



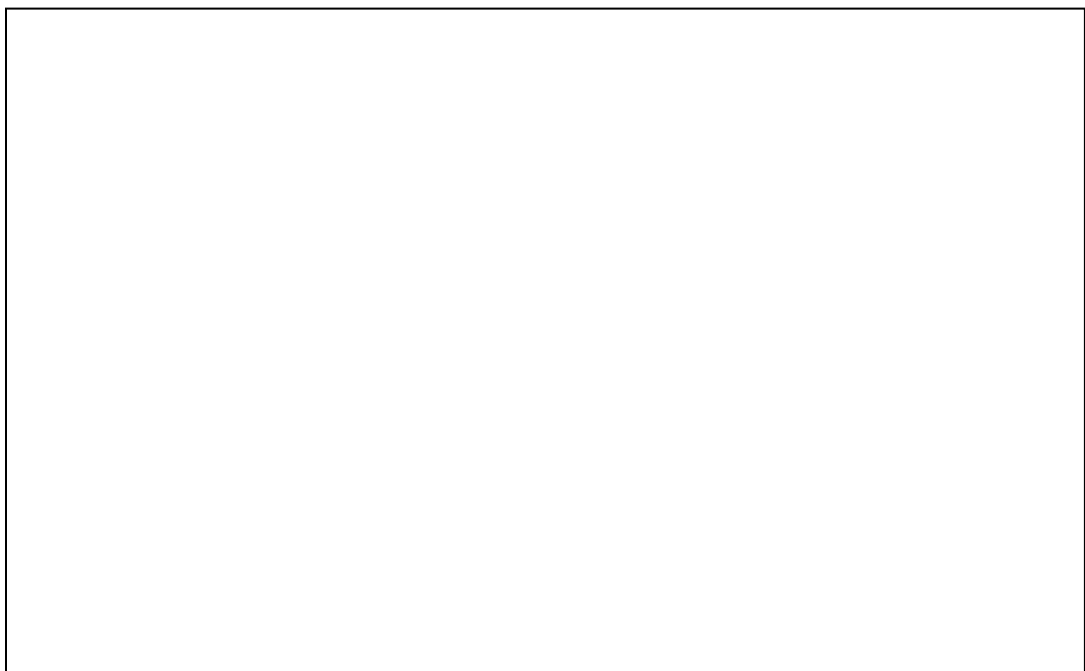
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **Διπλωματική Εργασία**

**Εγγραφή, Χαρακτηρισμός και Εφαρμογή Αισθητήρων FBG στον Έλεγχο  
Δομικών Στοιχείων**



**Φοιτητής: Καβιέρης Αντώνιος  
ΑΜ: 503262017114**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Νικόλαος Σταθόπουλος  
Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ (2023)**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**Inscription, Characterization and the Application of FBG Sensors in Structural Health Monitoring**



**Student: Kavieris Antonios**  
**Registration Number: 503262017114**

**Supervisor**

**Nikolaos Stathopoulos**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, JULY (2023)**



Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Καβιέρης Αντώνιος, Ιούνιος, 2023

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καβιέρης Αντώνιος του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 503262017114 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 11/7/2024 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

(Καβιέρης Αντώνιος)

Καβιέρης Αντώνιος

AB

(Υπογραφή φοιτητή)

Αφιερώνω αυτή την παρούσα Διπλωματική Εργασία στην οικογένειά μου, που με στήριξε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου σπουδών.

Ιδιαίτερος, όμως, θα ήθελα να μνημονεύσω την γιαγιά μου, την οποία έχασα κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου, η οποία παρόλο που δεν πρόλαβε να δει την ολοκλήρωση των προσπαθειών μου, πλην όμως πιστεύω ατράνταχτα ότι θα είναι πολύ υπερήφανη για αυτήν την επιτυχία μου σε αυτή τη φάση της ζωής μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Σταθόπουλο Νικόλαο, ο οποίος ως επιβλέπων με στήριξε με την απαραίτητη καθοδήγηση, προκειμένου να περατώσω την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Ο κ. Σταθόπουλος Νικόλαος ήταν ο αρχικός εμπνευστής αυτής της Διπλωματικής Εργασίας και μου έδωσε το ακαδημαϊκό βήμα να συγγράψω και να ολοκληρώσω επιτυχώς την παρούσα έρευνα.

## Περίληψη

Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας έγινε η ανασκόπηση των αρχών λειτουργίας, των δομών των αισθητήρων οπτικών ινών, των χαρακτηριστικών στοιχείων (μεταβολή μήκους κύματος, ανακλαστικότητα) των αισθητήρων FBG καθώς και των εφαρμογών τους στη μέτρηση της μηχανικής καταπόνησης βασικών δομικών στοιχείων.

Συγκεκριμένα, έγινε πειραματική εγγραφή δύο FBG, σε διαφορετικό μήκος κύματος, μέσω της τεχνικής phase mask. Μετρήθηκαν τόσο η ανακλαστικότητα όσο και το κεντρικό μήκος κύματος των εν λόγω εξεταζόμενων αισθητήρων, και εξήχθησαν αντίστοιχα συγκριτικά συμπεράσματα. Επιπλέον αξιολογήθηκαν οι εργαστηριακές διατάξεις μέτρησης των FBG οι οποίες είναι διαθέσιμες στο εργαστήριο και συγκεκριμένα μέσω του σταθερού φασματικού αναλυτή του εργαστηρίου και ενός ακόμη φορητού ο οποίος είναι διαθέσιμος για την εξωτερική αξιολόγηση αισθητήρων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε διάφορες εφαρμογές εκτός εργαστηρίου.

Επιπλέον, υλοποιήθηκε στο εργαστήριο η ένωση (κόλληση) δύο οπτικών ινών, οι οποίες έφεραν πάνω τους δύο διαφορετικά FBG, εκ των οποίων το ένα χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση ενός μικρομέτρου, ενώ το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση. Ο βασικός σκοπός της βαθμονόμησης ήταν η μελέτη της μεταβολής του μήκους κύματος όταν επιμηκύνεται το αισθητήριο μέσω ενός μικρομετρικού μηχανισμού, η αξιολόγηση της ακρίβειας της φασματικής μετατόπισης σε σχέση με την ένδειξη του μικρομέτρου και η τελική βαθμονόμηση του μικρομετρικού μηχανισμού μέσω του αισθητηρίου FBG.

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν FBG σε δύο διαφορετικές μεταλλικές ράβδους οι οποίες είχαν τα χαρακτηριστικά ενός προβόλου. Το υλικό και η διατομή των δύο προβόλων ήταν αλουμίνιο με ορθογωνική διατομή και χάλυβας με κυκλική διατομή. Μελετήθηκε πειραματικά η μέτρηση ενός φορτίου στο άκρο του προβόλου και έγινε αξιολόγηση του τρόπου τοποθέτησης καθώς και της γραμμικής συμπεριφοράς του αισθητηρίου.

Ο τελικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο ολοκληρωμένος χαρακτηρισμός των αισθητήρων οι οποίοι αναπτύσσονται στο εργαστήριο, ώστε να είναι εφικτή η τοποθέτησή τους εντός σπλισμένου σκυροδέματος και η αντίστοιχη αξιόπιστη ανίχνευση των φορτίων τα οποία παραλαμβάνει ένα στοιχείο δόμησης του φέροντα οργανισμού ενός πραγματικού κτιρίου.

## Λέξεις – κλειδιά

Αισθητήρες Fiber Bragg Gratings (FBG), Ενόργανη παρακολούθηση κατασκευών (Structural health monitoring)

## **Abstract**

In the context of the Diploma Thesis was reviewed the principles of operation, the structures of optical fiber sensors, the characteristic elements (wavelength change, reflectivity) of FBG sensors as well as their applications in measuring the mechanical stress of basic structural elements.

Specifically, two FBGs were experimentally recorded, at different wavelengths, through the phase mask technique. Both the reflectivity and the central wavelength of the said investigated sensors were measured, and corresponding comparative conclusions were drawn. In addition, the laboratory FBG measurement devices available in the laboratory were evaluated, namely through the fixed spectrum analyzer of the laboratory and another portable one available for the external evaluation of sensors that are placed in various applications outside the laboratory.

In addition, the joining (gluing) of two optical fibers, which carried two different FBGs, was implemented in the laboratory, one of which was used for the calibration of a micrometer, while the second was used for temperature compensation. The main purpose of the calibration was to study the change in wavelength when the sensor is elongated through a micrometer mechanism, to evaluate the accuracy of the spectral shift relative to the micrometer reading, and to finally calibrate the micrometer mechanism through the FBG sensor.

FBGs were then placed on two different metal rods which had the characteristics of a cantilever. The material and cross-section of the two cantilevers were aluminum with a rectangular cross-section and steel with a circular cross-section. The measurement of a load at the end of the cantilever was experimentally studied and the placement method as well as the linear behavior of the sensor were evaluated.

The final purpose of this work was the complete characterization of the sensors that are developed in the laboratory, so that it is possible to place them in reinforced concrete and the corresponding reliable detection of the loads received by a structural element of the load-bearing organism of a real building.

## **Keywords**

Fiber Bragg Grating, Structural health monitoring



## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων.....</b>	<b>10</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>10</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων .....</b>	<b>11</b>
<b>Κατάλογος Γραφημάτων .....</b>	<b>12</b>
<b>Αλφαβητικό Ευρετήριο.....</b>	<b>13</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>14</b>
<b>Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....</b>	<b>14</b>
<b>Σκοπός και στόχοι .....</b>	<b>14</b>
<b>Μεθοδολογία.....</b>	<b>15</b>
<b>Καινοτομία.....</b>	<b>15</b>
<b>Δομή.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Περιγραφή του Τρόπου Λειτουργίας του FBG.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Τρόποι Ανάγνωσης FBG .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 Τεχνικές Εγγραφής FBG .....</b>	<b>19</b>
<b>1.4 Τύποι FBG.....</b>	<b>21</b>
<b>1.5 Εφαρμογές των FBG.....</b>	<b>25</b>
<b>2 Εγγραφή και Ανάγνωση των FBG.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Παρουσίαση των οργάνων και εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Τρόπος Ανάγνωσης των FBG του Πειράματος.....</b>	<b>30</b>
2.2.1 Μέτρηση Ισχύος της BBS με Σταθερό Οπτικό Φασματικό Αναλυτή.....	31
2.2.2 Υπολογισμός Ανακλαστικότητας των ήδη διαθέσιμων FBG.....	33
2.2.3 Μέτρηση Ισχύος της BBS με Φορητό Αναλυτή Φάσματος.....	34
2.2.4 Υπολογισμός ανακλαστικότητας των ήδη διαθέσιμων FBG.....	36
<b>2.3 Εγγραφή FBG Τεχνικής Phase Mask στο Εργαστήριο.....</b>	<b>38</b>
2.3.1 Συγκόλληση των δύο FBG σε σειρά.....	41
<b>2.4 Θεωρητικός και Πειραματικός Υπολογισμός του Ενεργού Δείκτη Διάθλασης .....</b>	<b>44</b>
<b>2.5 Προσομοίωση ανακλαστικότητας ενός FBG .....</b>	<b>49</b>
2.5.1 Προσομοίωση εγγραφής βάσει μετρήσεων.....	50
<b>3 Βαθμονόμηση και Εφαρμογή σε πρόβολο του FBG<sub>4</sub> .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1 Διαδικασία της Βαθμονόμησης.....</b>	<b>53</b>
3.1.1 Λήψη και Επεξεργασία Μετρήσεων.....	54
<b>3.2 Εφαρμογή Αισθητηρίου FBG σε Πρόβολο .....</b>	<b>58</b>
3.2.1 Προετοιμασία .....	61
3.2.2 Τοποθέτηση και Μέτρηση Βάρους στο άκρο Προβόλου .....	63
3.2.3 Υπολογισμός της Διαμήκους Παραμόρφωσης του Προβόλου.....	66
<b>3.3 Τοποθέτηση αισθητηρίου FBG πάνω σε σπλισμό σκυροδέματος.....</b>	<b>69</b>
<b>4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>79</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>80</b>
<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>83</b>
<b>Παράρτημα Β.....</b>	<b>84</b>
<b>Παράρτημα Γ .....</b>	<b>85</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων των δυο φασματικών οπτικών αναλυτών για τα FBG <sub>1</sub> και FBG <sub>2</sub> .....[37]
Πίνακας 2.2	Συγκεντρωτικά ποσοστιαία αποτελέσματα των ανακλαστικότητων για τα FBG <sub>1</sub> και FBG <sub>2</sub> .....[38]
Πίνακας 2.3	Αποτελέσματα των ανακλαστικότητων για τα FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> .....[43]
Πίνακας 2.4	Πίνακας χαρακτηριστικών των FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> σύμφωνα με τον κατασκευαστή.....[46]
Πίνακας 2.5	Πίνακας αποτελεσμάτων του ενεργού δείκτη διάθλασης για τα FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> .....[48]
Πίνακας 2.6	Πίνακας αποτελεσμάτων $L$ και $\Delta n$ και για τα FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> .....[52]
Πίνακας 3.1	Πίνακας μετρήσεων κατά την επιμήκυνση της ίνας.....[57]
Πίνακας 3.2	Πίνακας μετρήσεων της εφαρμογής σε πρόβολο.....[65]
Πίνακας 3.3	Δεδομένα της πειραματικής διάταξης Προβόλου – Βάρους.....[67]
Πίνακας 3.4	Πίνακας μετρήσεων και επιμήκυνσης σύμφωνα με τις μετρήσεις των δύο OSA.....[72]
Πίνακας 3.5	Πίνακας μετρήσεων εφελκυσμού της ίνας σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.....[74]
Πίνακας 3.6	Πίνακας μετρήσεων θλίψης της ίνας σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.....[76]
Πίνακας 3.7	Πίνακας μετρήσεων εύρεσης της δύναμης $F$ που αντιλαμβάνεται το FBG <sub>5</sub> σε εφελκυσμό και θλίψη σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.....[77-78]

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1	Σταθερός Οπτικός Φασματικός Αναλυτής του εργαστηρίου.....[28]
Εικόνα 2.2	Φορητός Οπτικός Φασματικός Αναλυτής (BaySpec).....[28]
Εικόνα 2.3	Πηγή Ευρείας Ζώνης Φάσματος (BBS).....[29]
Εικόνα 2.4	Κυκλοφορητής (Circulator/Coupler).....[29]
Εικόνα 2.5	Απαραίτητα εργαλεία για την συγκόλληση μιας οπτικής ίνας.....[42]
Εικόνα 3.1	Στήριξη Οπτικής Ίνας σε Μικρομετρική διάταξη.....[54]
Εικόνα 3.2	Κόλληση FBG <sub>4</sub> σε Πρόβολο.....[62]
Εικόνα 3.3	Χρήση φορτίου σε πρόβολο για την μελέτη του αισθητηρίου FBG <sub>4</sub> .....[64]
Εικόνα 3.4	Κόλληση FBG <sub>5</sub> σε οπλισμό σκυροδέματος.....[69]
Εικόνα 3.5	Περιστραμμένος 180° οπλισμός σκυροδέματος με το FBG <sub>5</sub> να βλέπει προς τα κάτω.....[75]

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1</b> Εγγραφή του FBG.....	[16]
<a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/d1/Fiber_Bragg_Grating-en.svg/1024px-Fiber_Bragg_Grating-en.svg.png">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/d1/Fiber_Bragg_Grating-en.svg/1024px-Fiber_Bragg_Grating-en.svg.png</a> (10/4/23)	
<b>Σχήμα 1.2</b> Ρυθμιζόμενο Laser Μέτρησης Ισχύος-Μήκους κύματος ([4]).....	[18]
<b>Σχήμα 1.3</b> Απεικόνιση της τομής της μάσκας εγγραφής.....	[19]
<b>Σχήμα 1.4</b> Πορεία Ακτίνας Laser κατά την Εγγραφή του FBG .....	[20]
<b>Σχήμα 1.5</b> Femtosecond Laser Εγγραφή FBG.....	[21]
<a href="https://fbgs.com/wp-content/uploads/2019/03/FSG_image_final-1024x558.png">https://fbgs.com/wp-content/uploads/2019/03/FSG_image_final-1024x558.png</a> (10/4/23)	
<b>Σχήμα 1.6</b> Uniform Bragg Grating .....	[22]
<a href="https://www.researchgate.net/publication/337189055/figure/fig1/AS:824396478414850@1573562845654/Structure-of-uniform-Bragg-grating.jpg">https://www.researchgate.net/publication/337189055/figure/fig1/AS:824396478414850@1573562845654/Structure-of-uniform-Bragg-grating.jpg</a> (10/4/23)	
<b>Σχήμα 1.7</b> Tilted Bragg Grating ([40]).....	[23]
<b>Σχήμα 1.8</b> Chirped Bragg Grating.....	[23]
<a href="https://www.researchgate.net/profile/Ben-Mcmillen/publication/200028072/figure/fig14/AS:305789110636551@1449917213790/4-Structure-of-a-chirped-Bragg-grating-a-Approximation-of-a-linear-chirp-with-stepped.png">https://www.researchgate.net/profile/Ben-Mcmillen/publication/200028072/figure/fig14/AS:305789110636551@1449917213790/4-Structure-of-a-chirped-Bragg-grating-a-Approximation-of-a-linear-chirp-with-stepped.png</a> )(10/4/23)	
<b>Σχήμα 1.9</b> Long Period FBG ([42]).....	[24]
<b>Σχήμα 1.10</b> Phased-Shifted Fiber Bragg Grating.....	[25]
<a href="https://fibergratings.com/wp-content/uploads/2016/06/Phase-shifted-fiber-Bragg-gratings-%CF%80FBGs.png">https://fibergratings.com/wp-content/uploads/2016/06/Phase-shifted-fiber-Bragg-gratings-%CF%80FBGs.png</a> )(10/4/23)	
<b>Σχήμα 2.1</b> Συνδεσμολογία Ανάγνωσης FBG.....	[30]
<b>Σχήμα 2.2</b> Σύνδεση BBS-OSA (Σταθερός).....	[31]
<b>Σχήμα 2.3</b> Συνδεσμολογία BBS-OSA(Φορητός)-PC.....	[34]
<b>Σχήμα 2.4</b> Διάταξη Συνδεσμολογίας BBS-Κυκλοφορητής- Φορητός Οπτικός Αναλυτής (BaySpec) με H/Y.....	[36]
<b>Σχήμα 2.5</b> Συνδεσμολογία FBG – Phase Mask.....	[38]
<b>Σχήμα 2.6</b> Διαστάσεις Μάσκας Φάσης (Phase Mask).....	[39]
<b>Σχήμα 3.1</b> Διάταξη Συνδεσμολογίας Βαθμονόμησης του FBG.....	[54]
<b>Σχήμα 3.2</b> Επιμήκυνση FBG.....	[55]
<b>Σχήμα 3.3</b> Δοκός τύπου προβόλου.....	[58]
<b>Σχήμα 3.4</b> Τοποθέτηση Αισθητήρων Καταπόνησης (Strain Gauges) σε Πρόβολο.....	[59]
<b>Σχήμα 3.5</b> Γραφική παράσταση τάσεως κάμψεως $\sigma_{\chi\chi}$ ως προς την απόσταση $y$ .....	[60]
<b>Σχήμα 3.6</b> Μέτρηση Ροπής Κάμψης σε Πρόβολο με Χρήση Αισθητήρων FBG.....	[66]

