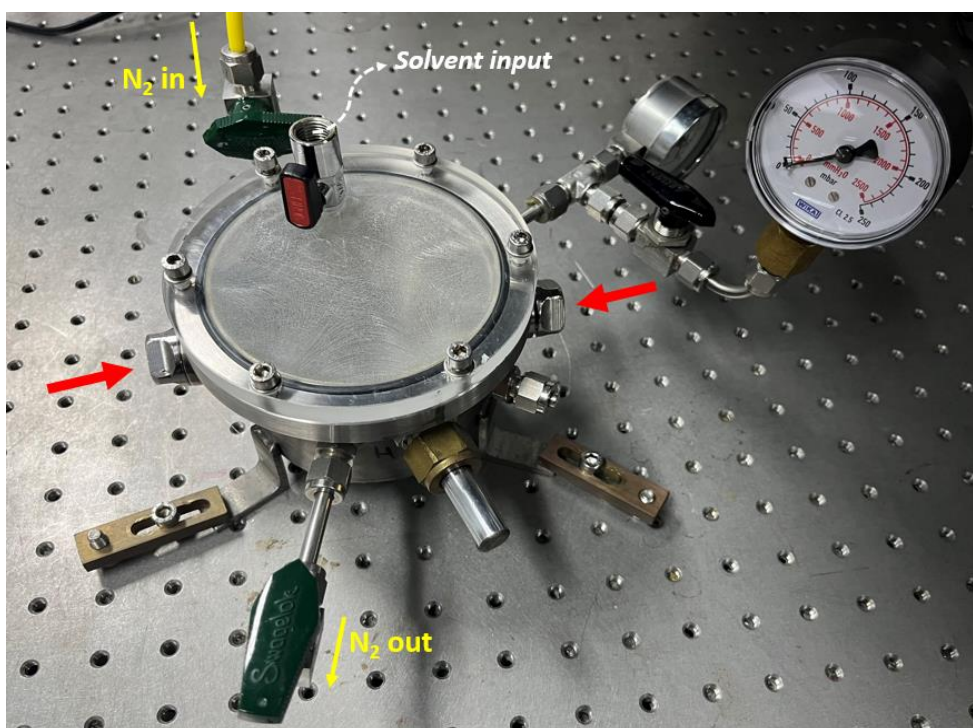


Εικόνα 32: Εικόνες SEM για αισθητήρα με κοιλότητα μήκους 25 nm

3.3. Πειραματική διάταξη μελέτης αισθητηρίων

Και για τους δύο τύπους αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε η ίδια πειραματική διάταξη. Ο αισθητήρας τοποθετείται σε κατάλληλο μονωμένο θάλαμο, από ανοξείδωτο χάλυβα (Εικόνα 33) και στη συνέχεια η προς ανίχνευση ουσία (αλκοόλη, υδατική αμμωνία) εισέρχεται, σε υγρή μορφή, με σκοπό τη δημιουργία ατμών. Η απόκριση του αισθητήρα καταγράφεται μέσω των αντίστοιχων φασμάτων κατά την εξάτμιση και παραγωγή ατμών.

Ο θάλαμος έχει χωρητικότητα 0.5 L και η αυξανόμενη πίεση εντός του θαλάμου μετριέται με ένα μανόμετρο.

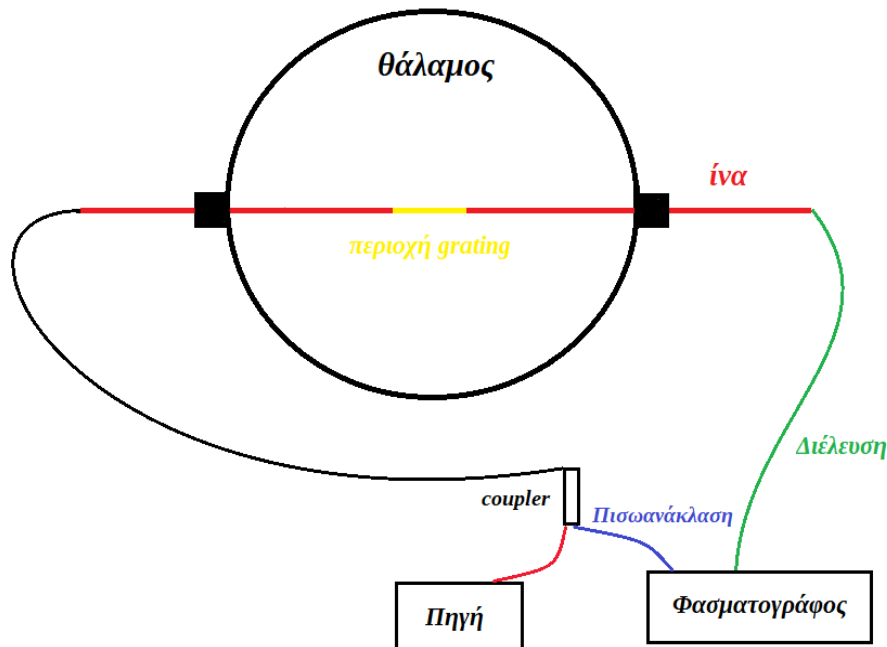


Εικόνα 33: Θάλαμος εξέτασης των αισθητήρων υπό την παρουσία ατμών

Στο πάνω μέρος ο θάλαμος αποτελείται από επιφάνεια plexiglass ώστε να υπάρχει ορατότητα και διαθέτει κατάλληλη υποδοχή για την εισχώρηση των υπό μελέτη ουσιών (άσπρο βέλος). Επιπλέον, στο πλάι υπάρχει υποδοχή που συνδέεται με φιάλη αζώτου (κίτρινα βέλη). Πριν και μετά από κάθε μέτρηση χρησιμοποιείτε άζωτο για το καθαρισμό και το στέγνωμα του θαλάμου.

Τέλος, δεξιά και αριστερά υπάρχουν κατάλληλοι υποδοχείς (κόκκινα βέλη) στους οποίους τοποθετείτε η ίνα τεντωμένη και βιδώνοντας τους σφραγίζουμε τον θάλαμο.

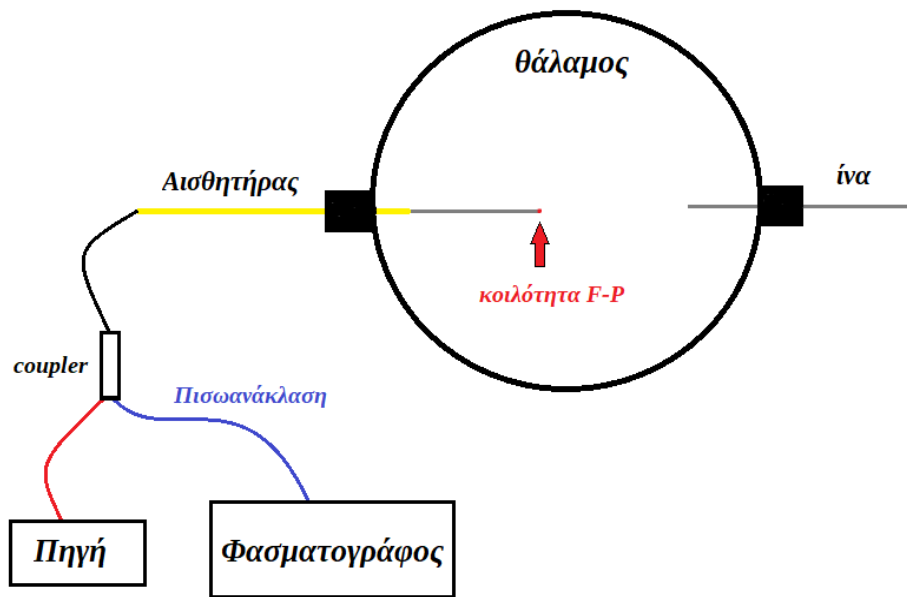
Στην περίπτωση των αισθητήρων με τα υπό γωνία φράγματα περίθλασης Bragg, ο αισθητήρας τοποθετείτε και συνδέετε προκειμένου να μελετηθεί το φάσμα διέλευσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 34: Σχηματική αναπαράσταση τοποθέτησης και σύνδεσης του αισθητήρα με υπό γωνία φράγμα περίθλασης Bragg

Η ίνα στηρίζεται στους δύο υποδοχείς έτσι ώστε το φράγμα περίθλασης να βρίσκεται μέσα στο θάλαμο. Στη συνέχεια, τα δύο άκρα συνδέονται με πηγή μεγάλου φασματικού εύρους (Super Luminescent Diode-SLD) και με έναν οπτικό αναλυτή φάσματος (Optical Spectrum Analyzer-OSA). Μέσω του φασματογράφου, με την σύνδεση των αντίστοιχων οπτικών ινών, μπορούμε να δούμε τόσο το φάσμα διέλευσης όσο και το ανακλώμενο.

Αντίστοιχα, στη περίπτωση των αισθητήρων με κοιλότητες F-P η τοποθέτηση και η σύνδεση γίνεται όπως φαίνεται στη σχηματική Εικόνα 35. Ο αισθητήρας εισέρχεται από την μία υποδοχή ενώ, στη δεύτερη προκειμένου να μην υπάρχουν απώλειες, τοποθετείτε μια απλή ίνα για να σφραγιστεί ο θάλαμος.



Εικόνα 35: Σχηματική αναπαράσταση τοποθέτησης και σύνδεσης του αισθητήρα με κοιλότητα F-P

Ο αισθητήρας μέσω του συζεύκτη συνδέεται με μια πηγή και τον οπτικό αναλυτή φάσματος. Στη προκείμενη περίπτωση, μελετάμε το φάσμα της ανάκλασης δηλαδή το χαρακτηριστικό ημιτονοειδές φάσμα του Fabry – Péroτ.