## Κατάλογος Γραφημάτων

<b>Γράφημα 2.1</b> Φάσμα Εκπομπής της BBS με σταθερό OSA.....	[31]
<b>Γράφημα 2.2</b> Περιοχή Εγγραφής των FBG <sub>1</sub> και FBG <sub>2</sub> πάνω στην BBS με σταθερό OSA.....	[32]
<b>Γράφημα 2.3</b> Περιοχή εύρους 1nm της BBS γύρω από το FBG <sub>1</sub> και FBG <sub>2</sub> αντίστοιχα με σταθερό OSA.....	[32]
<b>Γράφημα 2.4</b> Φάσμα του FBG <sub>1</sub> με σταθερό OSA.....	[33]
<b>Γράφημα 2.5</b> Φάσμα του FBG <sub>2</sub> με σταθερό OSA.....	[33]
<b>Γράφημα 2.6</b> Φάσμα Εκπομπής της BBS με φορητό OSA.....	[35]
<b>Γράφημα 2.7</b> Περιοχή Εγγραφής των FBG <sub>1</sub> και FBG <sub>2</sub> πάνω στην BBS με φορητό OSA.....	[35]
<b>Γράφημα 2.8</b> Φάσμα του FBG <sub>1</sub> με φορητό OSA.....	[36]
<b>Γράφημα 2.9</b> Φάσμα του FBG <sub>2</sub> με φορητό OSA.....	[37]
<b>Γράφημα 2.10</b> Περιοχή Εγγραφής των FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> πάνω στην BBS με σταθερό OSA.....	[40]
<b>Γράφημα 2.11</b> Φάσμα του FBG <sub>3</sub> με σταθερό OSA.....	[40]
<b>Γράφημα 2.12</b> Φάσμα του FBG <sub>4</sub> με σταθερό OSA.....	[41]
<b>Γράφημα 2.13</b> Η απόκριση των FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> συγκολλημένων σε σειρά με σταθερό OSA.....	[42]
<b>Γράφημα 2.14</b> Η απόκριση των FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> συγκολλημένων σε σειρά με φορητό OSA.....	[43]
<b>Γράφημα 2.15</b> Κανονικοποιημένη Συχνότητα $V$ σε συνάρτηση με τη σταθερά Διάδοσης $b$ .....	[45]
<a href="https://media.cheggcdn.com/media/86d/86dc8555-8630-48d7-9539-f47a1666837e/phpgZLRyo.png">https://media.cheggcdn.com/media/86d/86dc8555-8630-48d7-9539-f47a1666837e/phpgZLRyo.png</a> (10/4/23)	
<b>Γράφημα 2.16</b> Φάσμα αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών μετρήσεων του FBG <sub>3</sub> (Matlab).....	[51]
<b>Γράφημα 2.17</b> Φάσμα αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών μετρήσεων του FBG <sub>4</sub> (Matlab).....	[52]
<b>Γράφημα 3.1</b> Φασματική ανακλαστικότητα του FBG <sub>4</sub> για διάφορες θέσεις του μικρομέτρου.....	[56]
<b>Γράφημα 3.2</b> Γράφημα ευαισθησίας με αντιστοίχιση των ενδείξεων βερνιέρου και την ακριβή επιμήκυνση της ίνας.....	[57]
<b>Γράφημα 3.3</b> Γραφική Απεικόνιση FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> σε κατάσταση Ηρεμίας, από μετρήσεις Σταθερού OSA επί του Προβόλου (χωρίς Φορτίο).....	[62]
<b>Γράφημα 3.4</b> Γραφική απεικόνιση FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> σε κατάσταση ηρεμίας, από μετρήσεις φορητού OSA επί του προβόλου (χωρίς φορτίο).....	[63]
<b>Γράφημα 3.5</b> Γραφική απεικόνιση FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> από μετρήσεις σταθερού OSA επί του προβόλου (με Φορτίο 2,5 Kgr).....	[64]
<b>Γράφημα 3.6</b> Γραφική απεικόνιση FBG <sub>3</sub> και FBG <sub>4</sub> από μετρήσεις φορητού OSA επί του προβόλου (με φορτίο 2,5 Kgr).....	[65]
<b>Γράφημα 3.7</b> Γραφική απεικόνιση FBG <sub>5</sub> σε κατάσταση ηρεμίας από μετρήσεις σταθερού OSA.....	[70]

- Γράφημα 3.8** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> με την εφαρμογή φορτίου 2 Kgr στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.....[71]
- Γράφημα 3.9** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> με εφαρμογή του φορτίου 2Kgr στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του φορητού OSA.....[71]
- Γράφημα 3.10** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> σε κατάσταση εφελκυσμού με εφαρμογή διαφόρων ονομαστικών φορτίων στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.....[74]
- Γράφημα 3.11** Γράφημα ευαισθησίας του FBG<sub>5</sub> σε εφελκυσμό.....[75]
- Γράφημα 3.12** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> σε κατάσταση θλίψης με εφαρμογή διαφόρων ονομαστικών φορτίων στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.....[76]
- Γράφημα 3.13** Γράφημα ευαισθησίας του FBG<sub>5</sub> σε θλίψη.....[77]

### Αλφαβητικό Ευρετήριο

FBG: Fiber Bragg Grating

OSA: Optical Spectrum Analyzer

BBS: Benchtop Broadband Source

APA: American Psychological Association

δ.δ: δείκτης διάθλασης

.....

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία των Fiber Bragg Gratings (FBG) αφορά αισθητήρια οπτικών ινών, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως στις κατασκευές, στην βιομηχανία, στην ιατρική, στο περιβάλλον αλλά και στα δίκτυα οπτικών ινών. Ειδικότερα, στις κατασκευές μετρούν τις μηχανικές παραμορφώσεις εξαιτίας των στατικών αλλά και των δυναμικών φορτίων οπότε είναι κατάλληλα για την συνεχή ενόργανη παρακολούθηση των κτιρίων, των γεφυρών και των εν γένει κατασκευών, είτε από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε από αμιγώς μεταλλικά στοιχεία. Στο περιβάλλον μπορούν να μετρήσουν τη θερμοκρασία την υγρασία αλλά και το pH ενώ στη μορφή των long period gratings και σύσταση του αέρα. Στη βιομηχανία βρίσκουν εφαρμογή σε περιβάλλοντα εκρηκτικά ή εύφλεκτα ή ακόμη και σε περιβάλλοντα όπου είναι δύσκολη η εφαρμογή ηλεκτρικών αισθητήρων λόγω παρεμβολών. Στην Ιατρική υπάρχει μεγάλη προσπάθεια εφαρμογής τους εξαιτίας της ουδέτερης συμπεριφοράς τους με το σώμα και λόγω της βιοσυμβατότητας που εμφανίζουν κυρίως τα FBG τα οποία είναι γραμμένα σε πολυμερείς ίνες POF. Στα δίκτυα επικοινωνιών μέσω οπτικών ινών τα FBG δεν χρησιμοποιούνται ως αισθητήρια αλλά ως οπτικά φίλτρα επιλογής μηκών κύματος και αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των optical add and drop multiplexors (OADM). Στο Εργαστήριο Οπτικών Ινών του τμήματος, υπάρχει ο εξοπλισμός για την ανάπτυξη (εγγραφή) των αισθητήρων αυτών, η ανάγνωσή τους (δηλαδή η μέτρηση της φασματικής ανακλαστικότητάς τους) καθώς και η προσομοίωσή τους μέσω μοντέλων τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο. Η σχεδιάσή τους και η εφαρμογή τους σε διάφορα πεδία της επιστήμης, της τεχνολογίας αλλά και των αναγκών της κοινωνίας μας είναι η δραστηριότητα του εργαστηρίου στο οποίο εκπονήθηκε αυτή η διπλωματική.

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη αισθητήρων FBG χρησιμοποιώντας το λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας και της phase mask του εργαστηρίου, η ανάγνωση και ο χαρακτηρισμός τους καθώς και η εξέταση της εφαρμογής τους στην μέτρηση του φορτίου ενός προβόλου ο οποίος φορτίζεται στο άκρο του. Μετά την εγγραφή των αισθητήρων ακολούθησε η ανάγνωσή τους με δύο φασματικούς αναλυτές (έναν σταθερό και μεγαλύτερης ακρίβειας, και ενός φορητού ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση των αισθητήρων σε εκτός εργαστηρίου εφαρμογές. Επίσης έγινε η προσομοίωση των αισθητήρων ώστε να προσδιορισθεί το βάθος εγγραφής που επιτυγχάνει η διάταξη σε συνδυασμό με τις φωτοευαίσθητες οπτικές ίνες εγγραφής που προμηθεύτηκε το εργαστήριο από το εμπόριο. Εν συνεχεία, έγινε βαθμονόμηση μέσω των FBG μιας διάταξης μικρομετρικής επιμήκυνσης αφού πρώτα αποδείχθηκε πειραματικά ότι η ακρίβεια της μετατόπισης του φάσματος ανακλαστικότητας του αισθητήρα είναι ακριβέστερη από την ανάγνωση του βερνιέρου. Τέλος έγινε τοποθέτηση των αισθητήρων σε μεταλλικές ράβδους σε μορφή προβόλου φορτισμένου στο άκρο του. Μέσω της επιμήκυνσης του αισθητήριου και των σχέσεων που προβλέπουν την επιμήκυνση αυτή εξαιτίας του φορτίου έγινε χαρακτηρισμός του αισθητήρα αλλά και των συνθηκών συγκόλλησης του αισθητήρα στην επιφάνεια του προβόλου. Τα συμπεράσματα από αυτή την διαδικασία έδειξαν την γραμμικότητα και την ακρίβεια μέτρησης του αισθητήρα για την εν λόγω εφαρμογή.

### Σκοπός και στόχοι

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιολόγηση των αισθητήρων που αναπτύσσει το εργαστήριο ώστε να εξετασθεί η ακρίβεια, η γραμμικότητα τους και η ευαισθησία τους σε συγκεκριμένα μηχανικά στοιχεία όπως ο πρόβολος ομοιογενούς μεταλλικής ράβδου φορτισμένης στο άκρο της. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η απόφαση για την πιθανή εφαρμογή τους σε σύνθετα δομικά στοιχεία όπως οι αμφιέρειστοι δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος για κτιριακές κατασκευές.

## Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: Αρχικά έγινε η εγγραφή των αισθητήρων, στη συνέχεια έγινε η μέτρησή τους μέσω του σταθερού φασματικού αναλυτή και αμέσως μετά μέσω του φορητού φασματικού αναλυτή ώστε να εξετασθεί η ακρίβεια μετρήσεων στο πεδίο. Επίσης έγινε η ανάλυση των χαρακτηριστικών μέσω αναλυτικών σχέσεων (εύρεση του κεντρικού μήκους κύματος, υπολογισμός της ανακλαστικότητας και του μήκους εγγραφής καθώς του ενεργού δείκτη διάθλασης του πυρήνα της φωτοευαίσθητης ίνας). Εν συνεχεία, έγινε πειραματική αξιολόγηση της επιμήκυνσης μέσω μικρομέτρου και αποδείχθηκε η αυξημένη ακρίβεια μέσω της φασματικής μετατόπισης οπότε έγινε προφανής η ανάγκη της βαθμονόμησης του μικρομέτρου μέσω του FBG και όχι το αντίθετο.

Κατόπιν, τοποθετήθηκε ένα FBG σε μια αλουμινένια ράβδο ορθογωνικής διατομής, σε μορφή προβόλου με εφαρμογή φορτίου στο άκρο του προβόλου και με σκοπό την σύγκριση μεταξύ του θεωρητικού υπολογισμού του φορτίου και της ονομαστικής τιμής του. Τέλος, ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία για μια χαλύβδινη ράβδο παρόμοια με αυτή των οπλισμών σκυροδέματος με περισσότερα βάρη εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την απόκριση του FBG.

## Καινοτομία

Το μέχρι τώρα εγχείρημα του πειράματος ήταν η χρήση προϋπάρχουσας ώριμης τεχνολογίας στους αισθητήρες FBG, πλην όμως δεν χρησιμοποιήθηκε εκ των προτέρων εγγεγραμμένος αισθητήρας του εμπορίου, αλλά υλοποιήθηκε η εγγραφή αισθητήρα FBG σε ειδική διάταξη στο Εργαστήριο Οπτικών Ινών. Θα ήταν επιστημονικά ενδιαφέρον η τοποθέτηση του κατασκευασθέντα αισθητήρα FBG εντός δοκού οπλισμένου σκυροδέματος ωστόσο έχει γίνει όλη η απαραίτητη προετοιμασία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Οι τρόποι και οι συνθήκες συγκόλλησης οι οποίες επηρεάζουν την σωστή μέτρηση αποτελούν την όποια καινοτομία της εργασίας αυτής.

## Δομή

Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

**Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση των αισθητήρων οπτικών ινών τύπου Fiber Bragg Grating-(FBG) καθώς και οι εφαρμογές τους σε διάφορα πεδία εφαρμογών.

**Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** μελετήθηκε η ακρίβεια των μετρήσεων, που προκύπτουν από το ανακλώμενο κύμα στα FBG, είτε με τη χρήση σταθερού, είτε με φορητού οπτικού αναλυτή. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εγγραφή νέων αισθητήρων FBG, μέσω της διαδικασίας εγγραφής με Phase Mask, εξάγοντας αντίστοιχες μετρήσεις των χαρακτηριστικών των FBG, με σταθερό οπτικό αναλυτή. Επιπλέον, τα δύο FBG συγκολλήθηκαν μεταξύ τους και εξήχθησαν με όμοιο τρόπο αντίστοιχες μετρήσεις των χαρακτηριστικών τους, με σταθερό και με φορητό οπτικό αναλυτή. Έπειτα, υπολογίστηκε ο ενεργός δείκτης διάθλασης των FBG με πειραματικό και θεωρητικό τρόπο μέσω γραφημάτων και χρήσης κώδικα σε Matlab. Τέλος παρουσιάστηκε προσομοίωση των FBG που μελετήθηκαν με χρήση κώδικα σε Matlab.

**Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** μελετήθηκε η επιμήκυνση των FBG, με σκοπό να υπολογιστεί η ευαισθησία του και να δειχθεί η γραμμικότητά του (καθώς πρόκειται για αισθητήρα) σε ένα εύρος επιμηκύνσεων. Επιπλέον, εξετάστηκε η δυνατότητα της τοποθέτησης αυτού ως αισθητήρα σε διάφορες κατασκευές, μέσω του υπολογισμού των αντίστοιχων χαρακτηριστικών του (κεντρικό μήκος κύματος, επιμήκυνση, μετατόπιση, κτλ). Έπειτα μελετήθηκε η συμπεριφορά του FBG, όταν τοποθετείται σε έναν πρόβολο αλουμινίου ορθογωνικής διατομής. Με την πραγματοποίηση υπολογισμού φορτίου στο άκρο του προβόλου μέσω της μέτρησης της επιμήκυνσης του FBG. Τέλος υλοποιήθηκε ακόμη μια εφαρμογή σε πρόβολο οπλισμού σκυροδέματος όπου τοποθετήθηκαν διάφορα βάρη με σκοπό την ανάδειξη της ακρίβειας των μετρήσεων σε εφελκυσμό και θλίψη της ίνας.