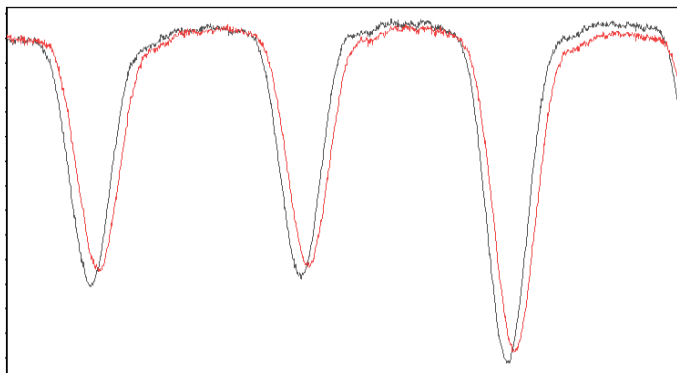
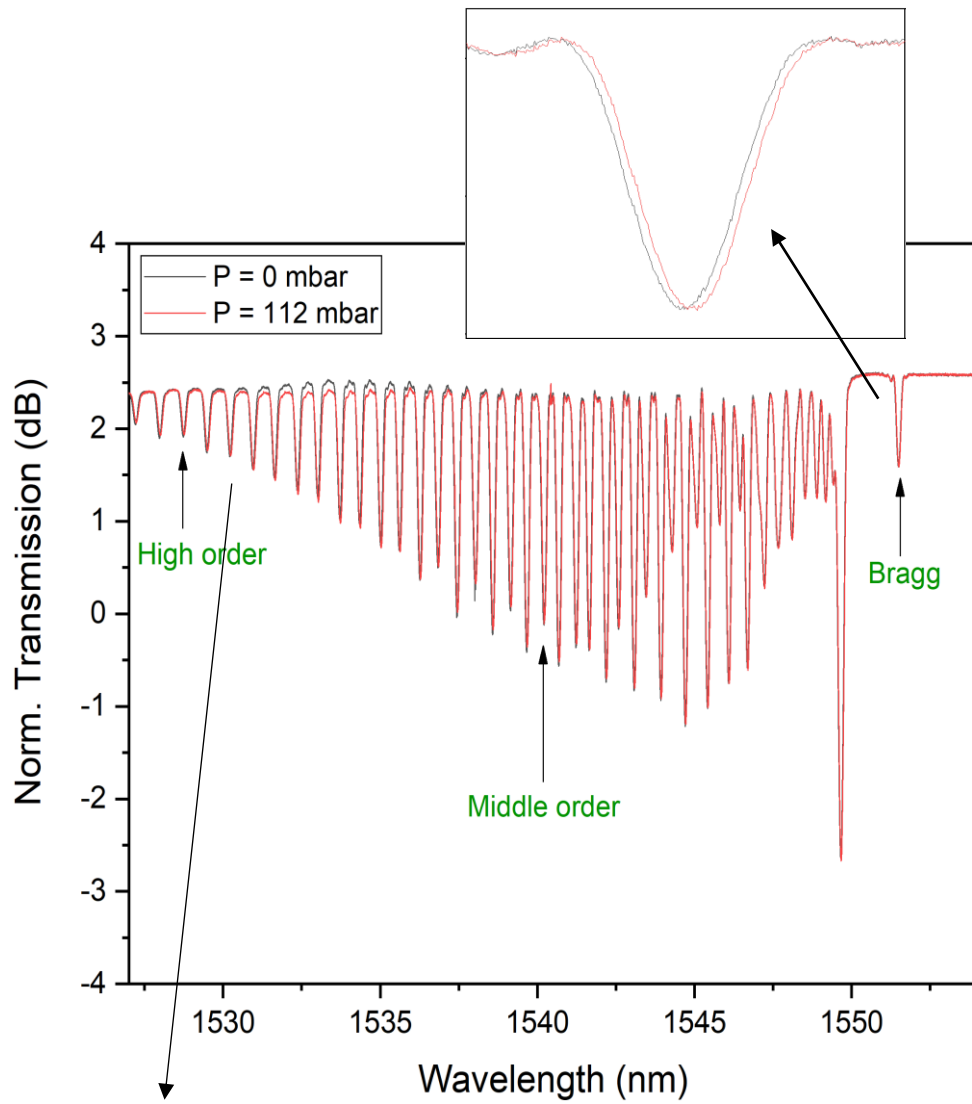
Κεφάλαιο 4^ο

Μελέτη αισθητήρων: Μετρήσεις και πειραματικά αποτελέσματα

4.1. Ανίχνευση ατμών αμμωνίας

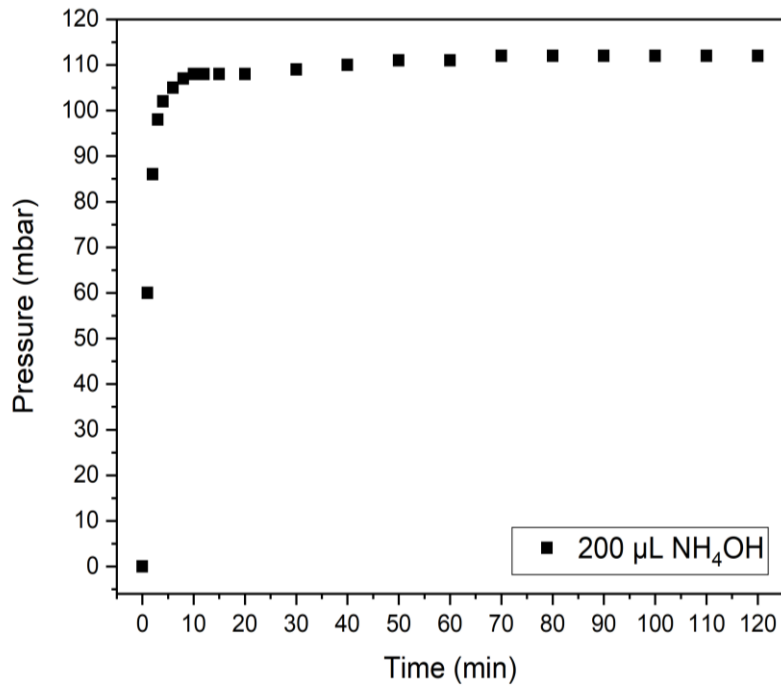
Για την μελέτη της απόκρισης του αισθητήρα υπό την παρουσία ατμών υδατικής αμμωνίας εκχύθηκε στο θάλαμο 200 μL διαλύματος υγρής αμμωνίας (28.0 - 30.0 % βάση NH_3 , Honeywell) με τη χρήση σταγονόμετρου. Τα 200 μL αντιστοιχούν σε 400 ppm (parts per million) καθώς ο θάλαμος έχει χωρητικότητα 0,5 L. Το διάλυμα περιείχε κατά βάση νερό και 28% αμμωνία (NH_4OH). Επιπλέον, μελετήθηκε και η απόκριση του για την παρουσία νερού προκειμένου να ελεγχθεί η επίδραση της αμμωνίας αφαιρώντας το νερό. Όπως προαναφέρθηκε, μελετήθηκαν αισθητήρες με διαφορετικές επιστρώσεις γραφενίου. Συγκεκριμένα, αισθητήρες με επίστρωση γραφενίου με προσμίξεις φθορίου, αισθητήρες με γραφένιο και φράγματα περίθλασης χωρίς επίστρωση γραφενίου για σύγκριση.

Ο εκάστοτε αισθητήρας τοποθετείται εντός θαλάμου, όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Για κάθε έκθεση του αισθητήρα καταγράφηκε η πίεση του αερίου μέσα στο θάλαμο, ο αντίστοιχος χρόνος καθώς και το φάσμα διέλευσης. Αρχικά, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την έκθεση του αισθητήρα όπου, το φράγμα περίθλασης Bragg υπό γωνία έχει επικαλυφθεί με νιφάδες γραφενίου με προσμίξεις φθορίου. Στο Διάγραμμα 4 απεικονίζεται το φάσμα διέλευσης για μηδενική πίεση διαλύματος, δηλαδή πριν εκθέσουμε τον αισθητήρα σε NH_4OH και για πίεση 112 mbar που αντιστοιχεί στη κορεσμένη πίεση των αερίων έπειτα από 2 ώρες έκθεσης. Επιπλέον, εικονίζεται σε μεγέθυνση το αρχικό καθώς και το τελικό φάσμα για το μήκος κύματος Bragg και για τα μήκη κύματος των τρόπων ταλάντωσης του περιβλήματος (high order και middle order). Το high order που μελετήθηκε βρίσκεται σε μήκος κύματος 1528,74 nm, το middle στα 1540,22 nm και το Bragg 1551,50 nm (Διάγραμμα 4). Γίνεται αντιληπτό, ότι το φάσμα έχει μετατοπιστεί προς μεγαλύτερα μήκη κύματος ανταποκρινόμενο στην παρουσία των αερίων.

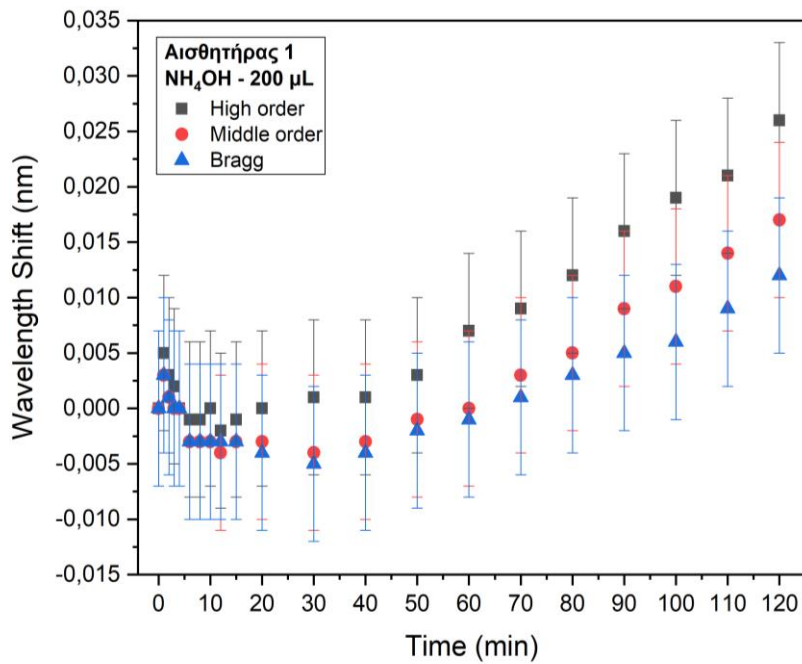


Διάγραμμα 4: Κανονικοποιημένα φάσματα διέλευσης για πίεση ατμών 0 mbar και 112 mbar.

Στο Διάγραμμα 5 φαίνεται η εξέλιξη της πίεσης με το χρόνο καθώς και το σημείο κορεσμού της. Επιπλέον, στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η μετατόπιση του μήκους κύματος τόσο για τους τρόπους ταλάντωσης του περιβλήματος, όσο και για το μήκος κύματος Bragg.



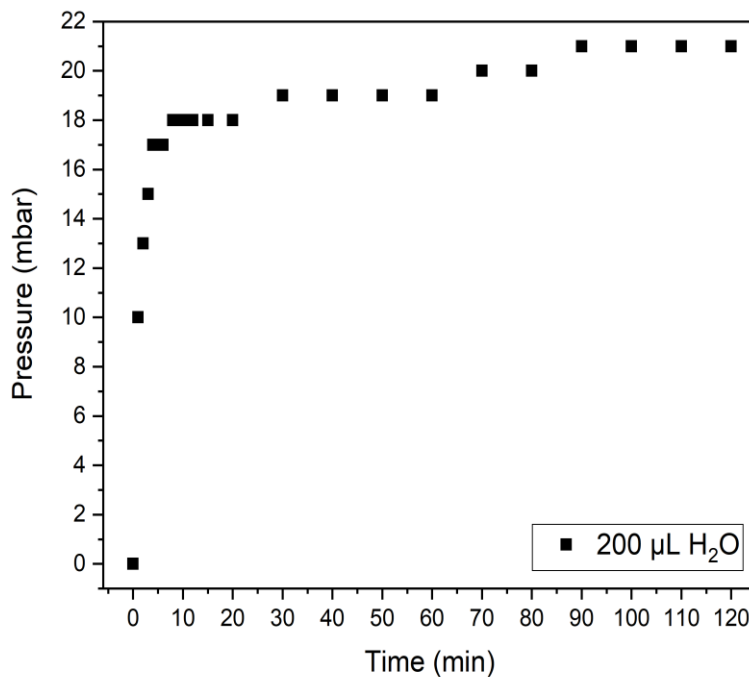
Διάγραμμα 5: Μεταβολή της πίεσης εντός θαλάμου για έγχυση 200 μL NH₄OH.



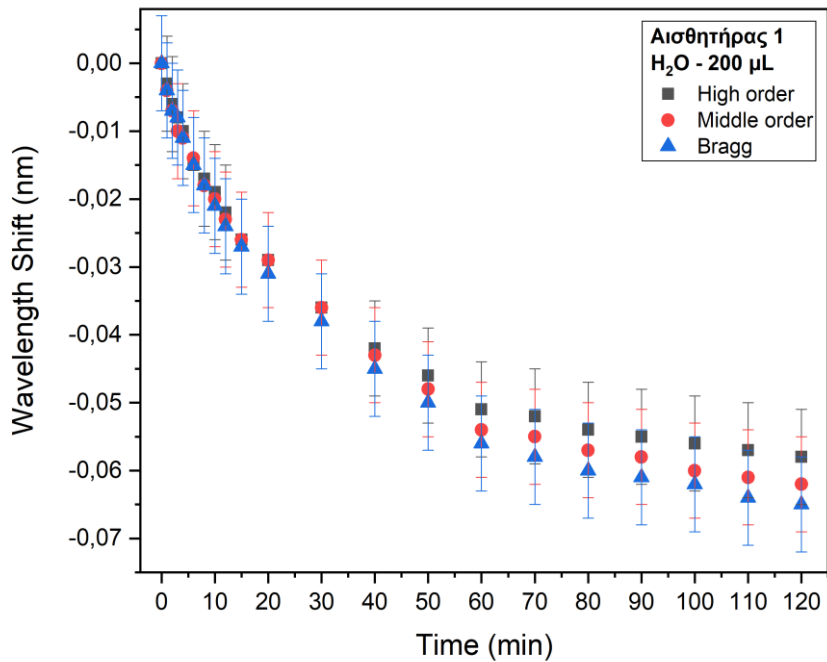
Διάγραμμα 6: Μετατόπιση του μήκους κύματος αυξανόμενης της πίεσης ατμών για high, middle order Bragg.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τρόπους μετάδοσης μετατοπίζονται σε διαφορετικό βαθμό. Αρχικά, παρατηρείτε μια μικρή μετατόπιση προς μικρότερα μήκη κύματος και έπειτα μετατόπιση προς μεγαλύτερα μήκη κύματος για όλες τις κορυφές. Η μετατόπιση των κορυφών που αντιστοιχούν σε σύζευξη σε τρόπους ταλάντωσης του περιβλήματος (high και middle order) μεταβάλλονται κυρίως λόγω αλλαγών των οπτικών χαρακτηριστικών του επιστρώματος γραφενίου όπως, αλλαγή του δείκτη διάθλασης και της απορρόφησης. Αντιθέτως, η κορυφή Bragg δεν επηρεάζεται από τέτοιες αλλαγές μια και το φως παραμένει παγιδευμένο στον πυρήνα. Οι μετρούμενες αλλαγές της κορυφής Bragg πιθανότατα οφείλονται σε αλλαγές στη επιμήκυνση της ίνας.

Η ίδια μέτρηση πραγματοποιήθηκε και για 200 μL νερού έτσι, παρουσιάζονται τα ακόλουθα αποτελέσματα (Διαγράμματα 7 & 8):



Διάγραμμα 7: Μεταβολή της πίεσης των υδρατμών για 200 μL H₂O.



Διάγραμμα 8: Μετατόπιση του μήκους κύματος αυξανόμενης της πίεσης υδρατμών για high, middle order Bragg.

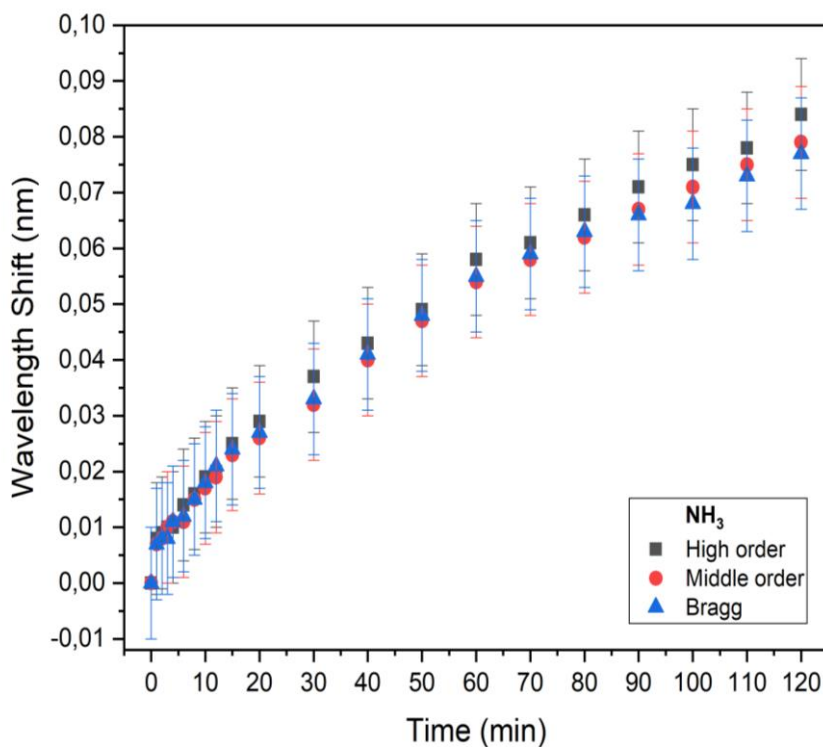
Σε αυτή τη περίπτωση προκύπτουν αντίστοιχες μετατοπίσεις για όλα τα μήκη κύματος τείνοντας να μετατοπίζονται προς το υπεριώδες. Στο Πίνακα 2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τις προαναφερόμενες μετατοπίσεις.

| Order | Wavelength Shift (nm) | |
|--------|-----------------------|------------------|
| | NH ₄ OH | H ₂ O |
| High | 0.026 | -0.058 |
| Middle | 0.017 | -0.062 |
| Bragg | 0.012 | -0.065 |

Πίνακας 2: Τελικές μετατοπίσεις μήκους κύματος για κάθε order για έκθεση αισθητήρα με γραφένιο και προσμίξεις φθορίου σε ατμούς από την εξάτμιση NH₄OH και υδρατμούς.

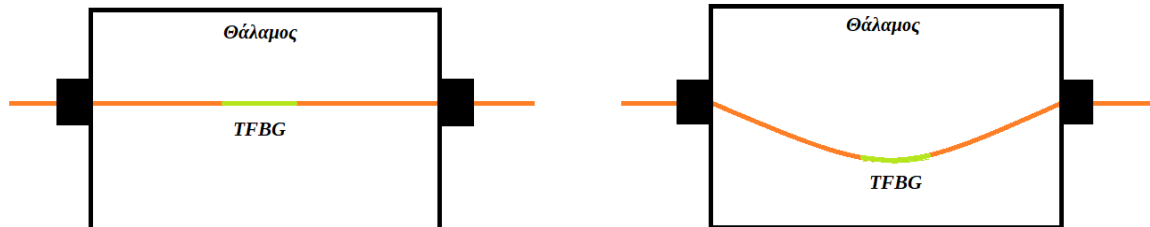
Στο νερό παρατηρούνται μεγαλύτερες μετατοπίσεις που έχουν την ίδια τιμή και για τις τρεις κορυφές που μετρήθηκαν. Αντίθετα, με την παρουσία της αμμωνίας έχουμε διαφορετική μετατόπιση για κάθε order. Το high order έχει την μεγαλύτερη μετατόπιση. Τέλος, και η κορυφή Bragg παρουσιάζει μετατόπιση γεγονός που επιδεικνύει αλλαγές στο μήκος της ίνας.

Αφαιρώντας από τις μετρήσεις της υδατικής αμμωνίας εκείνες του νερού προκύπτει το ακόλουθο Διάγραμμα 9.



Διάγραμμα 9: Μετατόπιση του μήκους κύματος για NH₃.

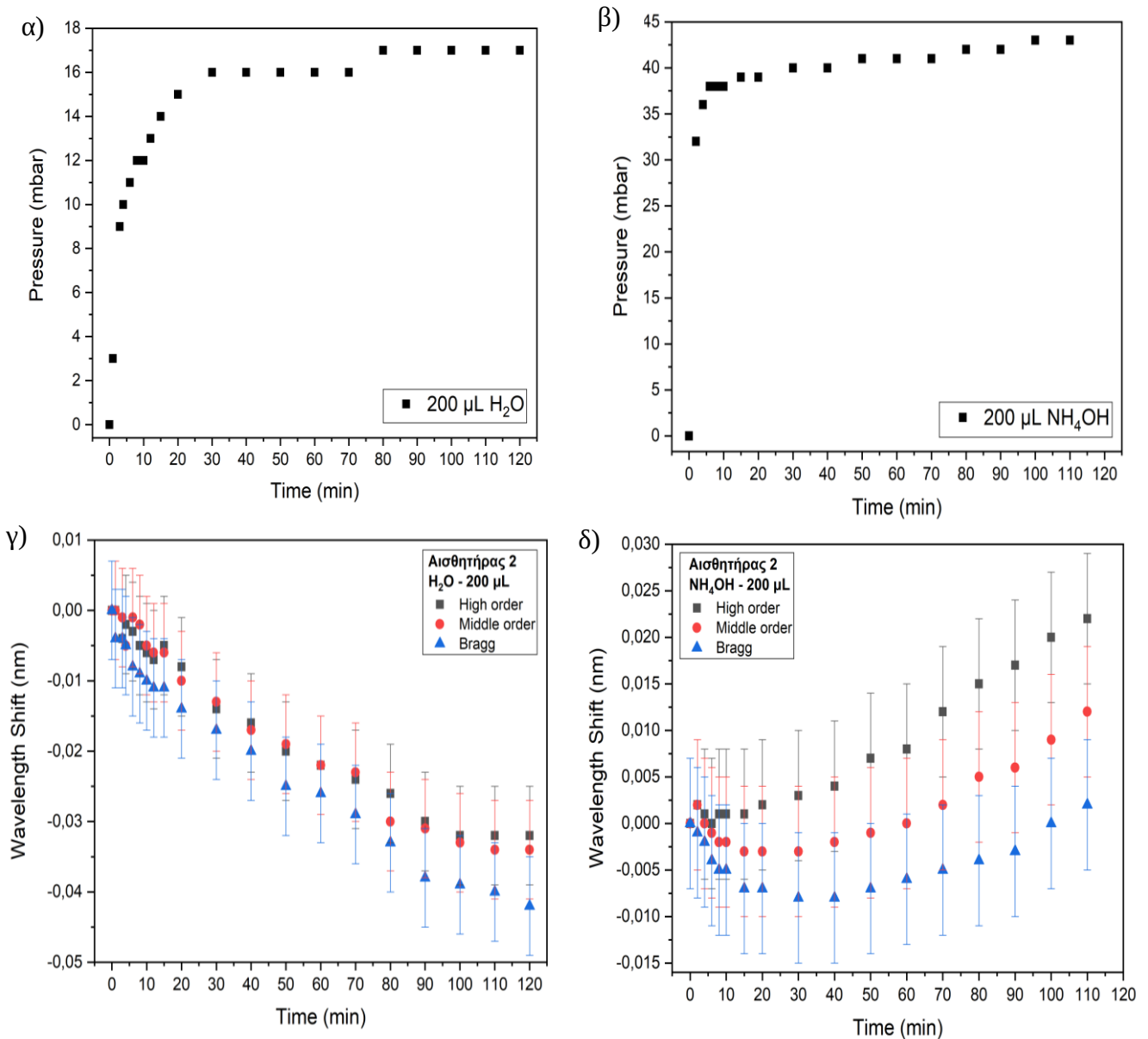
Για τις προηγούμενες μετρήσεις η ίνα τοποθετήθηκε τεντωμένη μέσα στο θάλαμο με το φράγμα περίθλασης να βρίσκεται μέσα σε αυτό (Εικόνα 36α). Στη συνέχεια της πειραματικής μελέτης, δοκιμάστηκε να τοποθετηθεί η ίνα σε χαλαρή θέση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36β.



Εικόνα 36: Θέση της ίνας μέσα στο θάλαμο α) Τεντωμένη, β) Χαλαρή τοποθέτηση

Σε αυτή τη περίπτωση παρατηρήθηκε αμελητέα μετατόπιση κατά την έκθεση σε NH_4OH αλλά και σε H_2O . Αυτή η παρατήρηση ενισχύει την υπόθεση ότι οι καταγεγραμμένη συμπεριφορά συσχετίζεται και με μεταβολές στην επιμήκυνση της ίνας.