## 1. Τεχνολογία Αισθητήρων FBG (Fiber Bragg Grating)

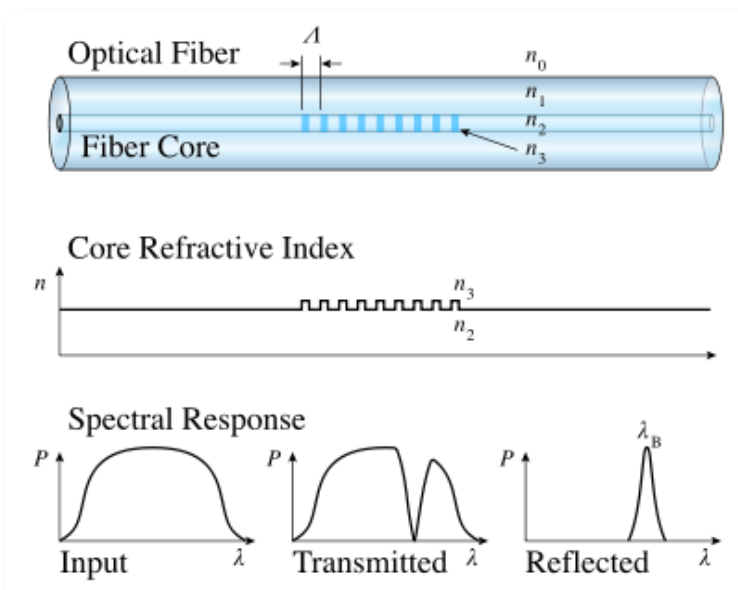
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η τεχνολογία των αισθητήρων οπτικών ινών (*Fibre Bragg Grating-FBG*). Όπως είναι ευρέως γνωστό, τα FBG αποτελούν μία περιοδική διακύμανση του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της ίνας κατά μήκος αυτής και έχουν την ιδιότητα της ανάκλασης του φωτός σε ένα στενό εύρος ζώνης με κεντρικό μήκος κύματος. Πιο συγκεκριμένα, θα περιγράψουν τα γενικά χαρακτηριστικά των FBG, οι τομείς όπου έχουν εφαρμογή, ο τρόπος λειτουργίας και κατασκευής αυτών, καθώς και η δυνατότητα να μετρούν μηχανικές καταπονήσεις και αλλαγές στην θερμοκρασία σε κατασκευές στην βιομηχανία πχ γέφυρες, αεροπλάνα, κ.ά. Η ανάπτυξη των FBG οδήγησε σε μία ευρεία γκάμα διατάξεων των FBG με εφαρμογές στις οπτικές επικοινωνίες και τα συστήματα αισθητήρων [1], [2].

### 1.1 Περιγραφή του Τρόπου Λειτουργίας του FBG

Το FBG (*Fibre Bragg grating*) αποτελεί μία περιοδική διακύμανση του δείκτη διάθλασης  $\Delta n$  (βάθος εγγραφής) κατά μήκος του πυρήνα μιας μονότροπης ίνας. Το FBG έχει την ιδιότητα της ανάκλασης του φωτός σε ένα στενό εύρος ζώνης, του οποίου το κεντρικό μήκος κύματος είναι το  $\lambda_B$ . Οι διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης (δ.δ) σχηματίζονται με έκθεση της ίνας σε υπεριώδη ακτινοβολία UV, διότι το φως έχει χαρακτηριστική ιδιότητα να επάγει μόνιμη αλλαγή στον δ.δ. της ίνας. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται φωτοευαισθησία και ανακαλύφθηκε το 1978 στο Communications Research Centre (CRC) στον Καναδά [3],[6]. Το φαινόμενο της φωτοευαισθησίας είναι συσχετισμένο με ίνες, οι οποίες περιέχουν αυξημένο οξείδιο του γερμανίου, που έχει υδρογονοποιηθεί ώστε να απορροφά την ακτινοβολία UV. Στην πραγματικότητα, τα FBG είναι οπτικοί ανακλαστήρες, οι οποίοι είναι εγγεγραμμένοι σε μικρό τμήμα του πυρήνα μιας μονότροπης οπτικής ίνας, μήκους  $L$  και περιοδικότητας  $\Lambda$  και δ.δ  $\Delta n$ .

Αν για οποιοδήποτε λόγο αυτή η ίνα, όπου είναι εγγεγραμμένο το FBG, τεντωθεί τότε έχουμε μεταβολή της περιοδικότητας  $\Lambda$  κατά  $\Delta\Lambda$ , μεταβολή η οποία θα οδηγήσει συνεπακόλουθα σε μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος κατά  $\lambda_B + \Delta\lambda_B$ . Αυτές οι δύο προαναφερθείσες μεταβολές οδηγούν στο γεγονός της μετατόπισης του φάσματος ανάκλασης. Συνεπώς, είναι δυνατό να παρατηρηθεί η μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος με την διαδικασία ανάγνωσης του FBG στην περίπτωση της επιμήκυνσης της ίνας λόγω μηχανικής καταπόνησης.

Στο ακόλουθο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται ο τρόπος λειτουργίας του FBG (διακρίνεται το φάσμα ανάκλασης και μετάδοσης του φωτός που εισέρχεται στην ίνα).



Σχήμα 1.1: Εγγραφή του FBG

Πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/d1/Fiber\\_Bragg\\_Grating-en.svg/1024px-Fiber\\_Bragg\\_Grating-en.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/thumb/d/d1/Fiber_Bragg_Grating-en.svg/1024px-Fiber_Bragg_Grating-en.svg.png) (10/4/23)



Τα FBG δίδουν μία σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των απλών ηλεκτρικών αισθητήρων. Ορισμένα εξ' αυτών είναι ότι η λειτουργία των FBG είναι παθητική, διότι δεν απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια, τα FBG δεν επηρεάζονται από την έκθεση σε υψηλή τάση ή και σε εύφλεκτα περιβάλλοντα, ενώ μεταξύ άλλων τα FBG δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης σε μία οπτική ίνα, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, περισσότερων του ενός FBG, καθώς και να εξαχθούν μετρήσεις σε σχετικές μακρινές αποστάσεις έως 50 χλμ χωρίς απώλειες, κ.ά. Το κάθε FBG πρέπει να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακλά διαφορετικό μήκος κύματος, προκειμένου ο εκάστοτε αναλυτής να δύναται να το διακρίνει με σαφήνεια [4], [5].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το FBG, με περίοδο ημιτονικής εγγραφής  $\Lambda$ , έχει την ιδιότητα της ανάκλασης του φωτός σε ένα στενό εύρος ζώνης, του οποίου το κεντρικό μήκος κύματος είναι το  $\lambda_B$ . Ο λόγος  $\frac{\lambda_B}{2\Lambda}$  αντιστοιχεί στον ενεργό δείκτη διάθλασης  $n_{eff}$  μιας μονότροπης ίνας, ο οποίος συσχετίζεται με την ιδιότητα της φωτοευσθησίας που εμφανίζουν οι ίνες, όταν βρεθούν κάτω από υπεριώδη ακτινοβολία. Προφανώς, το κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B$ , το οποίο θα ανακλαστεί υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [6]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

Ο τρόπος υπολογισμού του Ενεργού Δείκτη Διάθλασης ( $n_{eff}$ ) θα δειχθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η μελέτη της συμπεριφοράς ενός ομοιόμορφου φράγματος Uniform Bragg Grating (UBG) μπορεί να εξαχθεί με τον πίνακα μεταφοράς (transfer matrix). Η χρήση της μεθόδου T-Matrix από την θεωρία Coupled Mode Theory (CMT) είναι μία τεχνική με τη οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε τι ανακλάται στην είσοδο, καθώς και τι εξέρχεται από την έξοδο του FBG. Στην εργασία [7] περιγράφεται αναλυτικά η προαναφερθείσα είσοδος-έξοδος σε ένα FBG με τον πίνακα μεταφοράς να δίδεται από την ακόλουθη μορφή:

$$T = \begin{bmatrix} \left( \cosh(k'L) - j \frac{\delta}{k'} \sinh(k'L) \right)^* & \left( j \frac{q}{k'} \sinh(k'L) \right)^* \\ \left( j \frac{q}{k'} \sinh(k'L) \right) & \left( \cosh(k'L) - j \frac{\delta}{k'} \sinh(k'L) \right) \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

όπου  $k' = \sqrt{q^2 - \delta^2}$ ,  $\delta = \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda}$ ,  $q = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n$ , συντελεστές σύζευξης και  $L$  το μήκος εγγραφής.

Στην εργασία [7] η ανακλαστικότητα  $r$  (Reflected Coefficient) ενός ομοιόμορφου φράγματος UBG, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$r = \left| \frac{T_{21}}{T_{22}} \right|^2$$

$$r = \left| \frac{j \frac{q}{k'} \sinh(k'L)}{\cosh(k'L) - j \frac{\delta}{k'} \sinh(k'L)} \right|^2 \quad (1.3)$$

Επίσης είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης  $\Delta n$  ενός FBG δεν προκαλείται μόνο από την μηχανική καταπόνηση αλλά και από την αλλαγή στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επομένως, καθώς η αλλαγή στην θερμοκρασία μπορεί να αλλάξει τα δεδομένα των μετρήσεων, η επίδραση της θερμοκρασίας πρέπει να αντισταθμιστεί για να πάρουμε τις πραγματικές τιμές της μηχανικής καταπόνησης. Η αντισταθμιστική μπορεί να υλοποιηθεί με επιπλέον αισθητήρες FBG (dummy sensor), οι οποίοι θα είναι απομονωμένοι με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για τη διόρθωση του σήματος του FBG λόγω των μηχανικών καταπονήσεων. Το θερμο-οπτικό φαινόμενο δεν αποτελεί μέρος της έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πλην όμως είναι απαραίτητο να αναφερθεί για λόγους πληρότητας για την υποβοήθηση των Μηχανικών σε οποιαδήποτε αντίστοιχη ερευνητική εργασία στα FBG [4].

## 1.2 Τρόποι Ανάγνωσης FBG

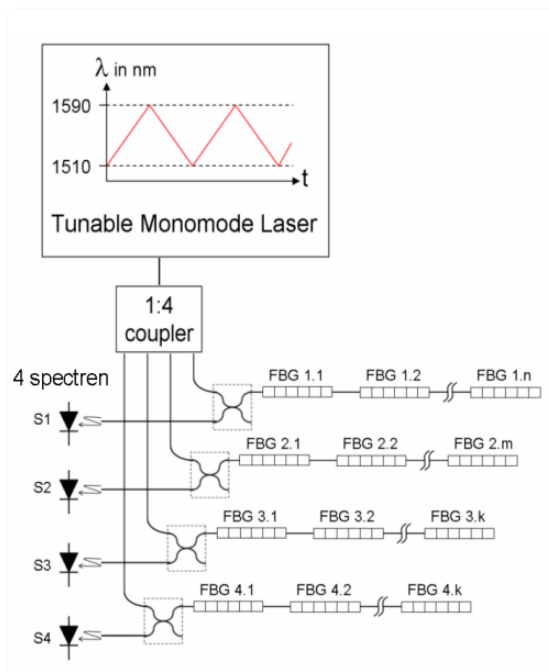
Υπάρχουν πολλοί τρόποι ανάγνωσης της μεταβολής του ανακλώμενου μήκους κύματος, λόγω μηχανικής καταπόνησης σε ένα FBG. Η εν λόγω μεταβολή είναι μικρή της τάξεως των pm για παραμορφώσεις μερικών μm σε μία οπτική ίνα. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των FBG, δηλαδή της παρακολούθησης των μεταβολών αυτών, είναι μεγάλης ακρίβειας και αφορά όργανα, ιδιαιτέρως πολύπλοκα, ορισμένα εξ' αυτών ενδεχομένως να είναι εύχρηστα (φορητά) αλλά όχι απαραίτητα πρακτικά. Οι επικρατέστεροι τρόποι ανάγνωσης των FBG είναι οι εξής:

### α) Οπτικοί Φασματικοί Αναλυτές (Optical Spectrum Analyzers-OSA)

Οι εν λόγω αναλυτές είναι σταθερού ή φορητού τύπου. Οι σταθερού τύπου είναι εργαστηριακοί αναλυτές, οι οποίοι δεν έχουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιακής λειτουργίας, έχουν μεγάλο όγκο και κόστος, πλην όμως είναι μεγάλης ακρίβειας. Η δυνατότητα συνδυασμού των καναλιών ανάλυσης μεμονωμένων αισθητήριων FBG ή και πολλών FBG σε μεγάλο εύρος απόσταση, σε έναν οπτικό αναλυτή OSA είναι περιορισμένη, λόγω της χαμηλής ισχύς της πηγής ευρείας ζώνης. Αναφορικά με τους φορητούς αναλυτές φάσματος έχουν τα πλεονεκτήματα ότι είναι ελαφριοί, πρακτικά μικροί σε μέγεθος και βάρος, είναι μικρού σχετικού κόστους, καθώς και λειτουργούν με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εντούτοις, είναι περιορισμένων δυνατοτήτων σε σχέση με τους σταθερούς αναλυτές, ενώ παράλληλα υστερούν και στην ακρίβεια των σχετικών μετρήσεων [8].

### β) Ρυθμιζόμενο Laser Μέτρησης Ισχύος-Μήκους κύματος (Tunable Lasers)

Η εν λόγω μέθοδος ανάγνωσης FBG υλοποιείται με ένα Laser ρυθμιζόμενου μήκους κύματος εκπομπής, κατά τη διάρκεια της σάρωσης της περιοχής ενός FBG, όπου εντοπίζεται η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς και ως εκ τούτου το κεντρικό μήκος κύματος της ανακλώμενης δέσμης φωτός. Τα ρυθμιζόμενα Tunable Lasers μπορούν να εκπέμπουν σε διαφορετικά μήκη κύματος σε ένα μεγάλο εύρος (γύρω από τα 1550 nm) ενώ η ανάλυση της ισχύος για κάθε μήκος κύματος που λαμβάνεται γίνεται μέσω φωτοδιόδων (Σχ. 1.2). Οι αναλυτές αυτοί έχουν τη δυνατότητα να πετύχουν μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο, καθώς μπορούν να επικεντρώσουν την ισχύ στα μήκη κύματος, που λαμβάνεται η μεγαλύτερη ισχύς (εύρεση του κεντρικού μήκους κύματος). Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν FBG με ανακλαστικότητα έως και 1%. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ο διαχωρισμός του σήματος σε διαφορετικά κανάλια χωρίς να χαθεί η σχετική ποιότητα στο σήμα. Τα Tunable Lasers δύναται να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο αριθμό FBG, διαφορετικών τύπων σε σειρά [4].



Σχήμα 1.2: Ρυθμιζόμενο Laser Μέτρησης Ισχύος-Μήκους κύματος [4]

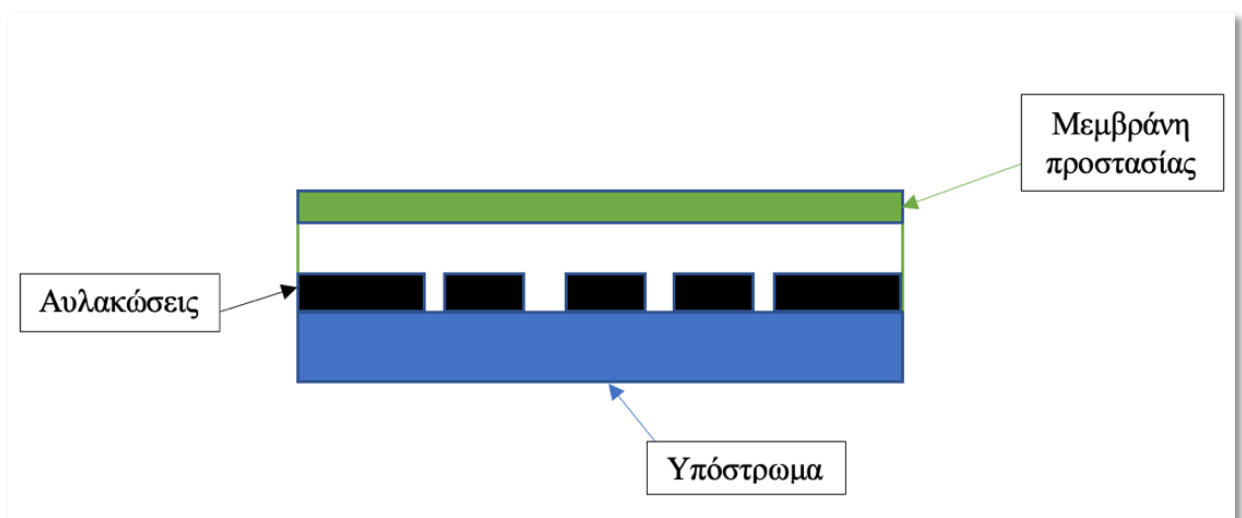
### γ) Ρυθμιζόμενα Φίλτρα (Tunable Filters)

Η εν λόγω κατηγορία ανάγνωσης ενός FBG βασίζεται σε μεταβλητά (ρυθμιζόμενα) φίλτρα, τα οποία χαρακτηρίζονται από το εύρος της ρύθμισης του φίλτρου, καθώς και από το χρόνο που απαιτείται να γίνει η ρύθμιση αυτού από ένα μήκος κύματος σε ένα άλλο. Από μία σταθερή πηγή παρέχεται ισχύς σε στενό εύρος μηκών κύματος στα διάφορα FBG και εν συνεχεία τα tunable filters σαρώνουν τις περιοχές, όπου είναι εγγεγραμμένα το καθένα ξεχωριστά FBG, με σκοπό να εντοπίσουν το φάσμα ανάκλασης τους (συνεπώς και το κεντρικό μήκος κύματος αυτών). Το εύρος ρύθμισης των tunable filters καθορίζει αριθμό των μηκών κύματος, τα οποία μπορούν να διέλθουν μέσα από τα εν λόγω φίλτρα. Όσο πιο μεγάλο είναι το εύρος ρύθμισης, τόσο πιο πολλά κανάλια μπορεί να χειριστεί το ρυθμιζόμενο φίλτρο [9].