Στη συνέχεια, η διαδικασία επαναλήφθηκε για αισθητήρα με επίστρωση γραφενίου χωρίς φθόριο. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα (Διαγράμματα 10) τόσο για το νερό όσο και για το διάλυμα NH_4OH .



Διάγραμμα 10: α,β) Μεταβολή της πίεσης για έγχυση 200 μL H_2O και NH_4OH αντίστοιχα.
 γ,δ) Μετατόπιση του μήκους κύματος αυξανόμενης της πίεσης ατμών για έκθεση αισθητήρα με γραφένιο χωρίς προσμίξεις φθορίου.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτό για τον αισθητήρα 1 που περιέχει προσμίξεις φθορίου στην επίστρωση γίνεται αντιληπτό ότι ο αισθητήρας είναι πιο ευαίσθητος στη πρώτη περίπτωση λόγω της παρουσίας του φθορίου.

Στο Πίνακα 3, παρουσιάζονται οι τελικές μετατοπίσεις για κάθε περίπτωση.

| Order | Wavelength Shift (nm) | |
|--------|-----------------------|------------------|
| | NH ₄ OH | H ₂ O |
| High | 0.022 | -0.032 |
| Middle | 0.012 | -0.034 |
| Bragg | 0.002 | -0.042 |

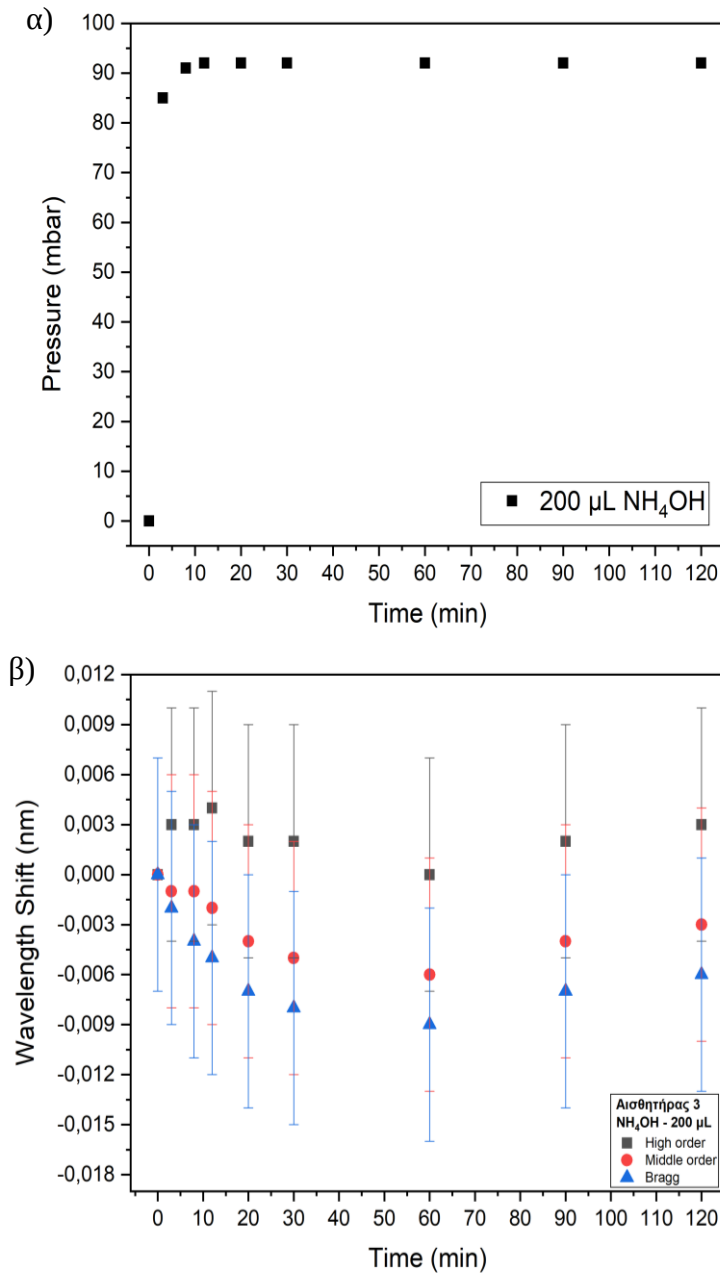
Πίνακας 3: Τελικές μετατοπίσεις μήκους κύματος για κάθε order για έκθεση αισθητήρα με γραφένιο σε ατμούς από την εξάτμιση NH₄OH και υδρατμούς.

Στο Πίνακα 4 γίνεται σύγκριση των μετατοπίσεων για τις δύο κατηγορίες αισθητήρων. Προκύπτουν μικρότερες μετατοπίσεις για την περίπτωση του αισθητήρα με γραφένιο χωρίς φθόριο τόσο για την περίπτωση της έκθεσης σε ατμούς από NH₄OH όσο και για την έκθεση σε υδρατμούς. Άρα, τα δομικά και οπτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο στρώμα γραφενίου και επηρεάζουν την καθοδήγηση του φωτός γίνονται πιο έντονα με την παρουσία του φθορίου. Το φθόριο είναι αρκετά αντιδραστικό λόγω της υψηλής του ηλεκτραρνητικότητας. Επιπλέον, το ντόπινγκ με φθόριο μειώνει την επιφανειακή ενέργεια και την εσωτερική τάση καθώς επίσης αυξάνει την υδροφοβικότητα.^[30]

| Order | Wavelength Shift (nm) Γραφένιο με προσμίξεις φθορίου | |
|--------|---|------------------|
| | NH ₄ OH | H ₂ O |
| High | 0.026 | -0.058 |
| Middle | 0.017 | -0.062 |
| Bragg | 0.012 | -0.065 |
| | | |
| Order | Wavelength Shift (nm) Γραφένιο | |
| | NH ₄ OH | H ₂ O |
| High | 0.022 | -0.032 |
| Middle | 0.012 | -0.034 |
| Bragg | 0.002 | -0.042 |

Πίνακας 4: Σύγκριση μετατοπίσεων μήκους κύματος για αισθητήρα με γραφένιο και για αισθητήρα με γραφένιο με προσμίξεις φθορίου.

Τέλος, έγινε μέτρηση, υπό τις ίδιες συνθήκες, για μια ίνα που διέθετε υπό γωνία φράγμα περίθλασης Bragg χωρίς να έχει επικαλυφθεί με στρώμα γραφενίου. Από τα αποτελέσματα γίνεται φανερό ότι χωρίς το γραφένιο ο αισθητήρας δεν είναι ευαίσθητος στην παρουσία ατμών υδατικής αμμωνίας. Οι μετατοπίσεις που παρατηρούνται είναι αμελητέες (Διαγράμματα 11).



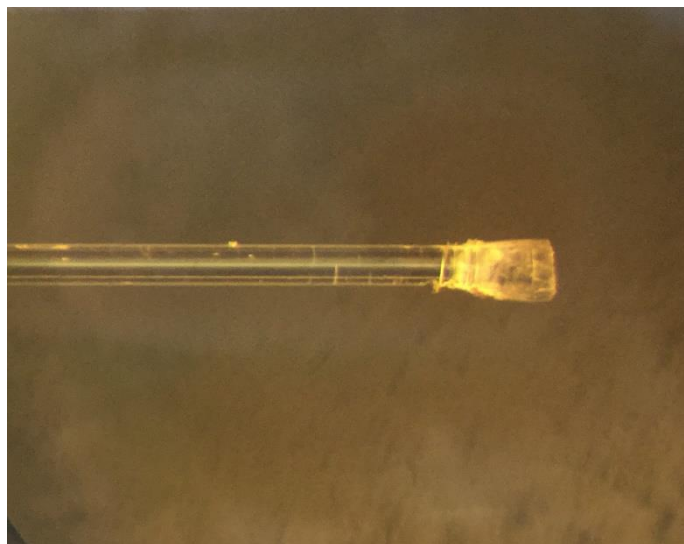
Διάγραμμα 11: α) Μεταβολή της πίεσης για 200 μL NH₄OH. β) Μετατόπιση μήκους κύματος για έκθεση αισθητήρα χωρίς εναπόθεση γραφενίου.

4.2. Ανίχνευση ατμών αλκοολών

Οι αλκοόλες που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας είναι η μεθανόλη, η αιθανόλη και η ισοπροπανόλη. Έχοντας τοποθετήσει κατάλληλα τον κάθε αισθητήρα στο μονωμένο θάλαμο που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, προστέθηκαν 200 μL της κάθε αλκοόλης με σταγονόμετρο και έπειτα, ο θάλαμος σφραγίστηκε. Καθώς ο θάλαμος έχει χωρητικότητα 0,5 L τα 200 μL αλκοόλης αντιστοιχούν σε 400 ppm (parts per million). Στη συνέχεια, το άκρο του αισθητήρα συνδέθηκε με τον οπτικό αναλυτή φάσματος και την πηγή μέσω του συζευκτήρα έτσι ώστε, να βλέπουμε το φάσμα της οπισθοσκέδασης δηλαδή, τις διαδοχικές κορυφές λόγω συμβολής στην οθόνη του φασματογράφου.

Από τα πρώτα κιόλας δευτερόλεπτα, οι αλκοόλες άρχισαν να εξατμίζονται δημιουργώντας ατμούς μέσα στο θάλαμο και κατά συνέπεια, η πίεση αυξανόταν μέχρι το σημείο κορεσμού. Έχοντας καταγράψει το φάσμα για διάφορες χρονικές στιγμές καθώς και την αντίστοιχη πίεση για την εκάστοτε χρονική στιγμή, παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα.

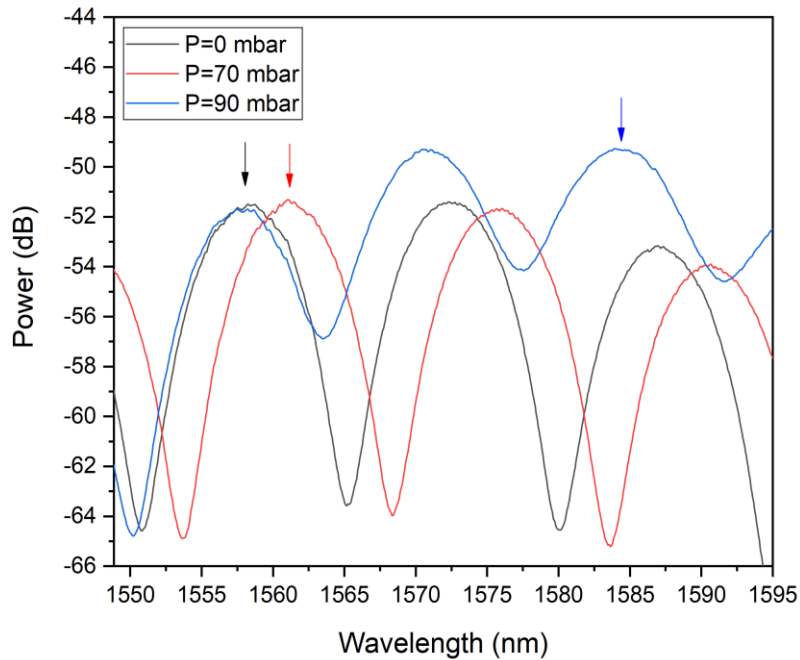
Στην Εικόνα 37 απεικονίζεται ο πρώτος αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη δύο αλκοολών, της μεθανόλης και της αιθανόλης. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει $\text{FSR}=14$ nm και μήκος κοιλότητας 60 μm , το οποίο



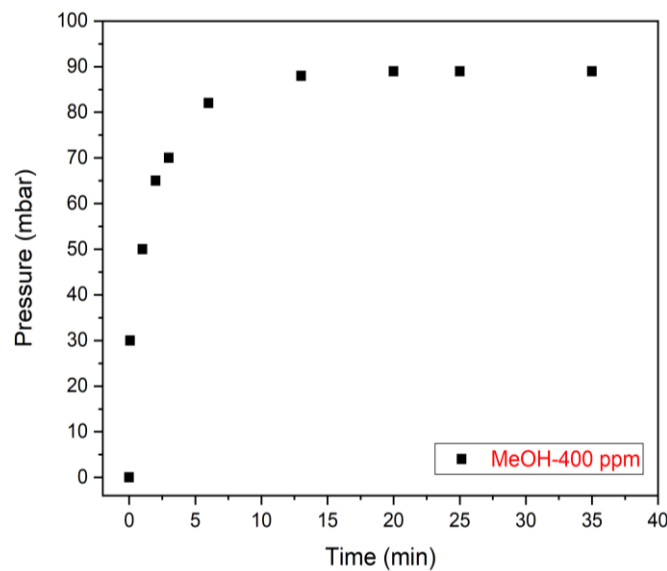
υπολογίζεται από την εξίσωση (2.53).

Εικόνα 37: Αισθητήρας με κοιλότητα F-P από φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη και μήκος κοιλότητας 60 μm

Στο Διάγραμμα 12 παρουσιάζεται το φάσμα που καταγράφηκε για αυξανόμενη πίεση μεθανόλης για 3 διαφορετικές πιέσεις, 0 mbar, 70 mbar και 90 mbar. Η μέτρηση διήρκησε περίπου 35 λεπτά και στα πρώτα 20 λεπτά παρατηρήθηκε κορεσμός της πίεσης στα 90 mbar, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 13.

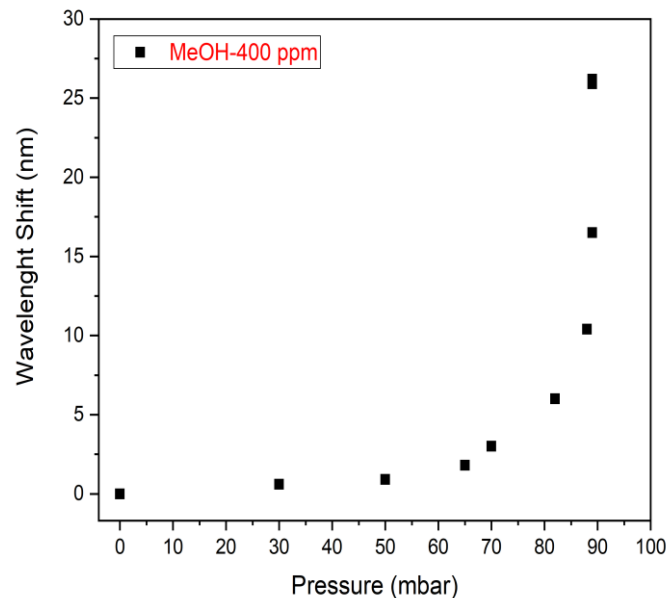


Διάγραμμα 12: Μετατόπιση φάσματος αυξανόμενης της πίεσης ατμών από εξάτμιση 200 μL μεθανόλης.



Διάγραμμα 13: Μεταβολή πίεσης εντός θαλάμου για έγχυση 200 μL μεθανόλης.

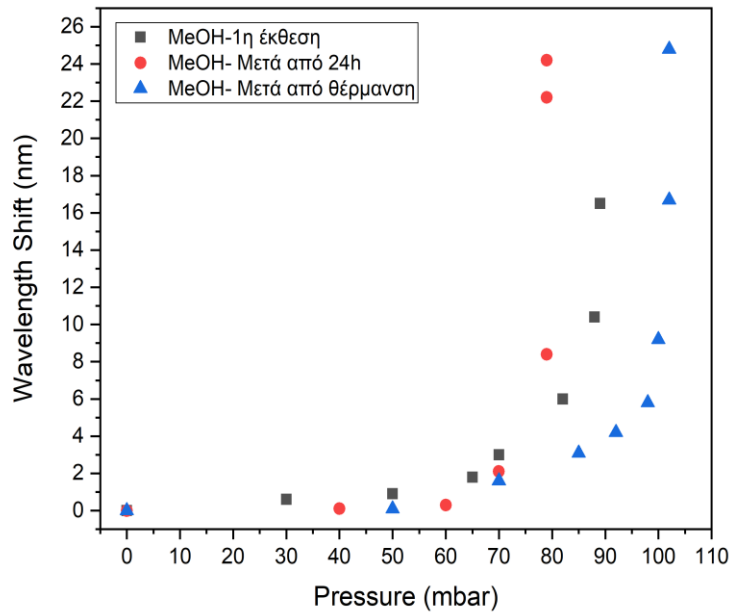
Παρατηρείτε συνεχής μετατόπιση του φάσματος προς μεγαλύτερα μήκη κύματος όχι μόνο για το χρονικό διάστημα όπου η πίεση αυξάνετε, αλλά και αφού έχει κορεσθεί. Η συνολική μετατόπιση για το χρονικό περιθώριο των 35 λεπτών που εξελίχθηκε η μέτρηση είναι 26 nm όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 14.



Διάγραμμα 14: Μετατόπιση μήκους κύματος για έκθεση του αισθητήρα σε 200 μL μεθανόλης.

Στη συνέχεια, έγινε επαναληπτική έκθεση του αισθητήρα σε 200 μL μεθανόλης και διαπιστώθηκε απόκλιση της συμπεριφοράς από τα προηγούμενα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό, πιθανόν οφείλεται στη γεωμετρία και στο μέγεθος της κοιλότητας. Στον υπό μελέτη αισθητήρα, η κοιλότητα έχει μεγάλες διαστάσεις πάχους και μήκους και κατά συνέπεια,, αδυνατεί να αποβάλλει σε μικρό χρονικό διάστημα τα μόρια της αλκοόλης που έχουν απορροφηθεί σε μια τόσο ογκώδη επιφάνεια. Προκειμένου ο αισθητήρας να μπορέσει να επαναχρησιμοποιηθεί, είτε πρέπει να περιμένουμε για ένα χρονικό διάστημα κάποιων ωρών ώστε να εξατμιστούν τα μόρια της αλκοόλης από την κοιλότητα είτε, να τον θερμάνουμε για να επιταχύνουμε την διαδικασία της εξάτμισης. Εν ολίγης, ένας αισθητήρας που διαθέτει τέτοια κοιλότητα δεν μπορεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση απευθείας.

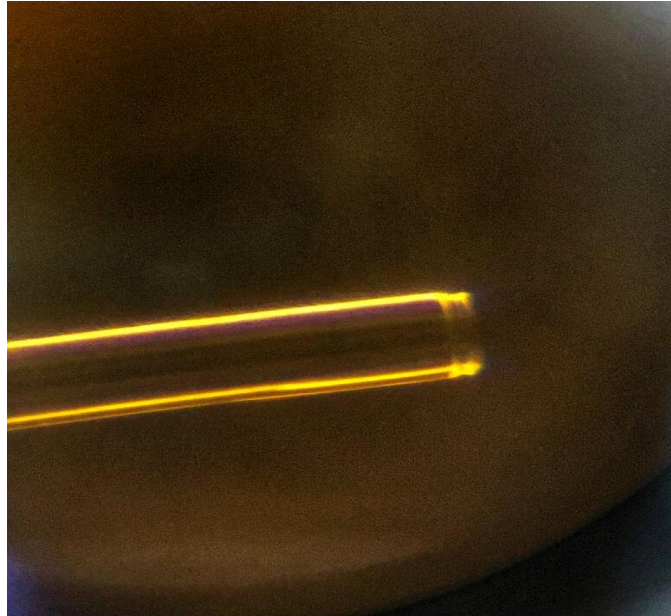
Πραγματοποιήθηκαν και οι δύο προαναφερόμενες διαδικασίες και μελετήθηκε η συμπεριφορά του αισθητήρα ύστερα από αναμονή μιας ημέρας από την τελευταία έκθεση και έπειτα από θέρμανση στους 90 ° C για 15 λεπτά. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Διάγραμμα 15. Η απόκριση του αισθητήρα στην παρουσία ατμών επανέρχεται, και στις 3 μετρήσεις υπάρχει μετατόπιση κατά 25 nm περίπου.



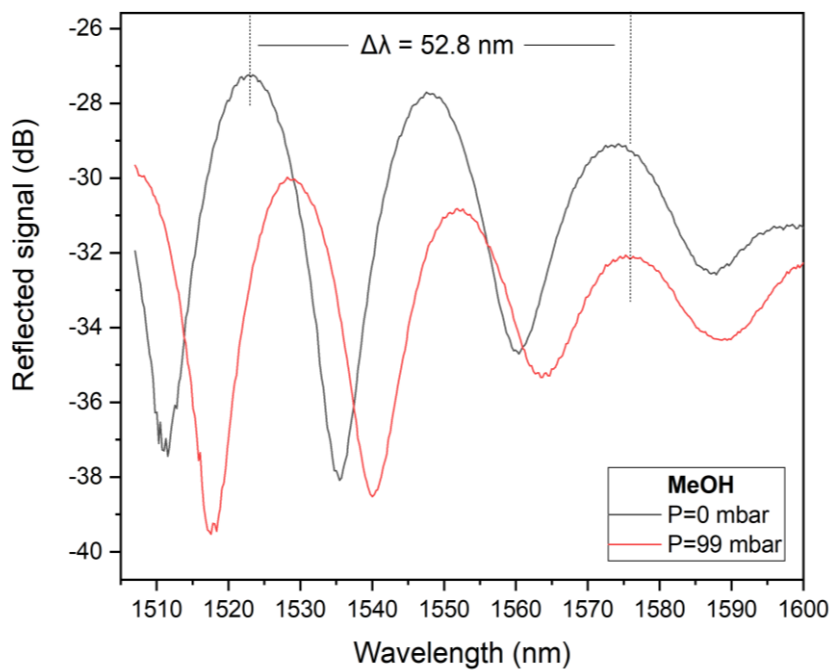
Διάγραμμα 15: Μετατόπιση μήκους κύματος για την πρώτη έκθεση του αισθητήρα, για έκθεση μετά από αναμονή 24 ωρών και έκθεση μετά από θέρμανση.

Στη συνέχεια της μελέτης, κατασκευάστηκαν κοιλότητες πιο μικρών διαστάσεων οι οποίες δεν εξείχαν από τα περιθώρια της διαμέτρου της ίνας. Ένας τέτοιος αισθητήρας φαίνεται στην Εικόνα 38

Με την χρήση ενός δεύτερου αισθητήρα μελετήθηκε το σημείο κορεσμού της μετατόπισης του μήκους κύματος καθώς και της πίεσης για τις 3 αλκοόλες. Ο αισθητήρας έχει FSR=24 nm και μήκος κοιλότητας 32 μm . Όπως και στις πρώτες μετρήσεις εναποθέσαμε εντός του θαλάμου 200 μL (400 ppm) της εκάστοτε αλκοόλης. Τα αποτελέσματα έδειξαν μετατόπιση του φάσματος προς μεγαλύτερα μήκη κύματος όπως και στον πρώτο αισθητήρα. Στο Διάγραμμα 16 απεικονίζεται το φάσμα για μηδενική πίεση ατμών μεθανόλης καθώς και για κορεσμένη πίεση στα 99 mbar.