## 1.3 Τεχνικές Εγγραφής FBG

Ο επικρατέστερος και πλέον αξιόπιστος τρόπος κατασκευής (εγγραφής) των FBG είναι με την τεχνική της μάσκας (phase mask) στην διάταξη του συμβολόμετρου (Interferometer). Η τεχνική αυτή ακολουθήθηκε στο εργαστήριο για να εγγράψουμε τα δικά μας FBG. Με τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται μία απλή διάταξη για την εγγραφή του FBG. Η διάταξη αυτή αποτελείται από την πηγή UV-Laser, την μάσκα, την ίνα, διάφορους οπτικούς φακούς και μηχανισμούς στήριξης και εστίασης. Η ακτίνα του Laser, που παράγει η πηγή, προσπίπτει σε έναν καθρέπτη με τέτοιο τρόπο ώστε η δέσμη να κατευθυνθεί στην μάσκα εγγραφής. Εν συνεχεία, η δέσμη διέρχεται από έναν φακό, ο οποίος συγκεντρώνει την εν λόγω δέσμη πριν την μάσκα. Κατόπιν, η ακτίνα προσπίπτει στην μάσκα και διαθλάται σχηματίζοντας δύο ακτίνες, οι οποίες συμβάλλουν μεταξύ τους. Η οπτική ίνα τοποθετείται μετά την μάσκα στο πεδίο όπου συμβάλλουν οι προαναφερθείσες ακτίνες. Η απόσταση της ίνας από την μάσκα επηρεάζει το μήκος  $L$  του FBG, και κατά συνέπεια τον απαιτούμενο χρόνο εγγραφής [6].

Η μάσκα είναι κατασκευασμένη από μία πλάκα γυαλιού, η οποία προστατεύεται από μία μεμβράνη, μέσω της οποίας η υπεριώδης ακτινοβολία δύναται να διέλθει μέσα από τη μάσκα. Στην μάσκα έχουν χαραχθεί εγκοπές, πάνω σε ένα υπόστρωμα, σε απόσταση και σε βάθος μεταξύ τους, οι οποίες υποβοηθούν στη δημιουργία των συμβολών, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση της τομής της μάσκας εγγραφής

Η αρχή της λειτουργίας της μάσκας βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης, όπου η προσπίπτουσα UV ακτίνα περιθλάται και δημιουργεί περισσότερες ακτίνες οι οποίες χωρίζονται σε διάφορες τάξεις,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Στην περίπτωση της κάθετης πρόσπτωσης  $\theta_i = 0$ , έχουμε μόνο δημιουργία των τάξεων  $m = 0, \pm 1$  (βλέπετε στο Σχήμα 1.4).

Οι ακτίνες μηδενικής τάξης έχουν μικρότερη ισχύ (μικρότερη από το ένα τρίτο). Οι ακτίνες πρώτης τάξης έχουν μεγαλύτερη ένταση από τις ακτίνες μηδενικής τάξης. Συγκεκριμένα, οι ακτίνες πρώτης τάξεως έχουν μεγαλύτερη ισχύ (άνω του 35%). Οι δύο τάξεις συμβάλλουν κοντά στην έξοδο της μάσκας δημιουργώντας κροσσούς συμβολής.

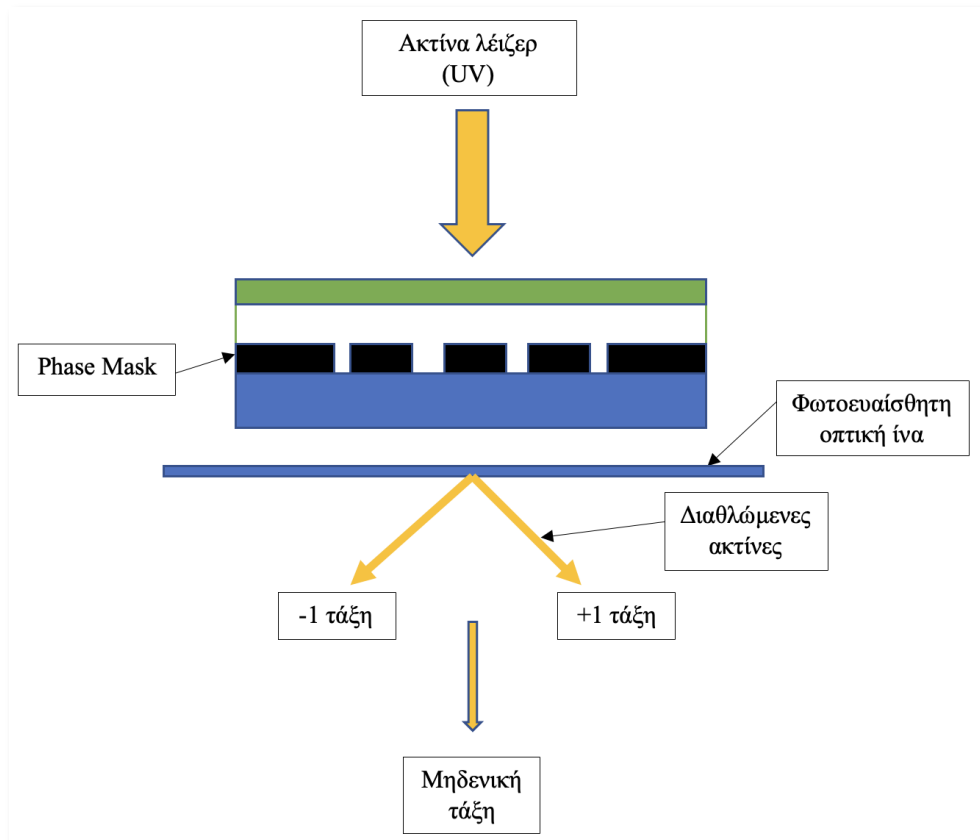
Οι κορυφές θετικής συμβολής αυξάνουν περισσότερο τον δ.δ. της φωτοευαίσθητης ίνας, ενώ οι κορυφές αντισυμβολής δεν τον μεταβάλλουν ή τον μεταβάλουν ελάχιστα. Η συνολική εγγραφή εμφανίζει ημιτονική μορφή κατά μήκος του άξονα της ίνας και αποτελεί την εγγραφή του FBG στην οπτική ίνα.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής Phase mask είναι η απλότητα, η ευστάθεια, η μικρή πολυπλοκότητα και η ανοχή στις δονήσεις. Η τεχνική αυτή δεν επηρεάζεται από τις μηχανικές ταλαντώσεις. Επίσης, η ικανότητα εγγραφής δεν επηρεάζεται από την μικρή πιθανή ασυμφωνία της πηγής του λέιζερ [10].

Η περίοδος  $\Lambda_p$  της μάσκας καθώς και η περίοδος  $\Lambda$  του FBG, συνδέονται με το μήκος κύματος  $\lambda_B$  του FBG, μέσω της σχέσης [11]:

$$\Lambda = \frac{N\lambda_B}{2n_{eff}} = \frac{\Lambda_p}{2} \quad (1.4)$$

όπου  $N(\geq 1)$  είναι η τάξη του FBG και  $n_{eff}$  ο ενεργός δείκτης διάθλασης.

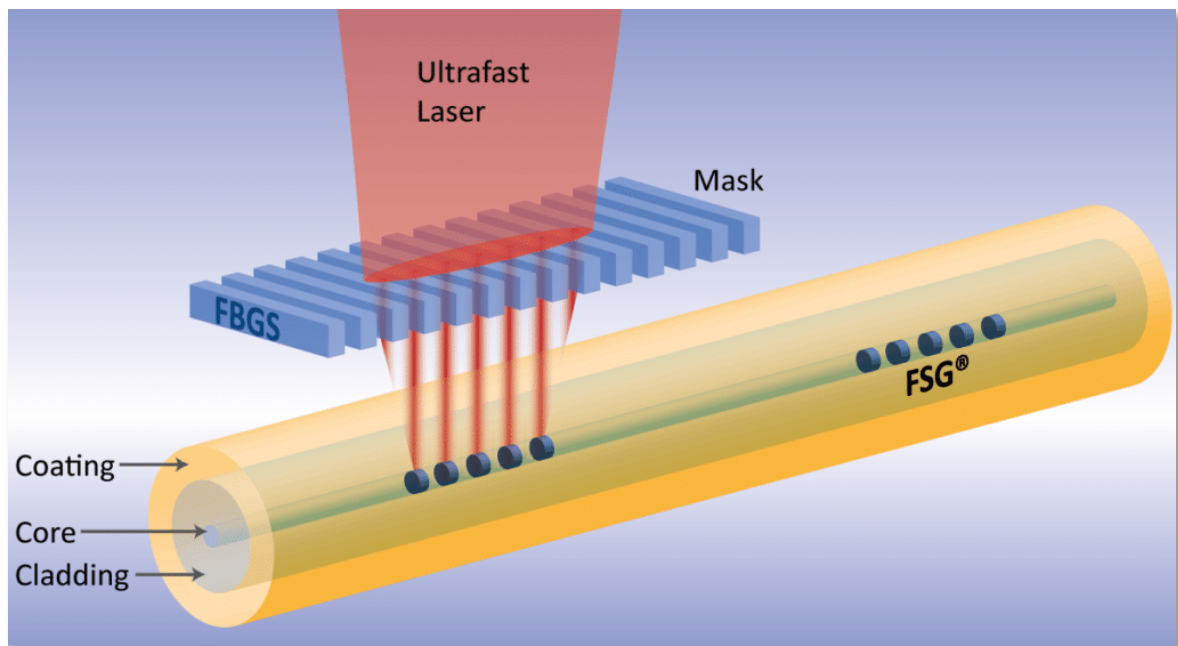


Σχήμα 1.4: Πορεία Ακτίνας Laser κατά την Εγγραφή του FBG

Μία άλλη εναλλακτική τεχνική εγγραφής FBG είναι με τη μέθοδο **Femtosecond Laser** όπου περιλαμβάνεται και ο τρόπος εγγραφής με Phase-mask που αναλύσαμε ακριβώς πιο πάνω. Πρόκειται για υπέρυθρο Laser, με μήκος κύματος 1053 nm και διάρκεια παλμού της τάξεως του fs (φεμτοδευτερολέπτο). Τα εν λόγω laser είναι πολύ στενού παλμού, υψηλής ισχύος και έχουν δυνατότητες ρύθμισης του πλάτους, του παλμού εξόδου, της μέγιστης ισχύος, καθώς και της συχνότητας

επανάληψης. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους έχουν σταθερό μήκος κύματος και ισχύς εξόδου, ενώ ο θόρυβος είναι χαμηλός.

Κατά την εγγραφή, το laser παράγει εστιασμένους παλμούς της τάξεως fs χωρίς να επιδρά στον πυρήνα της οπτικής ίνας αλλάζοντας τον δείκτη διάθλασης λόγω της μη γραμμικότητας των διαδικασιών απορρόφησης. Οι παλμοί laser καθοδηγούνται μέσω ειδικών οπτικών, με σκοπό να διαμορφωθεί ένας οδηγός παρεμβολής κυμάτων, ο οποίος είναι γεωμετρικά ευθυγραμμισμένος με τον διαμήκη άξονα της οπτικής ίνας. Υπάρχουν τρία είδη εγγραφής με femtosecond laser τεχνολογία: α) με μάσκα εγγραφής (phase mask), β) με ολογραφική συμβολομετρία (holographic interferometry) και γ) με απευθείας εγγραφή (direct writing) [12], [13]. Σχηματικά η τεχνική femtosecond laser φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.5.



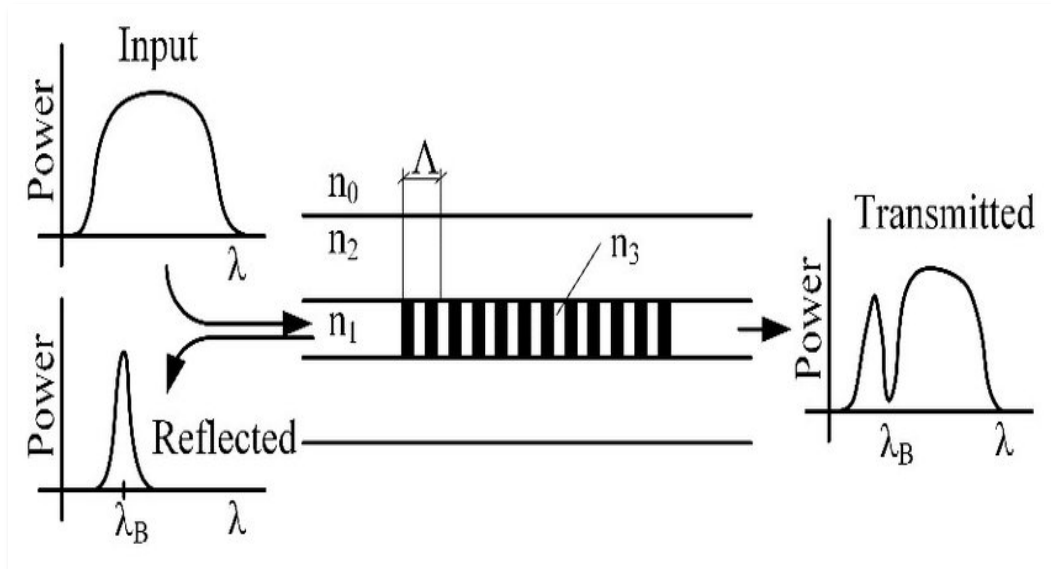
Σχήμα 1.5: Femtosecond Laser Εγγραφή FBG

Πηγή: [https://fbgs.com/wp-content/uploads/2019/03/FSG\\_image\\_final-1024x558.png](https://fbgs.com/wp-content/uploads/2019/03/FSG_image_final-1024x558.png) (10/4/23)

#### 1.4 Τύποι FBG

Αναλόγως της τεχνικής με την οποία κατασκευάζεται ένας αισθητήρας FBG μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης ημιτονοειδώς ή με άλλη συνάρτηση κατά μήκος του πυρήνα. Η δομή ενός FBG εξαρτάται από την περιοδική μεταβολή του  $n$  στον πυρήνα της οπτικής ίνας, καθώς και από τη φωτοευαισθησία της ίνας, όπου κατασκευάζεται το FBG. Η περίοδος  $\Lambda$  μπορεί να είναι ομοιόμορφη, περιοδικά διαβαθμισμένη ή κατανεμημένη σε μια υπερδομή. Έχουν κατασκευαστεί FBG, στα οποία ο εν λόγω δείκτης διάθλασης δύναται να πάρει διάφορες μορφές ανάλογα με την εφαρμογή. Εκτός από την εφαρμογή τους ως αισθητήρες τα FBG χρησιμοποιούνται ευρέως στις οπτικές επικοινωνίες όπου χρησιμοποιούνται στην πολυπλεξία μηκών κύματος (Dense Wavelength Division Multiplexing-DWDM), και στην αποπλεξία διαφόρων οπτικών καναλιών (Optical Add Drop Multiplexer-OADM), στα φίλτρα εξισορρόπησης του κέρδους οπτικού ενισχυτή, καθώς και στην αντιστάθμιση χρωματικής διασποράς (Chromatic Dispersion Compensation) [14], [15], [16]. Παρακάτω παρουσιάζεται η ταξινόμηση των FBG:

Το **Uniform Bragg Grating (UBG)** έχει σταθερή περιοδική μεταβολή του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα μιας μονότροπης οπτικής ίνας (SMF), μεταβολή η οποία είναι κάθετη ως προς τη διεύθυνση του πυρήνα της ίνας, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.6 [17].



Σχήμα 1.6: Uniform Bragg Grating

Πηγή:

<https://www.researchgate.net/publication/337189055/figure/fig1/AS:824396478414850@1573562845654/Structure-of-uniform-Bragg-grating.jpg> (10/4/23)

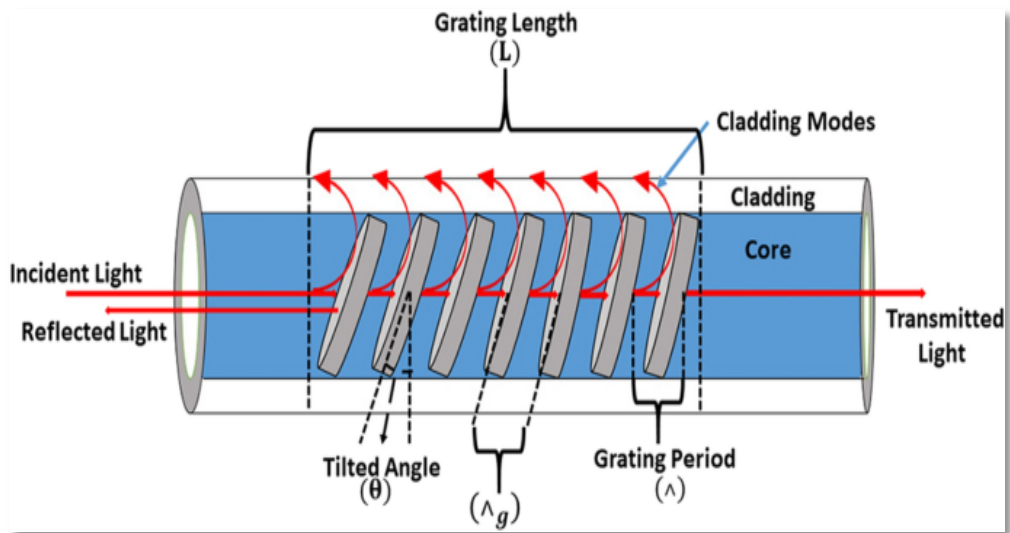
Κατά μήκος του πυρήνα της ίνας, το προσπίπτον οπτικό κύμα σκεδάζεται από κάθε επίπεδο μεταβολής του δείκτη διάθλασης. Η συνθήκη που επιτρέπει στο ανακλώμενο οπτικό κύμα κάθε περιόδου εγγραφής να είναι στη φάση του προσπίπτοντος οπτικού κύματος, είναι κρίσιμη για την αύξηση της ανακλαστικότητας του FBG. Αν αυτή η συνθήκη δεν ικανοποιείται, το ανακλώμενο οπτικό κύμα κάθε περιόδου εγγραφής βρίσκεται εκτός φάσης και δεν συμβάλλει θετικά στο ανακλώμενο κύμα, με αποτέλεσμα τη μείωση ή ακόμα και τη μηδενική ανακλαστικότητα. Στο φάσμα το κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B$  βρίσκεται στη μέγιστη ανακλώμενη ισχύ.

Το **Tilted Bragg Grating (TFBG)** είναι ομοιόμορφο FBG, το οποίο εγγράφεται στην οπτική ίνα με μία κλίση (tilting) ως προς τον άξονα αυτής. Η γωνία της κλίσης των περιόδων εγγραφής στο TFBG υπολογίζεται με βάση τη σχέση [40],[41]:

$$\lambda_B = \frac{2n_{eff}\Lambda}{\cos(\theta)} \quad (1.5)$$

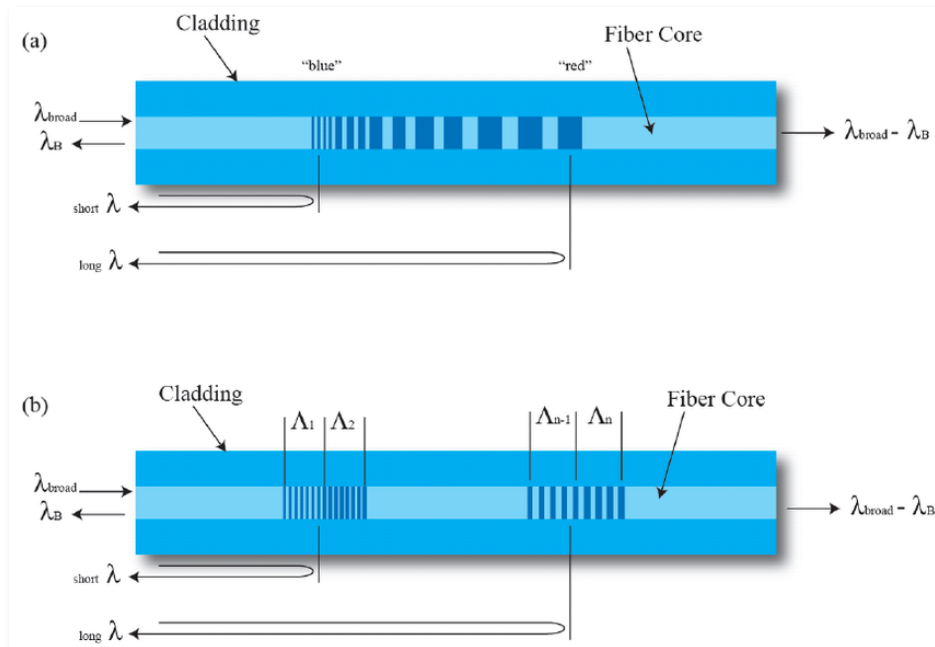
Όπου  $n_{eff}$  είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης του FBG,  $\Lambda$  είναι η περιοδικότητα του FBG και  $\theta$  είναι η γωνία κλίσης εγγραφής του FBG.

Τα TFBG αποτελούν μια εξειδικευμένη εκδοχή των FBG και αυξάνουν την ευαισθησία των αισθητήρων μηχανικής καταπόνησης σε μία συγκεκριμένη κατεύθυνση που εμφανίζει κλίση σε σχέση με τον άξονα της ίνας, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Tilted Bragg Grating [40]

Το **Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG)** έχει μονοτονικά μεταβαλλόμενη περίοδο. Υπάρχει μορφή εγγραφής CFBG η οποία γίνεται με τη μη περιοδική μεταβολή του δείκτη διάθλασης στον πυρήνα της ίνας, ώστε να επιτυγχάνεται διαφορετική ανακλαστικότητα για διαφορετικά μήκη κύματος του προσπίπτοντος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγαλύτερα μήκη κύματος πηγαίνουν πιο μακριά πριν ανακλαστούν από το grating σε σχέση με τα μικρότερα μήκη κύματος. Επίσης, υπάρχει μια ακόμη διαφορετική μορφή εγγραφής CFBG την οποία συνθέτουν μια ακολουθία ομοιόμορφων FBG με αυξανόμενη περίοδο, που αξιοποιούνται στο να προσομοιάσουν την συνεχή λειτουργία ενός CFBG. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται μια περιοδική διακύμανση στην ανακλαστικότητα του CFBG, η οποία είναι απαραίτητη για την αποδοτική λειτουργία του. Τα είδη των CFBG φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 1.8 (a) και (b).

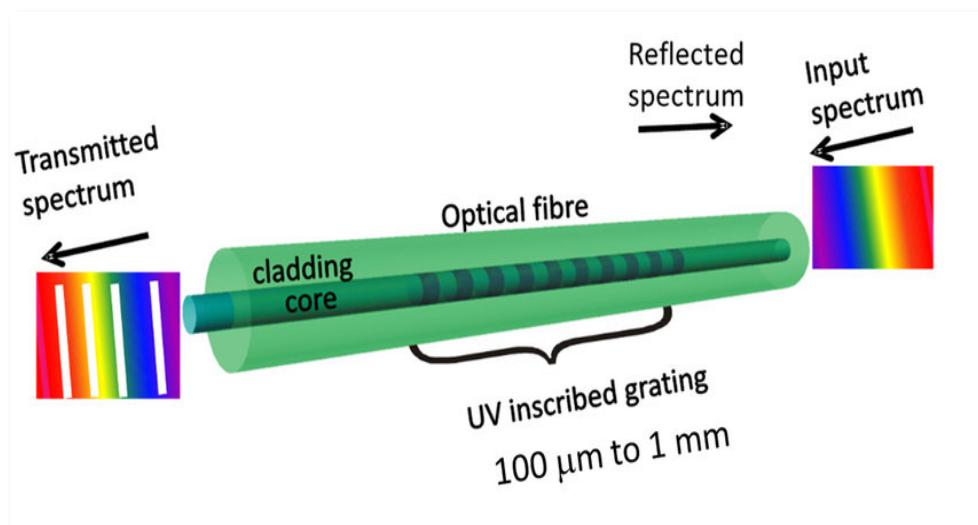


Σχήμα 1.8: Chirped Bragg Grating

Πηγή: <https://www.researchgate.net/profile/Ben-Mcmillen/publication/200028072/figure/fig14/AS:305789110636551@1449917213790/4-Structure-of-a-chirped-Bragg-grating-a-Approximation-of-a-linear-chirp-with-stepped.png> (10/4/23)

Τα CFBG χρησιμοποιούνται κυρίως για την εξισορρόπηση της χρωματικής διασποράς των οπτικών κυμάτων κατά την διάδοσή τους στην ίνα και σε συστήματα Wavelength Division Multiplexing (WDM), εξαιτίας του μεγάλου εύρους ανακλαστικότητας μηκών κύματος. [18],[19].

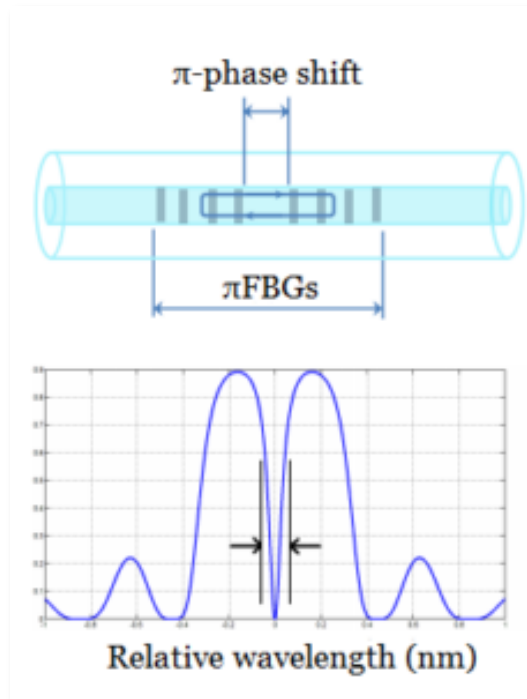
Ένας άλλος και αρκετά διαφορετικός τύπος grating είναι το **Long Period Fiber Bragg Grating (LPFBG)** το οποίο έχει περίοδο εγγραφής αρκετά μεγαλύτερη σε σύγκριση με αυτήν των κλασικών FBG, και με τιμές της τάξης των 100  $\mu\text{m}$ . Η περιοδικότητα εγγραφής στον πυρήνα της οπτικής ίνας έρχεται σε πλήρη αντιστοιχία με την περιοδικότητα των μετώπων φάσης ενός ρυθμού του μανδύα ο οποίος είναι συνήθως υψηλής τάξης. Η ακριβής μορφή του φάσματος διάδοσης επηρεάζεται από το μήκος και την περίοδο του LPG, καθώς και από εξωτερικούς παράγοντες, όπως το υλικό με το οποίο έρχεται σε επαφή ο μανδύας του LPG, που μπορεί να είναι αέριο ή υγρό. Σχηματικά ένα LPFBG φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Long Period FBG [42]

Το **Phased-Shifted Fiber Bragg Grating (PSFBG)** [21], [22] έχει δείκτη διάθλασης, ο οποίος αλλάζει ημιτονοειδώς. Στο κέντρο του FBG υπάρχει αλλαγή φάσης  $\pi$  ή κάποια άλλη. Το PSFBG στην πραγματικότητα είναι δύο ξεχωριστά FBG, ίδιας περιοδικότητας και είναι εγγεγραμμένα στον πυρήνα της οπτικής ίνας, με τρόπο τέτοιο ώστε το διαδιδόμενο κύμα να συναντά αλλαγή στην φάση των εν λόγω FBG. Στην περίπτωση όπου έχουμε αλλαγή φάσης  $\pi$ , στο κέντρο του ανακλώμενου κύματος υπάρχει μια ζώνη διέλευσης όπου συνήθως είναι ίδια με το μήκος κύματος Bragg. Είναι δυνατόν να εισαχθεί στο FBG περισσότερες από μία αλλαγές στην φάση δημιουργώντας και άλλες ζώνες διέλευσης. Αυτός ο τύπος FBG έχει εφαρμογή σε οπτικά φίλτρα και σε συστήματα WDM (Wavelength Division Multiplexing). Σχηματικά ένα PSFBG φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 1.10.





Σχήμα 1.10: Phased-Shifted Fiber Bragg Grating

Πηγή: <https://fibergratings.com/wp-content/uploads/2016/06/Phase-shifted-fiber-Bragg-gratings-%CF%80FBGs.png> (10/4/23)

Τέλος, υπάρχει το **Superstructure Phase Shifted FBG (SFBG)** το οποίο αποτελεί έναν ειδικό τύπο FBG, που βασίζεται στα Phase Shifted FBG. Στα SFBG, η φάση μεταβάλλεται σε διάφορα σημεία κατά μήκος της εγγραφής τους, επιτρέποντας τη διέλευση πολλαπλών και διακριτών μηκών κύματος (WDM) στο φάσμα της ανακλαστικότητας του FBG. Κατά την πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος WDM, τα μήκη κύματος του WDM καθαρίζουν τα επίπεδα θορύβου που έχουν ενδεχομένως προέλθει από προηγούμενη ενίσχυση, μέσω του ενισχυτή οπτικών ινών EDFA (Erbium). Τα SFBG χρησιμοποιούνται κυρίως σε δίκτυα οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων και χωρητικότητας, αν και η κατασκευή τους είναι σχετικά ακριβή. Για να χρησιμοποιηθούν σε αυτά τα δίκτυα, απαιτείται μια εξειδικευμένη σχεδίαση που να λαμβάνει υπόψη τα συγκεκριμένα μήκη κύματος του WDM [17], [23].

## 1.5 Εφαρμογές των FBG

Η τεχνολογία των FBG έχει ευρεία εφαρμογή στην βιομηχανία και για την επιτήρηση της ακεραιότητας των κατασκευών, (*Structural Health Monitoring*) πχ σε κτήρια, σε γέφυρες, σε πλοία, στην αεροδιαστημική, κ.ά [14], [15], [24]. Αυτό συμβαίνει διότι είναι πολύ σημαντική η ανίχνευση, η παρακολούθηση και η ανάλυση της στατικής και δυναμικής αντοχής τους καθώς και στον εντοπισμό των ζημιών σε περιπτώσεις αστάθειας των κατασκευών. Τα FBG δύνανται να ανιχνεύουν την μηχανική καταπόνηση, τις δονήσεις, την μεταβολή της θερμοκρασίας και ως εκ τούτου να αξιολογούνται οι σχεδιαστικές παράμετροι των κατασκευών και να παρέχονται πληροφορίες για την μελλοντική βελτίωση της σχεδίασής τους. Συνήθως, η στατική επάρκεια μετρείται από αισθητήρες, οι οποίοι μεταδίδουν πληροφορίες και δεδομένα σε κεντρικά συστήματα εντοπισμού στατικής επάρκειας [25]. Συγκεκριμένα παραδείγματα τομέων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν πέρα του τομέα των τηλεπικοινωνιών που είδαμε είναι:

- Στον κατασκευαστικό τομέα για μεγάλα έργα και οικοδομές πχ. τούνελ, κτίρια, γέφυρες, δρόμοι, φράγματα, για εκτίμηση της κατάστασης της κατασκευής μετά από κάποια σεισμική δραστηριότητα, για εντοπισμό προβλημάτων σε κάποια σημεία που προξενήθηκαν μετά από

ακραία φαινόμενα όπως λόγω υπερβολικού φόρτου, κάποιας πλημύρας ή κάποιας υποχώρησης του εδάφους κλπ. Μπορεί να εφαρμοστούν τα FBG στην ύπαρξη αυτοματοποιημένου ελέγχου της στατικής επάρκειας με σκοπό την ενημέρωση των υπευθύνων με αυτοματοποιημένο τρόπο (SMS ,email) για την άμεση αντιμετώπιση του προβλήματος.[33],[34]

- Στην πολιτιστική κληρονομιά για παράδειγμα στην παρακολούθηση δομικής συμπεριφοράς με την συνεχή καταγραφή της στατικής επάρκειας, ώστε να διαφυλαχθεί η δομική ακεραιότητα των μνημείων. Με αυτό τον τρόπο συνεισφέρουν στην διατήρηση της πολιτιστικής ταυτότητας.[35]
- Στην ναυτιλία με τον έλεγχο των ιμάντων στις φορτώσεις και εκφορτώσεις. Στις αντιδράσεις των δοκών που περιέχει το πλοίο όταν το χτυπούν τα κύματα της θάλασσας είτε σε φυσιολογικές συνθήκες είτε σε θαλασσοταραχή, στην καταπόνηση των υλικών από φθορά και πρόληψη για την έγκαιρη αντικατάστασή τους κλπ. [36],[37]

Τα FBG είναι αισθητήρες με πολύ μεγάλη ακρίβεια μέτρησης και μπορούν να τοποθετηθούν σε σωληνώσεις για την μέτρηση της ροής ενός ρευστού, έχουν ατρωσία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, είναι ηλεκτρικά παθητικά ανθεκτικότητα και ελαφριά, ενώ παράλληλα έχουν δυνατότητες πολυπλεξίας.

Τα FBG αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι μίας οπτικής ίνας, όταν εγγράφονται σε αυτή και ως εκ τούτου φέρουν τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών πχ χαμηλό κόστος σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια ίδιας απόστασης και χωρητικότητας, υψηλό εύρος ζώνης (bandwidth) και υψηλές ταχύτητες τους μετάδοσης των δεδομένων μικρή εξασθένιση του σήματος, μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια, ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, κ.ά.

Βασικά μειονεκτήματα των FBG είναι ότι χρειάζονται φασματικοί αναλυτές υψηλού κόστους για την ανάγνωσή τους σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς αισθητήρες, στην περίπτωση διακλαδώσεων και συνδέσεων απαιτείται ειδική και βέλτιστη προσαρμογή για να ελαχιστοποιηθεί η διασπορά και οι απώλειες. Τα FBG ως οπτικές ίνες είναι αρκετά εύθραυστα σε κτυπήματα και απαιτούν σοβαρή προστασία. Για αυτό το λόγο συνήθως τοποθετούνται σε κάλυμμα από προστατευτικό υλικό. [4], [10]

## 2 Εγγραφή και Ανάγνωση των FBG

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο παρουσιάζεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις του κεντρικού μήκους κύματος, καθώς και της ανακλαστικότητας των FBG. Κατόπιν, μελετήθηκε η ακρίβεια των εξαγόμενων μετρήσεων των τιμών, που προκύπτουν από το ανακλώμενο κύμα στα FBG, είτε με τη χρήση σταθερού, είτε με τη χρήση φορητού οπτικού αναλυτή. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε εγγραφή καινούριων αισθητήρων FBG, μέσω της διαδικασίας εγγραφής με Phase Mask, εξάγοντας αντίστοιχες μετρήσεις των χαρακτηριστικών των FBG, με σταθερό οπτικό αναλυτή. Επιπλέον, τα δύο FBG συγκολλήθηκαν μεταξύ τους και εξήχθησαν με όμοιο τρόπο αντίστοιχες μετρήσεις των χαρακτηριστικών τους, με σταθερό και με φορητό οπτικό αναλυτή. Τέλος, υπολογίστηκε ο ενεργός δείκτης διάθλασης των FBG και πραγματοποιήθηκε προσομοίωσή τους με χρήση κώδικα.