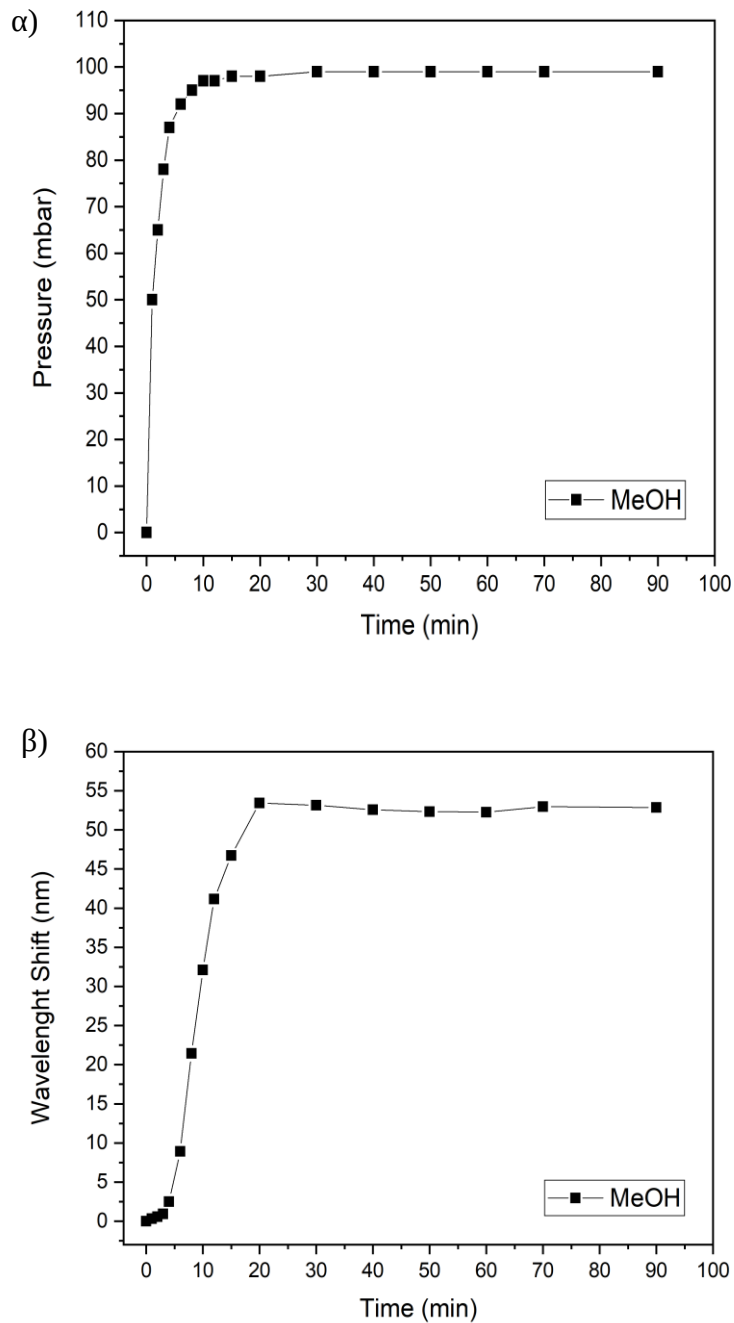


Εικόνα 38: Αισθητήρας με κοιλότητα F-P μήκους 30 μm



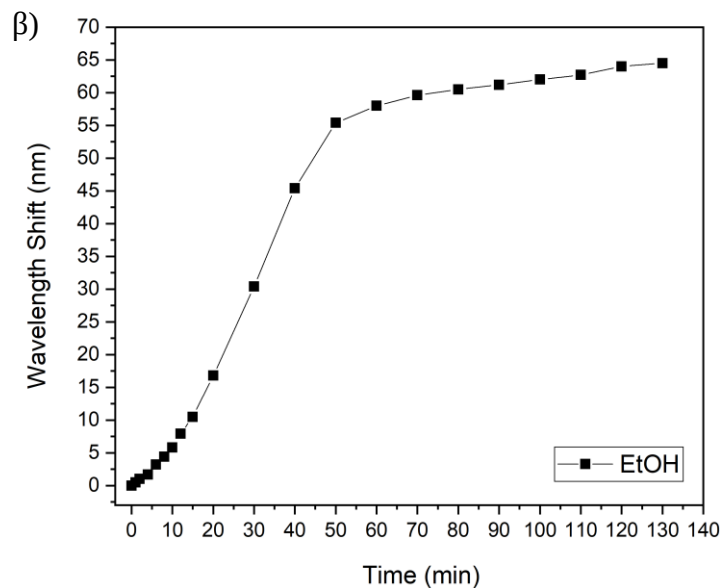
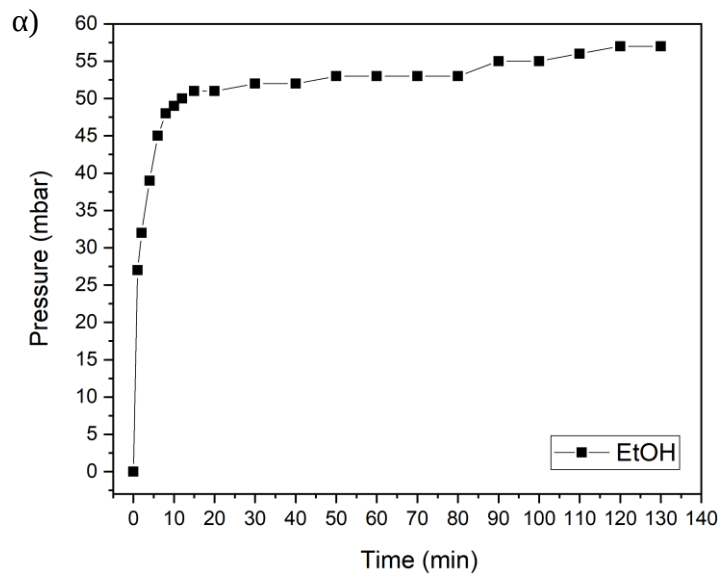
Διάγραμμα 16: Μετατόπιση φάσματος για έκθεση του αισθητήρα σε μεθανόλη

Τα αποτελέσματα για τους ατμούς μεθανόλης παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 17. Γίνεται αντιληπτό ότι στα πρώτα 20-30 λεπτά, έχουμε κορεσμό τόσο της πίεσης όσο και του μήκους κύματος, φτάνοντας σε μια μέγιστη μετατόπιση των 52.8 nm με πίεση κορεσμού τα 99 mbar .



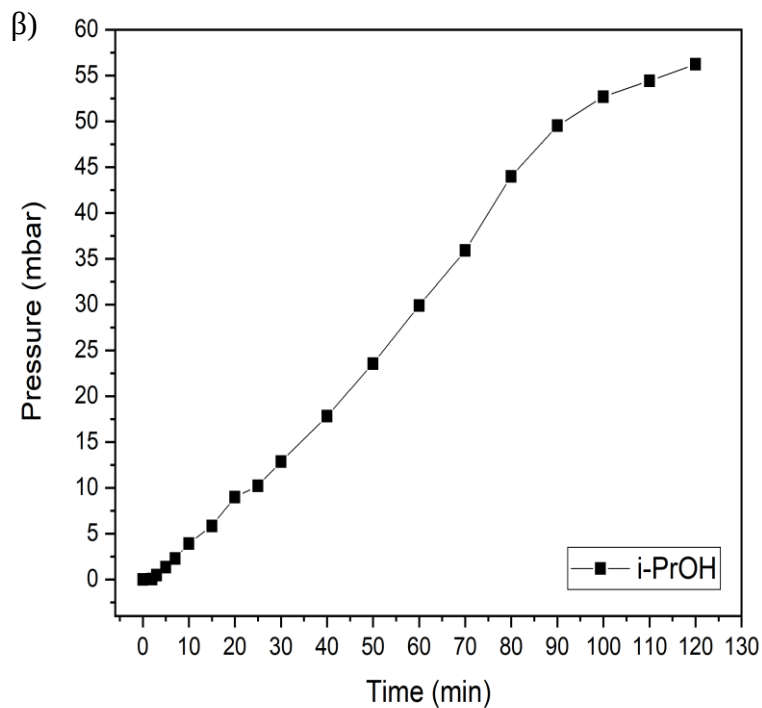
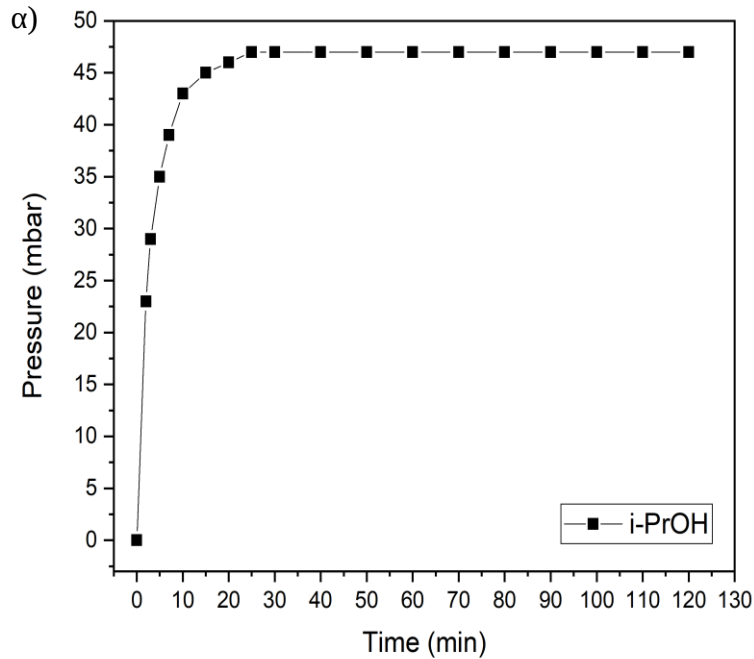
Διάγραμμα 17: α) Μεταβολή πίεσης για 200 μ L μεθανόλης. β) Απόκριση του αισθητήρα.

Αντίστοιχα για την αιθανόλη (Διαγράμματα 18), παρατηρείται ότι ο κορεσμός της μετατόπιση του μήκους κύματος αργεί να επέλθει σε σύγκριση με την μεθανόλη. Σε διάστημα 2 ωρών, η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 64.5 nm και η πίεση κορεσμού 57 mbar.



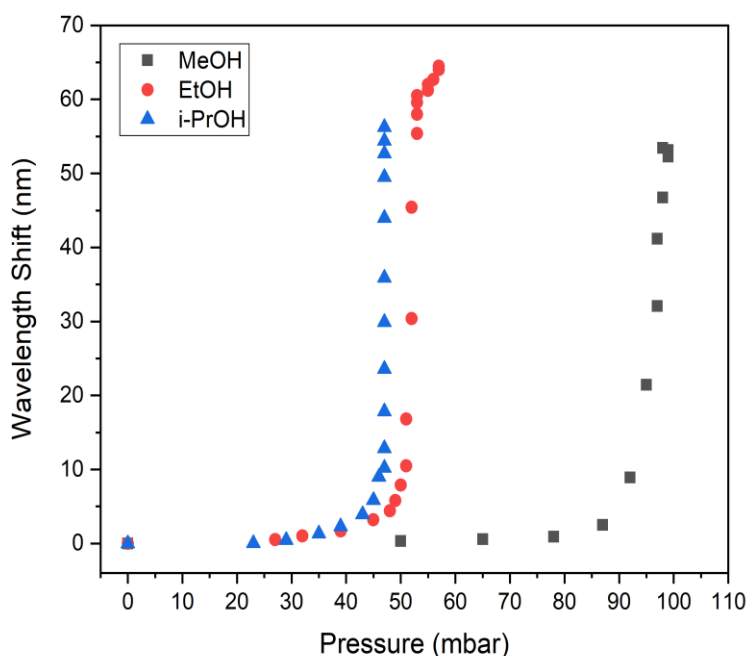
Διάγραμμα 18: α) Μεταβολή πίεσης για 200 μ L αιθανόλης. β) Απόκριση του αισθητήρα.