### 2.1 Παρουσίαση των οργάνων και εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης

Στο εργαστήριο θα χρησιμοποιήσουμε ίνες μονορυθμικού τύπου γιατί είναι συμβατές με όλα τα εξαρτήματα που διαθέτουμε. Επίσης, οι εν λόγω οπτικές ίνες έχουν ως χαρακτηριστικό πλεονέκτημα να έχουν μικρές απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις και ως εκ τούτου εξυπηρετούν στην ανάγνωση αισθητηρίων στην περίπτωση που τοποθετούνται σε αντίστοιχες τέτοιες απομακρυσμένες αποστάσεις πχ σε μια γέφυρα, το FBG και τα όργανα μέτρησης να βρίσκονται σε άλλη μακρινή περιοχή σε σχέση με το FBG. Η εξασθένηση των τηλεπικοινωνιακών οπτικών ινών (απώλειες) για μήκη κύματος των 1550 nm είναι περίπου της τάξεως 0,2 dB ανά χιλιόμετρο.

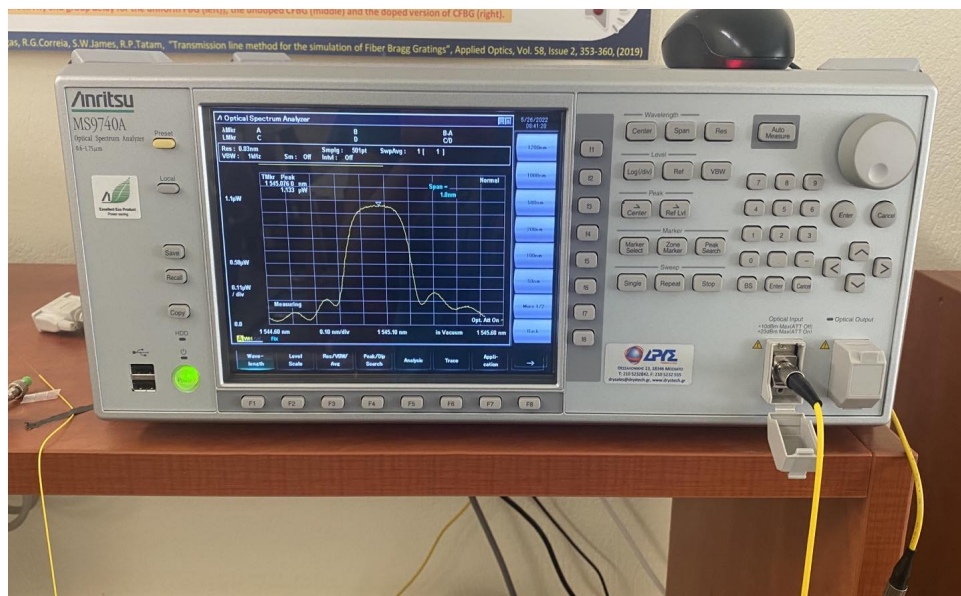
Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που χρησιμοποιούνταν πολυρυθμικές ίνες δεν θα υπήρχαν απώλειες, πλην όμως θα εμφανίζονταν πολλοί ρυθμοί, συνεπώς θα είχαμε πολύ μεγάλη διασπορά. Παρόλο που για τις ανάγκες του πειράματος δεν υπάρχει η ανάγκη για μεταφορά μεγάλης πληροφορίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν πολυρυθμικές οπτικές ίνες, όμως αξιολογείται το γεγονός ότι όλος ο εξοπλισμός του εργαστηρίου υποστηρίζει μόνο τις μονορυθμικές ίνες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα όργανα και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν :

#### α) Σταθερός Οπτικός Αναλυτής Φάσματος (Optical Spectrum Analyzer -OSA)

Ο εργαστηριακός OSA έχει μεγάλο εύρος μηκών κύματος έχουν μεγάλη ακρίβεια και πολλές δυνατότητες λειτουργίας. Επίσης έχει βασικό χαρακτηριστικό να διαθέτει μικρό Resolution Bandwidth (RBW), συνεπώς έχει μεγάλη ακρίβεια, δηλαδή ευκρίνεια στην απεικόνιση του οπτικού φάσματος και εν τέλει στην μέτρηση της ισχύος.

Θα χρησιμοποιηθεί ως σύστημα αναφοράς ο οπτικός αναλυτής φάσματος MS9740A της εταιρείας Anritsu, ο οποίος διαθέτει εύρος ανάγνωσης σήματος από 600 nm έως 1750 nm και υψηλή ταχύτητα σαρωτή κυματομορφών. Επίσης, διαθέτει 8 διαφορετικά μενού ανάλυσης: LD-Module, DFB-LD, FP-LD, LED, PMD, WDM, Opt. Amp και Opt. Amp (Multi-channel). Τέλος, παρέχει τη δυνατότητα για μεταφορά των δεδομένων προς εξωτερική συσκευή η οποία διαθέτει θύρα usb (αναλυτικά χαρακτηριστικά του OSA βλέπετε στο Παράρτημα «Α»).



Εικόνα 2.1: Σταθερός Οπτικός Φασματικός Αναλυτής του εργαστηρίου

### β) Φορητός Οπτικός Αναλυτής Φάσματος (OSA)

Είναι ένα φορητό σύστημα ανάγνωσης FBG της εταιρείας BaySpec με δυνατότητα προσαρμογής των μετρήσεων (Calibration) καθώς μετρά σε πολύ στενό εύρος ζώνης, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον σύστημα αναφοράς (αναλυτικά χαρακτηριστικά του φορητού οπτικού αναλυτή φάσματος BaySpec βλέπετε στο Παράρτημα «B»).



Εικόνα 2.2: Φορητός Οπτικός Φασματικός Αναλυτής (BaySpec)

Οι μετρήσεις θα υλοποιηθούν αρχικά με τον Οπτικό Αναλυτή Anritsu, ο οποίος είναι και το αρχικό Σύστημα Αναφοράς και κατόπιν θα διεξαχθούν με το σύστημα της BaySpec με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων του ενός συστήματος με το άλλο.

### γ) Πηγή Ευρείας Ζώνης Φάσματος (Benchtop BroadBand Source-BBS)

Η πηγή παρέχει σταθερή ισχύ σε στενό εύρος μηκών κύματος, αντίστοιχο και μεγαλύτερο με το εύρος ενός FBG ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ανάκλασης από το FBG. Η πηγή φωτός που χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο είναι μία συσκευή (BBS) που εκπέμπει ένα οπτικό φάσμα για οπτικές ίνες με σχετικά σταθερή ισχύ. Εκπέμπει ένα φάσμα με κεντρική συχνότητα 1558,45 nm. Την

περισσότερη ισχύ  $13,5 \mu\text{W}$  την εκπέμπει στα  $1560,59 \text{ nm}$  με βάση τις προδιαγραφές (παράρτημα Γ) αλλά στις πειραματικές μετρήσεις την μέγιστη ισχύ την μετρήσαμε στα  $1559,508 \text{ nm}$  να είναι  $3,779 \mu\text{W}$  ( $-24,23 \text{ dBm}$ ).

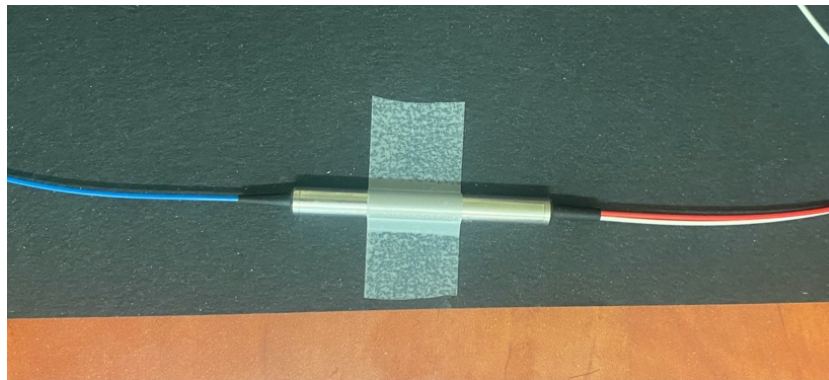


**Εικόνα 2.3:** Πηγή Ευρείας Ζώνης Φάσματος (BBS)

δ) **Κυκλοφορητής (Circulator/Coupler)**

Το οπτικό φάσμα που εκπέμπει η BBS εισάγεται στον οπτικό κυκλοφορητή. Ο οπτικός κυκλοφορητής έχει την ιδιότητα το σήμα που λαμβάνει από μια θύρα να το μεταφέρει δεξιόστροφα στην αμέσως επόμενη θύρα. Ο Κυκλοφορητής λειτουργεί για μήκη κύματος της τάξεως των  $1550 \text{ nm}$  σε εύρος  $\pm 40 \text{ nm}$  (παράρτημα Α). Έχει τρεις (3) θύρες, μέσω των οποίων το οπτικό κύμα διέρχεται από την μία θύρα στην άλλη με τους εξής τρόπους:

α. θύρα 1  $\rightarrow$  θύρα 2, β. θύρα 2  $\rightarrow$  θύρα 3, γ. θύρα 3  $\rightarrow$  θύρα 1. Αλλά δεν γίνεται σύμφωνα με τη φορά διέλευσης του οπτικού σήματος από την θύρα 1  $\rightarrow$  θύρα 3 και από την θύρα 3  $\rightarrow$  θύρα 2 διότι είναι απομονωμένες κατά  $\geq 40 \text{ dB}$ .



**Εικόνα 2.4:** Κυκλοφορητής (Circulator)

ε) **Φωτοευαίσθητες Οπτικές Ίνες και αντίστοιχα FBG σε αυτές**

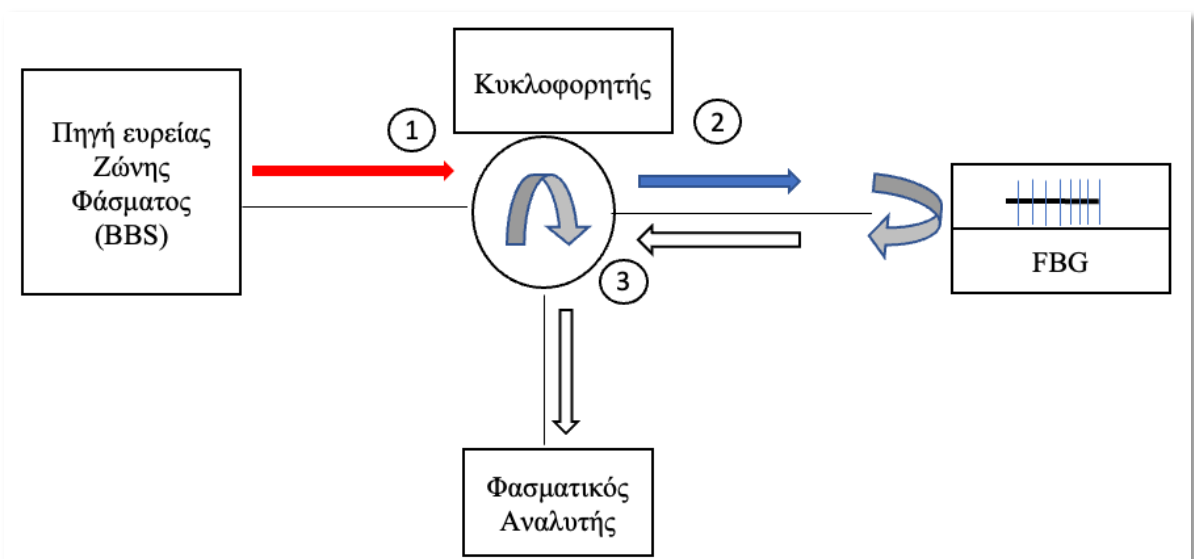
Στο εργαστήριο Οπτικών Ίνων διαθέτουμε τρεις τύπους μονορυθμικών φωτοευαίσθητων ινών με κωδικούς GF1, GF1AA και GF4A. Οι τύποι αυτοί αφορούν στο βαθμό ευαισθησίας και ευαισθητοποίησης του Ge ώστε να επιτυγχάνεται αυξημένη ή μέτρια ευαισθησία εγγραφής. Στα ήδη δύο εγγεγραμμένα FBG του εργαστηρίου για την εγγραφή του  $\text{FBG}_1$  έχει χρησιμοποιηθεί ο τύπος GF1 (με δείκτη διάθλασης πυρήνα  $1,44993$ , μανδύα  $1,4441$  και διάμετρο πυρήνα  $9 \mu\text{m}$ ) ενώ για την εγγραφή του  $\text{FBG}_2$  έχει χρησιμοποιηθεί ο τύπος GF4A (με δείκτη διάθλασης πυρήνα  $1,47493$ , μανδύα  $1,4441$  και διάμετρος πυρήνα  $3,5 \mu\text{m}$ ) αντίστοιχα.

Επιπλέον, για να μελετηθεί ο τρόπος εγγραφής με Phase Mask ενός FBG δεν χρησιμοποιήθηκαν τα ήδη εγγεγραμμένα αλλά εγγράφηκαν καινούρια στο εργαστήριο. Τα καινούρια χαρακτηρίστηκαν και μελετήθηκαν ώστε να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογή που θα δειχθεί παρακάτω. Για τα FBG που εγγράψαμε χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι φωτοευαίσθητων ινών GF1AA και GF4A. Πιο συγκεκριμένα για το FBG<sub>3</sub> χρησιμοποιήθηκε ο τύπος GF1AA (με δείκτη διάθλασης πυρήνα 1,44993, μανδύα 1,4441 και διάμετρο πυρήνα 8,5 μm) και για το FBG<sub>4</sub> ο τύπος GF4A. Στην εφαρμογή που θα παρουσιαστεί σε επόμενα κεφάλαια το FBG<sub>3</sub> θα χρησιμοποιηθεί για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση, ενώ το FBG<sub>4</sub> θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των μηχανικών καταπονήσεων. Την θερμοκρασιακή αντιστάθμιση την χρειαζόμαστε για την περίπτωση που υπάρξει οποιαδήποτε αλλαγή στη θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα όταν μετακινηθεί η τιμή του κεντρικού μήκους κύματος του FBG<sub>3</sub> θα ληφθεί υπόψη αυτή η μεταβολή στην μέτρηση του FBG<sub>4</sub> και θα αφαιρεθεί.

## 2.2 Τρόπος Ανάγνωσης των FBG του Πειράματος

Η εγγραφή ενός FBG πραγματοποιείται με μια μέθοδο η οποία δεν προσφέρει τη δυνατότητα ανάγνωσης του τι γράφεται από το λέιζερ πάνω στην φωτοευαίσθητη ίνα. Υπάρχει περίπτωση να γράφει αργά, να γραφεί λάθος ακόμη και να μην γράφεται τίποτα και όλα αυτά γιατί έχει γίνει κάποιο λάθος είτε στην συνδεσμολογία είτε κάποιο εξάρτημα να μην λειτουργεί σωστά. Όμως για να μπορούν να εντοπιστούν όλα αυτά και να μπορεί να γνωρίζει ο εκάστοτε μηχανικός πότε ακριβώς χρειάζεται να σταματήσει όλη η διαδικασία απαιτείται να γνωρίζει πρώτα τη διαδικασία ανάγνωσης ενός FBG, όπως θα αναλυθεί στην παρούσα ενότητα για να μπορεί να προχωρήσει έπειτα στην εγγραφή. Έτσι θα μπορεί να ελέγχει ταυτόχρονα την ανακλάστικότητα και σε ποιο μήκος κύματος πραγματοποιείται η εγγραφή.

Η πειραματική διάταξη της τοπολογίας BBS-Κυκλοφορητής-Σταθερός/Φορητός OSA που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εργασία, έχει ως σκοπό να διαβάσει τις μεταβολές του κεντρικού μήκους κύματος των FBG. Η λειτουργία της τοπολογίας βασίζεται στην εκπομπή από την πηγή BBS ενός ευρέως φάσματος μηκών κύματος στο FBG, το οποίο ανακλά ένα τμήμα του φάσματος αυτού. Μέσω του αναλυτή φάσματος OSA εξετάζεται το ανακλώμενο μήκος κύματος. Το εκπεμπόμενο φάσμα από την πηγή BBS διέρχεται μέσα από τον κυκλοφορητή, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να διαχωρίζει τα κύματα, που εισέρχονται σε αυτόν, με τέτοιο τρόπο ώστε το κύμα που μπαίνει από την θύρα 1, να βγαίνει από την θύρα 2 και το ανακλώμενο κύμα από το FBG, το οποίο εισέρχεται από την θύρα 2 να εξέρχεται από την θύρα 3. Με αυτόν το τρόπο, διαχωρίζεται το ανακλώμενο μήκος κύματος και καθίσταται δυνατή η ανάγνωσή του από τον OSA.



Σχήμα 2.1: Συνδεσμολογία Ανάγνωσης FBG

Στην επόμενη παράγραφο θα δειχθούν μετρήσεις που αφορούν την πηγή BBS με τον οπτικό φασματικό αναλυτή του εργαστηρίου με εστίαση στον εντοπισμό της ισχύος που στέλνει η πηγή στη περιοχή ανακλαστικότητας του κάθε FBG ξεχωριστά.