Τέλος, για την ισοπροπανόλη οι μετρήσεις (Διαγράμματα 19) δείχνουν πως παρά τον κορεσμό της πίεσης στα πρώτα 20 λεπτά, το μήκος κύματος παρουσιάζει αύξουσα μετατόπιση για 120 λεπτά, περίπου, με τελική μετατόπιση τα 56.2 nm και πίεση κορεσμού 47 mbar.



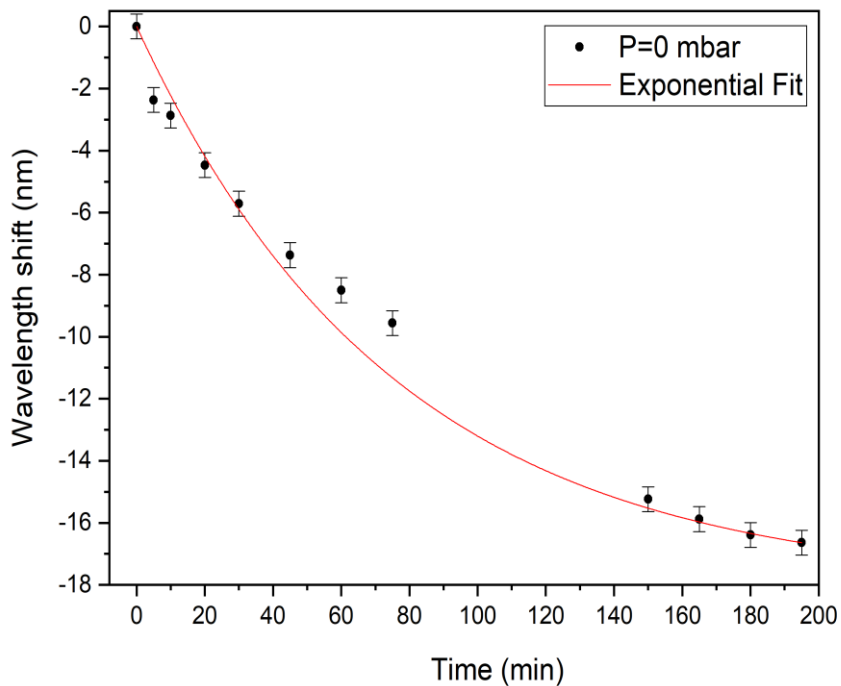
Διάγραμμα 19: α) Μεταβολή πίεσης για 200 μ L ισοπροπανόλης. β) Απόκριση του αισθητήρα.

Οι μετατοπίσεις του μήκους κύματος καθώς και οι αντίστοιχες πιέσεις για τις εκθέσεις του αισθητήρα στις αντίστοιχες αλκοόλες φαίνονται συνοπτικά στο Διάγραμμα 20. Προκύπτει ότι με τους ατμούς αιθανόλης το φάσμα μετατοπίζεται περισσότερο σε σχέση με τις άλλες δύο αλκοόλες ακολουθεί η ισοπροπανόλη και τέλος η μεθανόλη με την μικρότερη μετατόπιση. Επιπλέον, από τα Διαγράμματα 17, 18 και 19 παρατηρείται διαφορετικός χρόνος κορεσμού της μετατόπισης του μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, 20 λεπτά, 100 λεπτά και 120 λεπτά για μεθανόλη, αιθανόλη και ισοπροπανόλη αντίστοιχα. Αυτές οι 3 αλκοόλες έχουν διαφορετικές χημικές δομές και κατά συνέπεια διαφορετικές ιδιότητες. Η ισοπροπανόλη είναι μεγαλύτερο μόριο από την αιθανόλη το οποίο είναι μεγαλύτερο από την μεθανόλη. Η μοριακή τους μάζα είναι 60, 46 και 32 amu αντίστοιχα. Επιπρόσθετα παρουσιάζουν διαφορές στο δείκτη διάθλασης με την ισοπροπανόλη να έχει το μικρότερο, ακολουθεί η αιθανόλη και τέλος η μεθανόλη. Επιπλέον, διαφέρουν ως προς την δομή (διακλαδισμένη, γραμμική), το μήκος των δεσμών και την ικανότητα τους ως διαλύτες. Όλα τα παραπάνω πιθανό οφείλονται για τις διαφορετικές αποκρίσεις στις αντίστοιχες αλκοόλες καθώς απορροφώνται από την κοιλότητα με διαφορετικό ρυθμό.



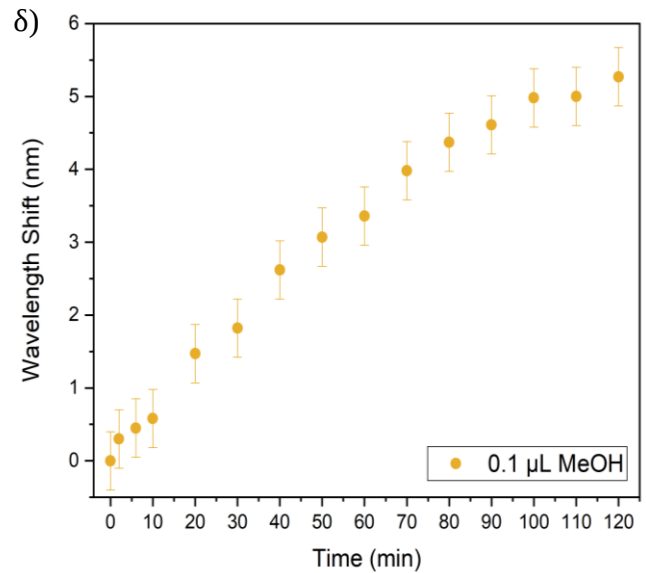
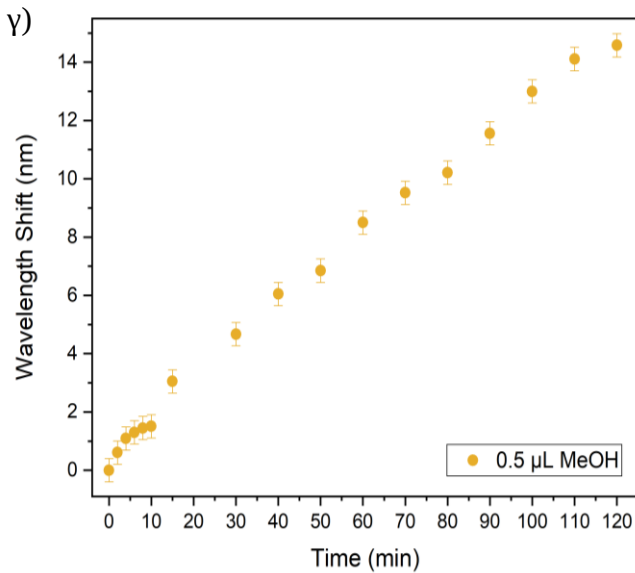
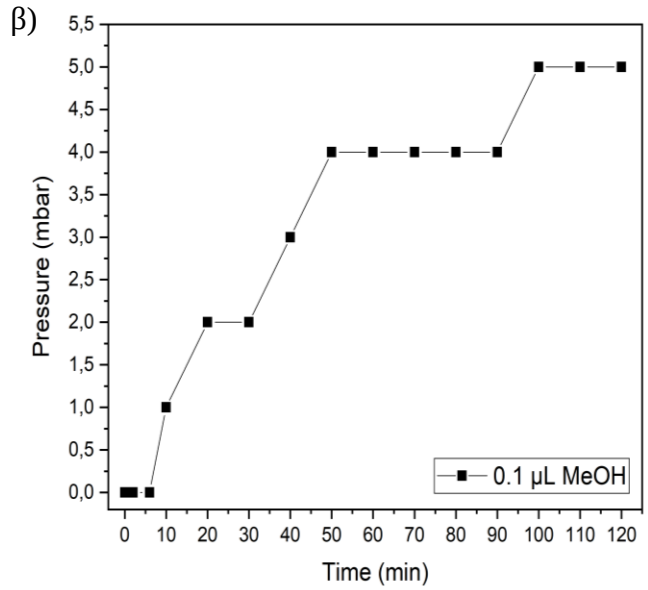
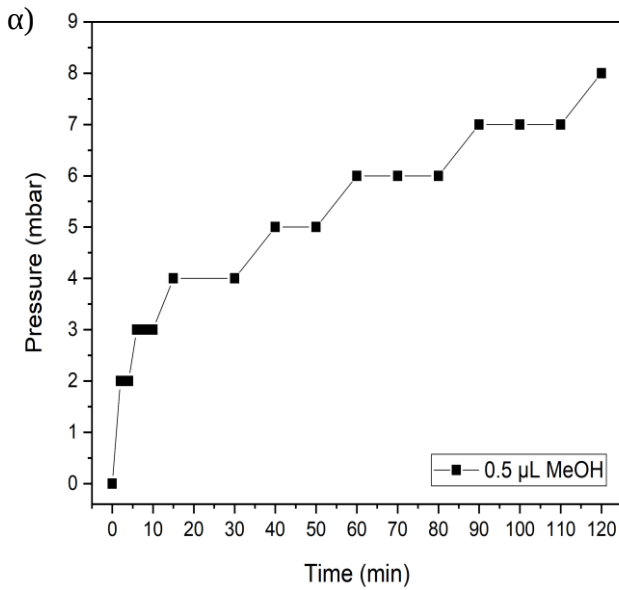
Διάγραμμα 20: Συνολικά αποτελέσματα μετατόπισης μήκους κύματος για έκθεση σε μεθανόλη, αιθανόλη και ισοπροπανόλη.

Προκειμένου να ελέγξουμε αν ο αισθητήρας επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, ανοίγουμε το θάλαμο ώστε να διαρρεύσουν οι ατμοί της αλκοόλης στο εξωτερικό περιβάλλον και να μηδενιστεί η πίεση εντός του. Έπειτα, καταγράφουμε το φάσμα ανά κάποια λεπτά για διάστημα τριών ωρών. Τα αποτελέσματα για την περίπτωση της μεθανόλης φαίνονται στο Διάγραμμα 21. Το μήκος κύματος παρουσιάζει εκθετική μείωση που χαρακτηρίζεται από μεγάλο χρόνο ημιζωής λόγω της αργής διάχυσης των μορίων αλκοόλης από την ρητίνη στο περιβάλλον. Στις 3 ώρες το φάσμα έχει μετατοπιστεί προς το υπεριώδες κατά 18 nm.



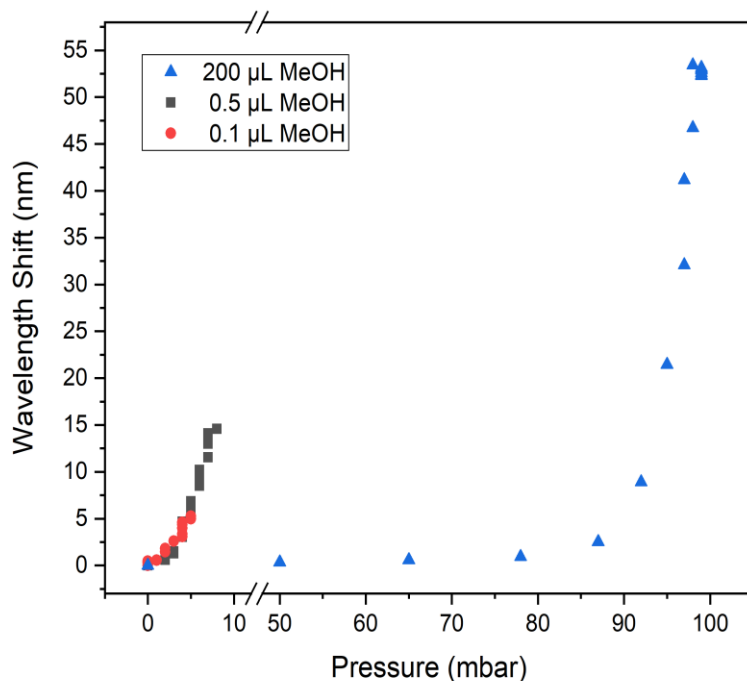
Διάγραμμα 21: Μετατόπιση μήκους κύματος του αισθητήρα κατά την επιστροφή του σε περιβάλλον απουσίας ατμών πτητικών ενώσεων.

Τέλος, δοκιμάστηκε το όριο ανίχνευσης του αισθητήρα, δηλαδή η μικρότερη ποσότητα που μπορεί να ανιχνευτεί. Έγιναν μετρήσεις για 0,5 μL και 0,1 μL μεθανόλης και παρατηρείται μετατόπιση του μήκους κύματος. Τα 0,1 μL σε θάλαμο χωρητικότητας 0,5 L ισοδυναμούν με 200 ppb (parts per billion). Άρα, ο αισθητήρας έχει την δυνατότητα να ανιχνεύει πολύ μικρές ποσότητες αλκοολών (Διαγράμματα 22).



Διάγραμμα 22: α,β) Μεταβολή της πίεσης ατμών για 0,5 και 0,1 μL μεθανόλης αντίστοιχα.
 γ,δ) Μετατόπιση του μήκους κύματος υπό την έκθεση σε 0,5 και 0,1 μL μεθανόλης αντίστοιχα.

Στο Διάγραμμα 23 και στο Πίνακα 5 συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τον αισθητήρα που εκτέθηκε σε διαφορετικές ποσότητες μεθανόλης.



Διάγραμμα 25: Απόκριση του αισθητήρα σε 3 διαφορετικές ποσότητες μεθανόλης.

| Ποσότητα μεθανόλης (ppm) | Wavelength Shift (nm) |
|--------------------------|-----------------------|
| 400 | 52.86 |
| 1 | 14.58 |
| 0.2 | 5.27 |

Πίνακας 5: Τελική μετατόπιση μήκους κύματος για 3 διαφορετικές ποσότητες μεθανόλης, 400, 1 και 0.2 ppm αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 5^ο

Συζήτηση αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναπτυχθήκαν και μελετήθηκαν δυο αισθητήρες οπτικών ινών για ανίχνευση ατμών αμμωνίας και αλκοολών (μεθανόλη, αιθανόλη, ισοπροπανόλη) αντίστοιχα. Ο αισθητήρας αμμωνίας βασίζεται σε υπογωνία φράγμα περίθλασης Bragg οπτική ίνας με επικάλυψη φθοριούχου γραφενίου. Κατά την έκθεση του σε περιβάλλον ατμών υδατικής αμμωνίας παρουσίασαν μετατόπιση τόσο οι συντονισμοί των τρόπων μετάδοσης του περιβλήματος όσο και εκείνοι του πυρήνα. Το γεγονός αυτό πιθανό οφείλεται σε αλλαγές των δομικών και οπτικών χαρακτηριστικών του γραφενίου. Επιπλέον, αποδείχθηκε από τα αποτελέσματα ότι προσθήκη προσμίξεων φθορίου στο επίστρωμα γραφενίου αυξάνει την ευαισθησία του αισθητήρα. Τέλος, βασικό στοιχείο αποτελεί και το γεγονός ότι η απόκριση του αισθητήρα εξαρτάται από την αρχική κατάσταση μηχανικής τάσης της ίνας καθώς ίνες που τοποθετήθηκαν στο θάλαμο καμπυλωμένες έδειξαν μηδενική ευαισθησία.

Για την περίπτωση των πτητικών οργανικών ενώσεων και συγκεκριμένα των αλκοολών, ο αισθητήρας αποτελείται από μια κοιλότητα φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης στο άκρο μονότροπης ίνας, δημιουργώντας έτσι ένα συμβολόμετρο Fabry-Pérot. Ο αισθητήρας έχει ευαισθησία και στις 3 αλκοόλες που εξετάστηκαν συγκεκριμένα μεθανόλη, αιθανόλη και ισοπροπανόλη. Καταγράφηκε διαφορετική μεταβολή μήκους κύματος για κάθε μια από τις αλκοόλες που εξετάστηκαν καθώς και σημαντικές διαφορές στο χρόνο απόκρισης σε κάθε περίπτωση. Η μετρούμενη μετατόπιση του μήκους κύματος εξαρτάται από τη μέγεθος και τη γεωμετρία της κοιλότητας και την ποσότητα της ρητίνης. Σημαντικό αποτέλεσμα αποτελεί η δυνατότητα ανίχνευσης πολύ χαμηλών συγκεντρώσεων τάξεως 200 ppb και χαμηλότερα. Επιπρόσθετα, οι αισθητήρες μπορούν να επιστρέψουν στην προ-εκτιθέμενη κατάσταση τους ύστερα από ένα διάστημα κάποιων ωρών ή παρεμβαίνοντας εξωτερικά με το να τους θερμάνουμε.

Μελλοντικές μελέτες μπορούν να συνεχιστούν και στις δύο περιπτώσεις αισθητήρων. Αρχικά, για τους αισθητήρες αμμωνίας επιπλέον μετρήσεις θα βοηθούσαν στην κατανόηση των φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν κατά την έκθεση του αισθητήρα σε περιβάλλον ατμών αμμωνίας και μετά από αυτή. Σημαντική θα ήταν και η εξέταση της δομής του στρώματος που εναποτίθενται στην ίνα. Επιπλέον, θα μπορούσαν να γίνουν δοκιμές για διαφορετικές προσμίξεις, διαφορετικά ποσοστά αμμωνίας στο διάλυμα καθώς και έκθεση σε αέρια αμμωνία. Όσο αφορά τους αισθητήρες με κοιλότητες F-P είναι σημαντικό να διερευνηθεί η ευαισθησία στη κάθε αλκοόλη καθώς και πως επηρεάζει το μέγεθός και η γεωμετρία της κοιλότητας την απόκριση του αισθητήρα.

Αναφορές

- [1] Agrawal, G. P. “Optical Communication: Its History and Recent Progress.” Essay. In *Optics in Our Time*, 177–99. Cham, Switzerland: Springer Open, 2016.
- [2] Kadhum Hisham, Hisham. “Optical Fiber Sensing Technology: Basics, Classifications and Applications.” *American Journal of Remote Sensing* 6, no. 1 (February 27, 2018): 1–5.
- [3] Admin. “Applications and Advances of Fiber Optic Sensors,” March 20, 2015.
- [4] Xiangyang, Li. “Fiber-Optical Sensors: Basics and Applications in Multiphase Reactors ,” September 13, 2012.
- [5] Sabri, Naseer, S A Aljunid, M S Salim, R B Ahmad, and R Kamaruddin. “Toward Optical Sensors: Review and Applications.” *Journal of Physics: Conference Series* 423 (2013).
- [6] Othonos, Andreas. “Fiber Bragg Gratings.” *Review of Scientific Instruments* 68, no. 12, (June 4, 1998): 4309–41.
- [7] Wang, Yonghong, Xueying Liu, Mingyi Zhang, Xiaoyu Bai, and Ben Mou. “Fiber Bragg Grating Sensors for Pile Jacking Monitoring in Clay Soil.” *Sensors* 20, no. 18 (2020): 3.
- [8] J. Gouveia, Carlos A., Jose M., and Pedro A.S. “Refractometric Optical Fiber Platforms for Label Free Sensing.” *Current Developments in Optical Fiber Technology*, 2013, 351.
- [9] Hirsch, Marzena, Daria Majchrowicz, Paweł Wierzba, Matthieu Weber, Mikhael Bechelany, and Małgorzata Jędrzejewska-Szczerska. “Low-Coherence Interferometric Fiber-Optic Sensors with Potential Applications as Biosensors.” *Sensors* 17, no. 2 (2017): 3.
- [10] “Optical Fiber Cable 光学纤维网络线.” Jan Ho 的网络世界, August 11, 2021. <https://www.jannet.hk/optical-fiber-cable-zh-hans/>.
- [11] Paschotta, Rüdiger. “Fibers.” In *RP Photonics Encyclopedia*, n.d.

- [12] Larry. “Step-Index Multimode Fiber vs Graded-Index Multimode Fiber.” Web log. *FS Community Media Library* (blog), April 12, 2021.
- [13] “Optical Fiber and Optical Fiber Classification.” Sopto. Accessed February 13, 2023.
- [14] “Ολική Ανάκλαση.” In *Wikipedia*, n.d.
- [15] “What Are Optical Glass Fibers?” A pioneer in the field of optical glass, SUMITA Optical Glass, n.d. Accessed February 15, 2023.
- [16] “Fiber Optics: Understanding the Basics.” Photonics Media, July 1, 2015.
- [17] “Optical Fiber Loss and Attenuation.” Fosco Connect, n.d.
- [18] Clesca, Bertrand. “Fiber Loss.” *OpticalCloudInfra*, April 26, 2017.
- [19] “Technologies – B-Sens.” B, n.d. Accessed February 14, 2023.
- [20] Erdogan, T. “Fiber Grating Spectra.” *Journal of Lightwave Technology* 15, no. 8 (1997): 1277–94.
- [21] M., Marcelo, Regina C. B. Allil, Bessie A., and Fbio V. de Nazar. “A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors.” *Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings*, 2013.
- [22] Albert, Jacques, Li-Yang Shao, and Christophe Caucheteur. “Tilted Fiber Bragg Grating Sensors.” *Laser & Photonics Reviews* 7, no. 1 (2012): 83–108.
- [23] Guo, Tuan, Fu Liu, Bai-Ou Guan, and Jacques Albert. “Tilted Fiber Grating Mechanical and Biochemical Sensors.” *Optics & Laser Technology* 78 (2016): 19–33.
- [24] Ρακιτζής, Πέτρος. “Εργαστήριο Φυσικής ΙΙΙ-Οπτική.” Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φυσικής.
- [25] Silvestri, Sergio, and Emiliano Sche. “Optical-Fiber Measurement Systems for Medical Applications.” *Optoelectronics - Devices and Applications*, 2011, 206.

- [26] Oliveira, Ricardo, Lúcia Billo, and Rogério Nogueira. “Fabry-Pérot Cavities Based on Photopolymerizable Resins for Sensing Applications.” *Optical Materials Express* 8, no. 8 (2018): 2208.
- [27] Bhorkar, Kapil, Nikolaos Samartzis, Michail Athanasiou, Labrini Sygellou, Nikos Boukos, Vassilios Dracopoulos, Theophilos Ioannides, and Spyros N. Yannopoulos. “Laser-Assisted Explosive Synthesis and Transfer of Turbostratic Graphene-Related Materials for Energy Conversion Applications.” *npj 2D Materials and Applications* 6, no. 1 (2022).
- [28] Cooper, Daniel R., Benjamin D’Anjou, and Nageswara Ghattamaneni. “Experimental Review of Graphene.” *ISRN Condensed Matter Physics* 2012 (2012): 1–56.
- [29] Zhu, Yanwu, Shanthi Murali, and Weiwei Cai. “Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications.” *Advanced Materials* 22, no. 35 (2010): 3906–24.
- [30] Sysoev, Vitalii I., Alexander V. Okotrub, Igor P. Asanov, Pavel N. Gevko, and Lyubov G. Bulusheva. “Advantage of Graphene Fluorination Instead of Oxygenation for Restorable Adsorption of Gaseous Ammonia and Nitrogen Dioxide.” *Carbon* 118 (2017): 225–32.
- [31] NOA65. Accessed February 14, 2023.
<https://www.norlandprod.com/adhesives/noa%2065.html>.
- [32] Na, Wonjoo, Jungwon Kim, Yun Ki Kim, Sung Gun Kim, and Jyongsik Jang. “Fluorination of Shape-Controlled Porous Carbon Nanoweb Layers for Ammonia Gas Sensor Applications.” *Carbon* 165 (2020): 185–95.