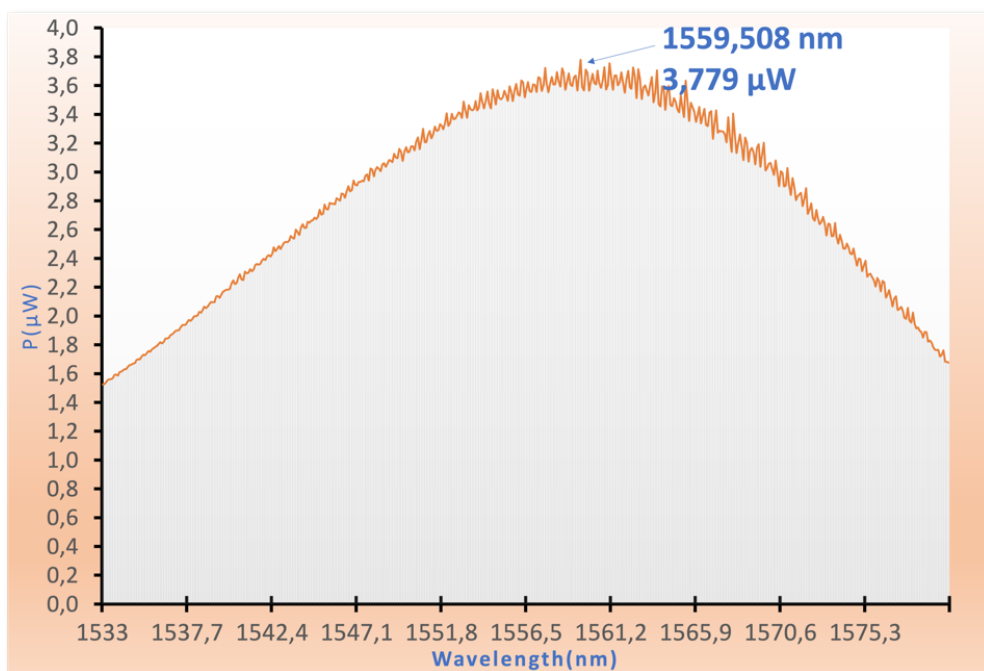
### 2.2.1 Μέτρηση Ισχύος της BBS με Σταθερό Οπτικό Φασματικό Αναλυτή

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την ανακλαστικότητα σαν πρώτο βήμα παίρνουμε μέτρηση του συνολικού φάσματος εκπομπής της πηγής ευρείας ζώνης. Βλέπουμε ότι η πηγή BBS στέλνει ένα μεγάλο φάσμα μηκών κύματος (από  $\lambda = 1533$  έως  $\lambda = 1580$  nm), της οποίας η ισχύς υπολογίζεται όταν ο φασματικός αναλυτής OSA συνδεθεί απευθείας με αυτήν, όπως φαίνεται στην παρακάτω Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Σύνδεση BBS-OSA(Σταθερός)

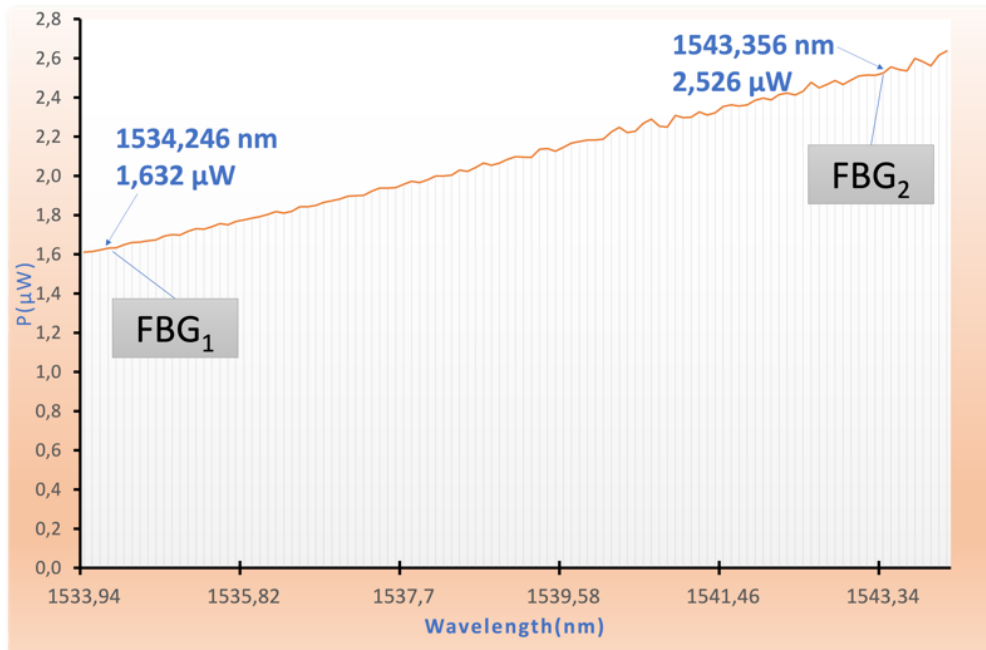
Σε όλες τις πειραματικές διατάξεις ο σταθερός OSA χρησιμοποιείται με μικρό RBW=0.03 nm για την επίτευξη της μέγιστης ευκρίνειας απεικόνισης. Το συνολικό φάσμα της πηγής BBS (με μέγιστη ισχύ 3,779  $\mu$ W και κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda = 1559,508$  nm) παρουσιάζεται στο επόμενο Γράφημα 2.1.



Γράφημα 2.1: Φάσμα Εκπομπής της BBS με σταθερό OSA

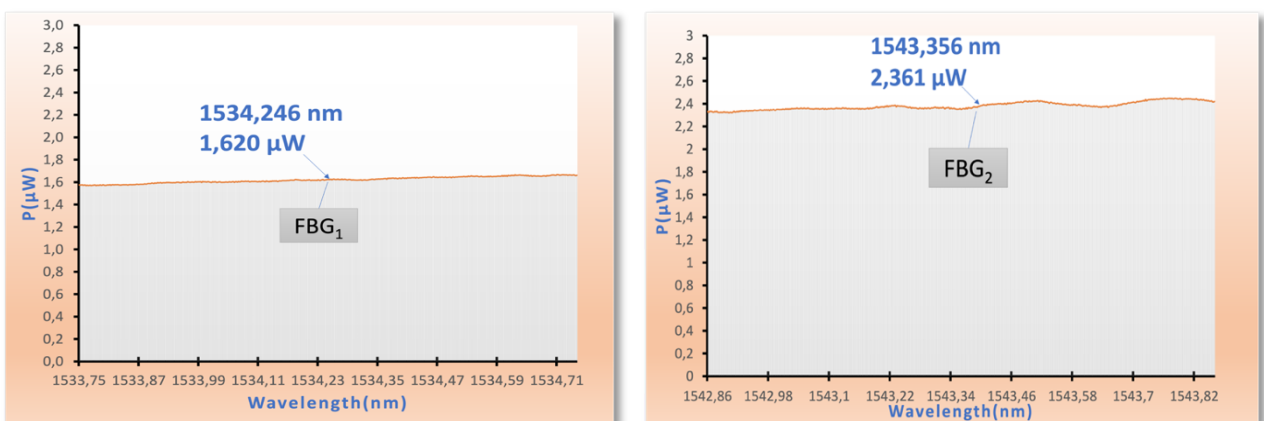
Στη συνέχεια, βασιζόμενοι στις μετρήσεις του συνολικού φάσματος της BBS που ελήφθησαν από τον σταθερό οπτικό αναλυτή, εντοπίζω με βάση τα κεντρικά μήκη κύματος ανάκλασης κάθε FBG ξεχωριστά τη μέγιστη ισχύ που λαμβάνει το καθένα. Φυσικά για να γίνει αυτό με ακρίβεια πρέπει πρώτα να έχουμε μετρήσει και δει που βρίσκεται το κεντρικό μήκος κύματος της μέγιστης ανακλώμενης ισχύος του κάθε FBG ξεχωριστά, διαδικασία που φαίνεται παρακάτω. Έτσι παρατηρώ

ότι για το  $FBG_1$  η προσπίπτουσα είναι  $1,632 \mu W$  και για το  $FBG_2$  είναι  $2,526 \mu W$ . Ενώ η φασματική τους απόσταση είναι  $9,11 \text{ nm}$ . Όπως φαίνονται τα εν λόγω FBG στην παρακάτω Εικόνα 2.8.



**Γράφημα 2.2:** Περιοχή Εγγραφής των  $FBG_1$  και  $FBG_2$  πάνω στην BBS με σταθερό OSA

Στη συνέχεια ρυθμίζοντας κατάλληλα τον σταθερό οπτικό φασματικό αναλυτή μελετήθηκε μια περιοχή εύρους  $1 \text{ nm}$ , καλύπτοντας το φασματικό εύρος ανακλαστικότητας για το κάθε FBG ξεχωριστά. Παρατηρήθηκε, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, ότι στις εν λόγω περιοχές η εκπεμπόμενη ισχύς από την BBS είναι περίπου σταθερή. Οι τιμές της προσπίπτουσας ισχύος είναι ελάχιστα διαφορετικές καθώς ο οπτικός αναλυτής εστιάζει σε μια συγκεκριμένη περιοχή και όχι σε όλο το φάσμα που εκπέμπει η πηγή. Ως αποτέλεσμα να είναι και πιο ακριβής η μέτρηση της ισχύος όπως απεικονίζεται στα γραφήματα παρακάτω 2.3.



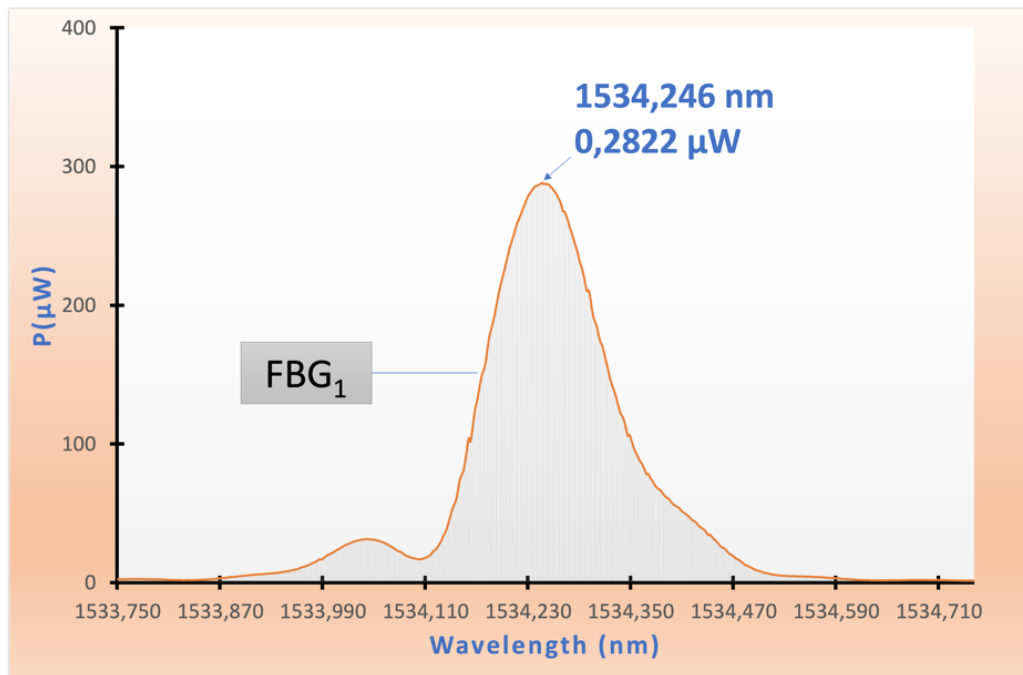
**Γράφημα 2.3:** Περιοχή εύρους  $1 \text{ nm}$  της BBS γύρω από το  $FBG_1$  και  $FBG_2$  αντίστοιχα με σταθερό OSA

Στην επόμενη παράγραφο θα υπολογισθούν οι ανακλαστικότητες για το κάθε FBG ξεχωριστά βασιζόμενοι στις μετρήσεις του οπτικού φασματικού αναλυτή του εργαστηρίου.

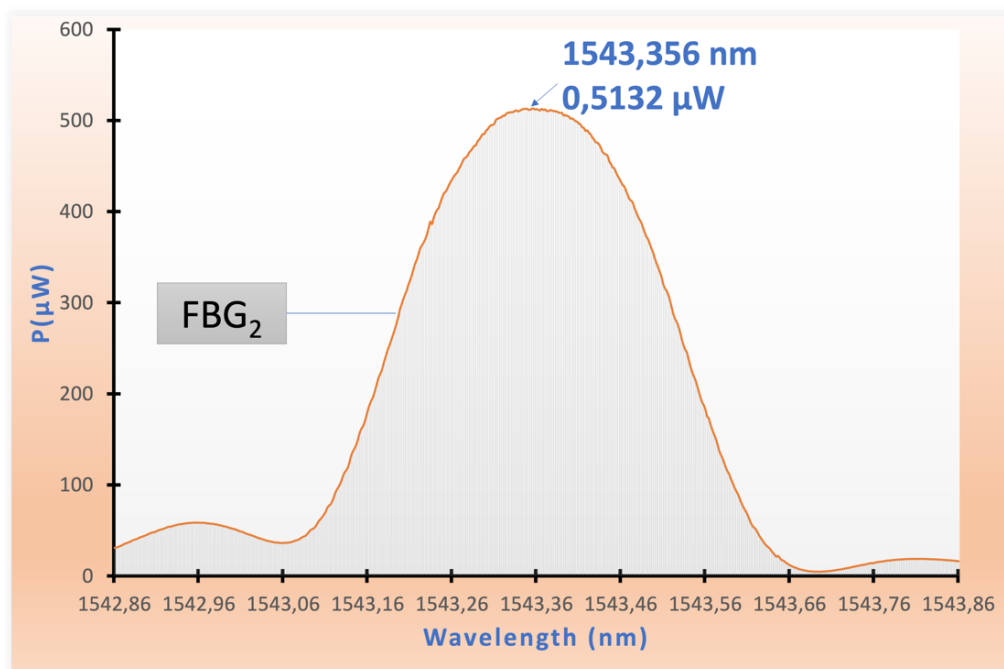


### 2.2.2 Υπολογισμός Ανακλαστικότητας των ήδη διαθέσιμων FBG

Εδώ υπολογίστηκε η ανακλαστικότητα των  $FBG_1$  και  $FBG_2$ , λαμβάνοντας υπόψη την προσπίπτουσα ισχύ που στέλνει η BSS στα FBG για συγκεκριμένα κεντρικά μήκη κύματος, καθώς και της μέγιστης ανακλώμενης ισχύος στα εν λόγω FBG, με τη χρήση του σταθερού οπτικού αναλυτή. Όπως προκύπτει από τον σταθερό OSA, η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς για το  $FBG_1$  είναι  $0,2822 \mu W$  και για το  $FBG_2$  είναι  $0,5132 \mu W$ . Η απεικόνιση του φάσματος του FBG (1 και 2), όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, προέκυψε από λήψη 501 σημείων σε εύρος φάσματος 1 nm, αριθμός σημείων αρκετά μεγάλος διότι ο σταθερός OSA έχει μικρό RBW και συνεπώς μεγάλη ακρίβεια μετρήσεων.



Γράφημα 2.4: Φάσμα του  $FBG_1$  με σταθερό OSA



Γράφημα 2.5: Φάσμα του  $FBG_2$  με σταθερό OSA

Υπολογίζουμε την ανακλαστικότητα του FBG<sub>1</sub> και FBG<sub>2</sub> ποσοστιαία από τον τύπο:

$$\frac{\text{Μέγιστη Ανακλώμενη Ισχύς}}{\text{Προσπίπτουσα ισχύς στο FBG}} \times 100 \quad (2.1)$$

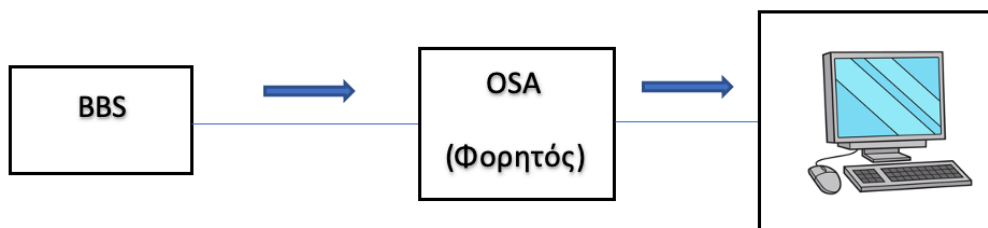
$$\text{FBG}_1 = 17,41 \%, \text{FBG}_2 = 21,73\%$$

Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες μετρήσεις όπως αναλύεται στις δυο επόμενες παραγράφους, που υλοποιήθηκαν με το σταθερό οπτικό αναλυτή, χρησιμοποιώντας αυτή τη φορά φορητό οπτικό αναλυτή με σκοπό την μελέτη του ανακλώμενου κύματος του FBG για την εξαγωγή μετρήσεων που αφορούν στον υπολογισμό κυρίως του κεντρικού μήκους κύματος, καθώς και της ανακλαστικότητας ώστε να συγκριθεί η ακρίβεια των οργάνων (φορητού και σταθερού OSA).

### 2.2.3 Μέτρηση Ισχύος της BBS με Φορητό Αναλυτή Φάσματος

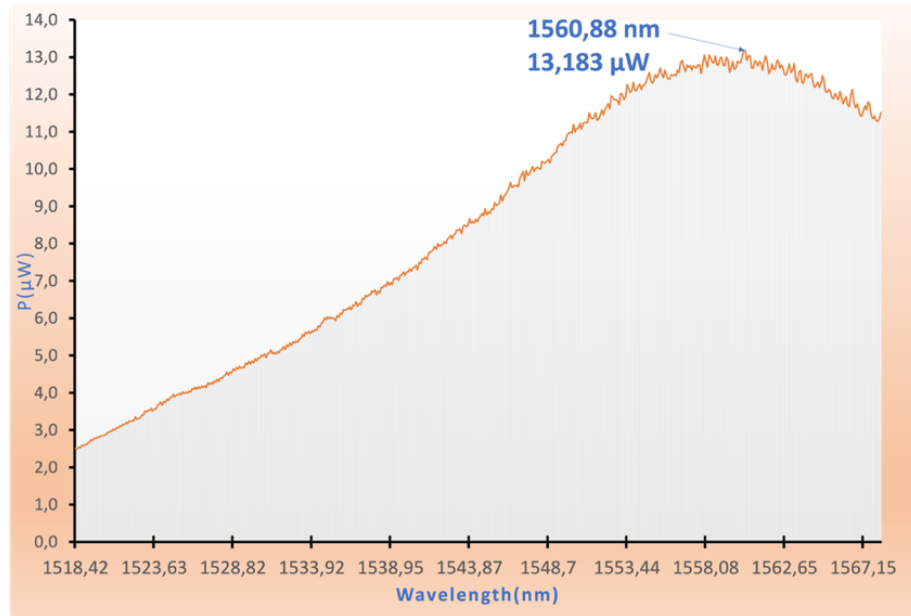
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την παράγραφο 2.2.1 για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας προβαίνουμε στην μέτρηση της πηγής ευρεία ζώνης αυτή την φορά με τον φορητό οπτικό φασματικό αναλυτή. Η μέτρηση του συνολικού φάσματος εκπομπής της πηγής BBS που πάρθηκε με το φορητό σύστημα όπως απεικονίζεται στο Γράφημα 2.6 σε σύγκριση με την μέτρηση του σταθερού όπως φαίνεται στο Γράφημα 2.1 δείχνει ότι αν και η μέγιστη ισχύς εντοπίζεται και στα δυο φάσματα κοντά στα 1560 nm ωστόσο αποκλίνουν μεταξύ τους. Δηλαδή το φάσμα από την μέτρηση του σταθερού είναι υπερτιμημένο σε υψηλότερα μήκη κύματος και υποβαθμισμένο στην ισχύ. Αντίθετα το φάσμα από την μέτρηση του φορητού οπτικού αναλυτή είναι υποτιμημένο σε μικρότερα μήκη κύματος και υπερτιμημένο στην ισχύ. Αυτό οφείλεται στο RBW το οποίο είναι πιο υψηλό στον φορητό με αποτέλεσμα στο ίδιο εύρος που μετρούν και οι δυο αναλυτές ο σταθερός να εντοπίζει περισσότερα σημεία και έτσι να έχει ακριβέστερα αποτελέσματα. Αντίθετα ο φορητός εντοπίζει λιγότερα σημεία με αποτέλεσμα να χρειάζεται να παρεμβάλει τις τιμές χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό για να εξάγει το φάσμα στην τελική του μορφή. Έτσι ο φορητός οπτικός αναλυτής φάσματος εμφανίζει μειωμένη ακρίβεια. Όπως θα δούμε παρακάτω παρόλα αυτά καταφέρνει να εντοπίζει το κεντρικό μήκος κύματος αρκετά κοντά με το σταθερό αναλυτή. Σε συνδυασμό του ότι εμείς μελετάμε κυρίως την μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος και εξαιτίας της φορητότητας του μπορούμε να τον χρησιμοποιήσουμε πιο εύκολα σε οποιαδήποτε εφαρμογή μακριά από τον χώρο του εργαστηρίου. Επισημαίνεται ότι η απεικόνιση και σύγκριση των γραφημάτων κατά την διάρκεια επεξεργασίας των μετρήσεων μετατρέπουμε τη μονάδα ισχύος από dBm σε μW ώστε να έχουμε γραμμική και όχι λογαριθμική κλίμακα.

Η μόνη διαφορά με βάση την αρχική συνδεσμολογία είναι ότι έχει προστεθεί ένας υπολογιστής καθώς το φορητό σύστημα δεν διαθέτει δική του οθόνη και λογισμικό αποτύπωσης των αποτελεσμάτων. Όλα ρυθμίζονται και οι μετρήσεις εξάγονται με το κατάλληλο λογισμικό που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ τους μέσω του υπολογιστή.



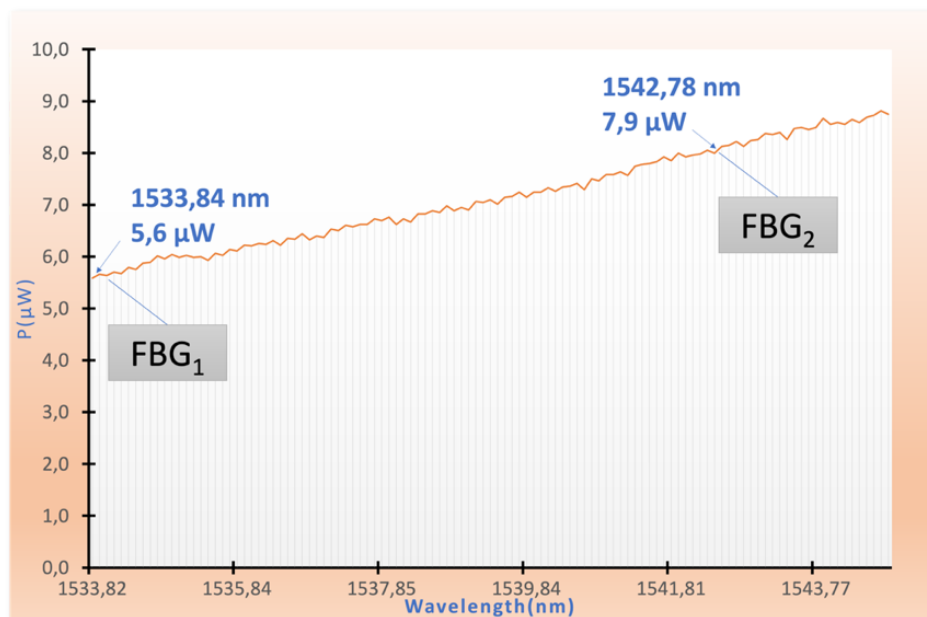
Σχήμα 2.3: Συνδεσμολογία BBS-OSA(Φορητός)-PC

Με βάση το σύστημα, το φάσμα μηκών κύματος που στέλνει η BBS κυμαίνεται από  $\lambda = 1518,42$  έως  $\lambda = 1568,13$  nm με μέγιστη ισχύ  $13,183 \mu\text{W}$  και κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda = 1560,88$  nm όπως φαίνεται στο παρακάτω Γράφημα 2.6.



Γράφημα 2.6: Φάσμα Εκπομπής της BBS με φορητό OSA

Εν συνεχεία, εντοπίζεται στο συνολικό φάσμα της BBS το κεντρικό μήκος κύματος για το κάθε FBG και παρατηρείται ότι έχουμε για το  $\text{FBG}_1$  με κεντρικό μήκος  $1533,84$  nm προσπίπτουσα ισχύς  $5,6 \mu\text{W}$  και για το  $\text{FBG}_2$  με κεντρικό μήκος  $1542,78$  nm προσπίπτουσα ισχύς  $7,9 \mu\text{W}$ . Η φασματική μεταξύ τους απόσταση είναι  $8,94$  nm. Οι τιμές των μετρήσεων των κεντρικών μηκών κύματος που ελήφθησαν με το φορητό σύστημα για το κάθε FBG είναι αρκετά κοντά όπως είχε ειπωθεί με αυτές του σταθερού συστήματος αυτό φαίνεται και στις τιμές της φασματικής τους απόστασης.

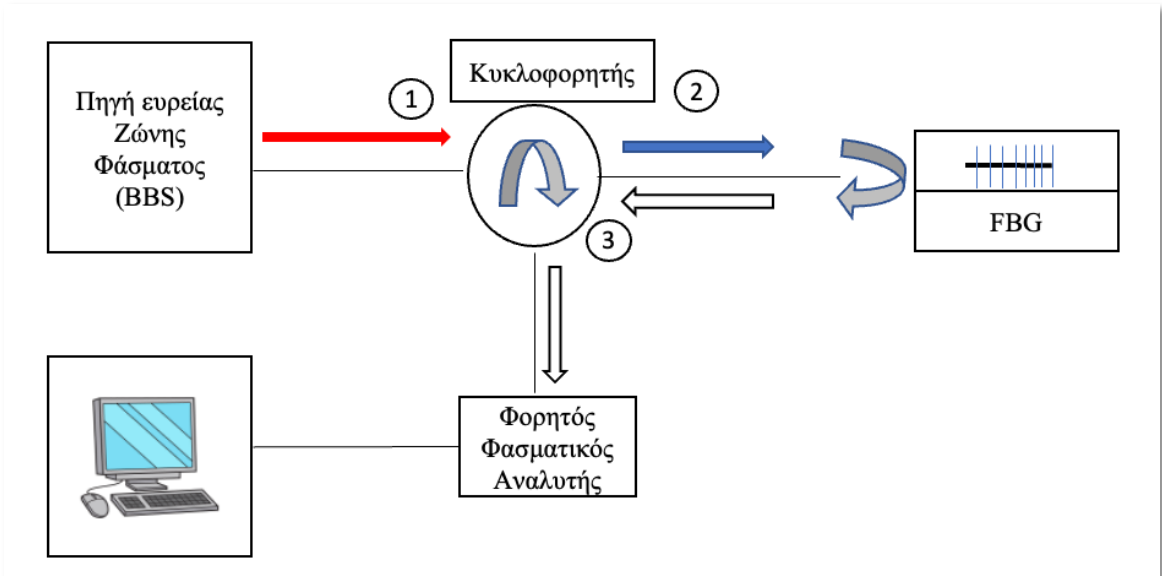


Γράφημα 2.7: Περιοχή Εγγραφής των  $\text{FBG}_1$  και  $\text{FBG}_2$  πάνω στην BBS με φορητό OSA

Στην επόμενη παράγραφο όπως είχε προαναφερθεί πραγματοποιείται ο υπολογισμός των ανακλαστικοτήτων με τις μετρήσεις που πάρθηκαν από το φορητό σύστημα και η σύνοψη των μετρήσεων που ελήφθησαν συνολικά και από τα δυο συστήματα.

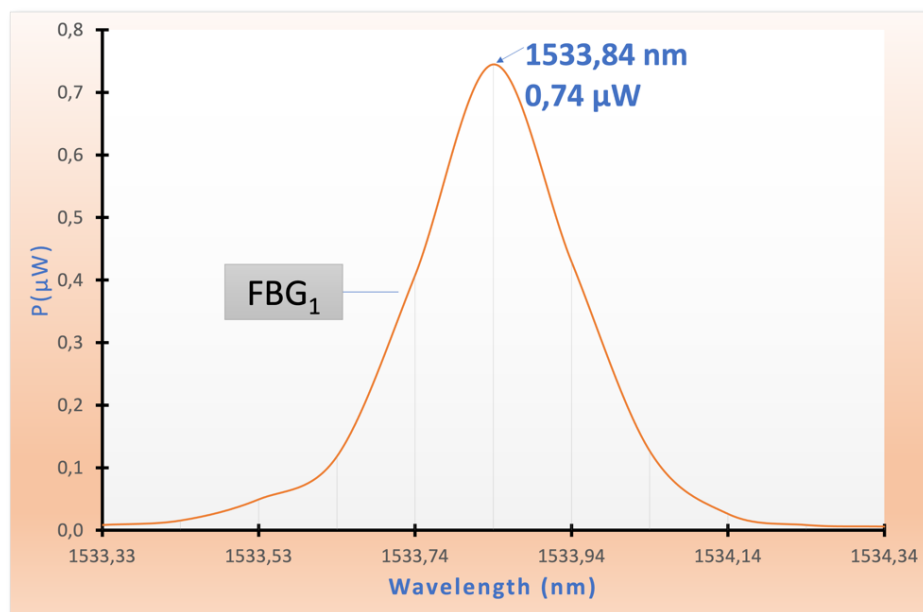
## 2.2.4 Υπολογισμός ανακλαστικότητας των ήδη διαθέσιμων FBG

Όπως στην παράγραφο 2.2.2 ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία μετρήσεων και υπολογισμών των ανακλαστικότητας προσθέτοντας τη μοναδική αλλαγή της βασικής πειραματικής διάταξης η οποία είναι αυτή του υπολογιστή και του φορητού συστήματος ανάγνωσης ενός FBG όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

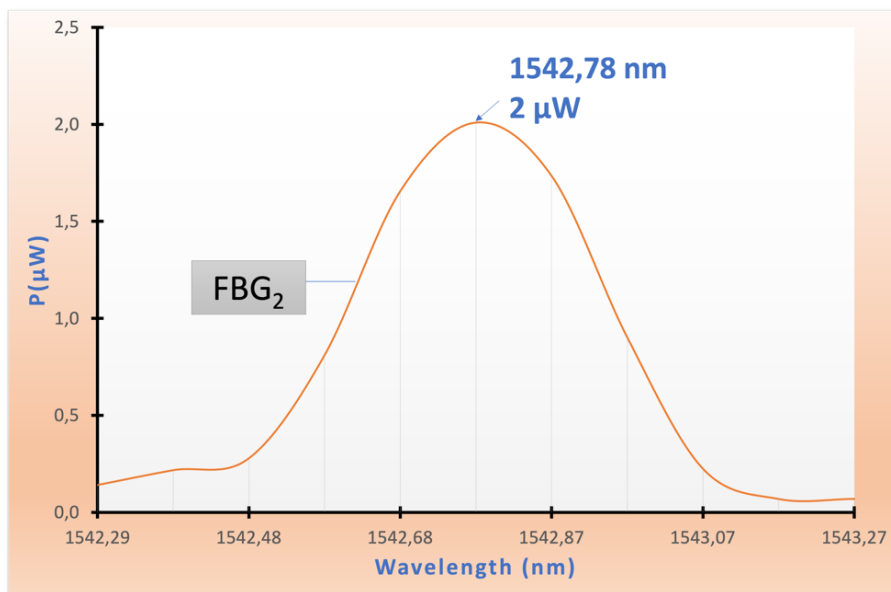


**Σχήμα 2.4:** Διάταξη Συνδεσμολογίας BBS-Κυκλοφορητής- Φορητός Οπτικός Αναλυτής με Η/Υ

Όπως προκύπτει από τον φορητό OSA, η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς για το  $FBG_1$  είναι  $0,74\mu W$  και για το  $FBG_2$  είναι  $2\mu W$ . Η απεικόνιση του φάσματος του  $FBG$  (1 και 2), όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, προέκυψε από λήψη 11 σημείων σε εύρος φάσματος  $1\text{ nm}$ , αριθμός σημείων αρκετά μικρός διότι ο φορητός OSA έχει μικρό RBW και με τη χρήση του λογισμικού παρεμβάλε τις μετρήσεις και μας εξάγει το φάσμα. Όπως βλέπουμε στα παρακάτω γραφήματα 2.16 και 2.17 ο εντοπισμός των κεντρικών κύματος είναι αρκετά κοντά με αυτές του σταθερού συστήματος. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι το φορητό σύστημα για να μπορέσει να απεικονίσει το ανακλώμενο φάσμα ενός  $FBG$  πρέπει να είναι φαρδύ και αυτό οφείλεται στα 11 σημεία που λαμβάνει υπόψη του σε εύρος  $1\text{ nm}$  για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της απεικόνισης του φάσματος.



**Γράφημα 2.8:** Φάσμα του  $FBG_1$  με φορητό OSA



**Γράφημα 2.9:** Φάσμα του FBG<sub>2</sub> με φορητό OSA

Για το κάθε FBG ξεχωριστά με τη χρήση του τύπου (2.1) για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας είναι:

$$FBG_1 = 13,21 \%, FBG_2 = 25,31 \%$$

Οι τιμές της ανακλώμενης ισχύος μεταξύ των δυο συστημάτων διαφέρουν αρκετά παρακολουθώντας τις αντίστοιχες διαφορές μεταξύ των τιμών της ισχύος. Αντίστοιχα διαφέρουν και στην απόλυτη τιμή του κεντρικού μήκους κύματος που μετρά ο φορητός σε σχέση με τον σταθερό OSA. Ωστόσο εμάς δεν μας ενδιαφέρει. Εμείς δίνουμε έμφαση στο αν διαβάζει σωστά την μετατόπιση του φάσματος κατά την άσκηση μηχανικών καταπονήσεων πάνω στην ίνα, διότι δεν θέλουμε απλά να μετρά το ανακλώμενο φάσμα ενός FBG. Ο συγκεκριμένος φορητός OSA είναι κατασκευασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να δουλεύει σε φάσμα περιορισμένου εύρους που αντιστοιχεί στα μήκη κύματος των FBG και να δείχνει το πόσο μετατοπίζεται το φάσμα όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις στην ίνα. Αυτό αξιολογείται παρακάτω στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο με την εφαρμογή σε διάταξη πρόβολου.

Η αύξηση αυτή στις τιμές της ισχύος όπως είχε αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2.3 οφείλεται στο RBW με αποτέλεσμα το κάθε μήκος κύματος  $\lambda$  να συγκεντρώνει πολλαπλάσια ισχύ από τα άλλα μήκη κύματος γύρω του γι' αυτό και εμφανίζονται αυτές οι διαφορές σε όλες τις μετρήσεις μεταξύ των δυο συστημάτων όπως φαίνεται στον συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων παρακάτω.

Φασματικοί Αναλυτές (Εύρος ζώνης)	RBW (nm)	FBG <sub>1</sub>			FBG <sub>2</sub>		
		Μήκος κύματος (nm)	Προσπίπτουσα Ισχύς BBS (μW)	Μέγιστη Ανακλώμενη Ισχύς (μW)	Μήκος κύματος (nm)	Προσπίπτουσα Ισχύς BBS (μW)	Μέγιστη Ανακλώμενη Ισχύς (μW)
Σταθερός OSA (1nm)	0,03	1534,246	1,620	0,2822	1543,356	2,361	0,5132
Φορητός OSA (1nm)	0,1	1533,84	5,6	0,74	1542,78	7,9	2

**Πίνακας 2.1:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων των δυο φασματικών οπτικών αναλυτών για τα FBG<sub>1</sub> και FBG<sub>2</sub>

FBG	Ανακλαστικότητα με σταθερό οπτικό αναλυτή φάσματος (%)	Ανακλαστικότητα με τον φορητό οπτικό αναλυτή φάσματος (%)
FBG <sub>1</sub>	17,41	13,21
FBG <sub>2</sub>	21,73	25,31

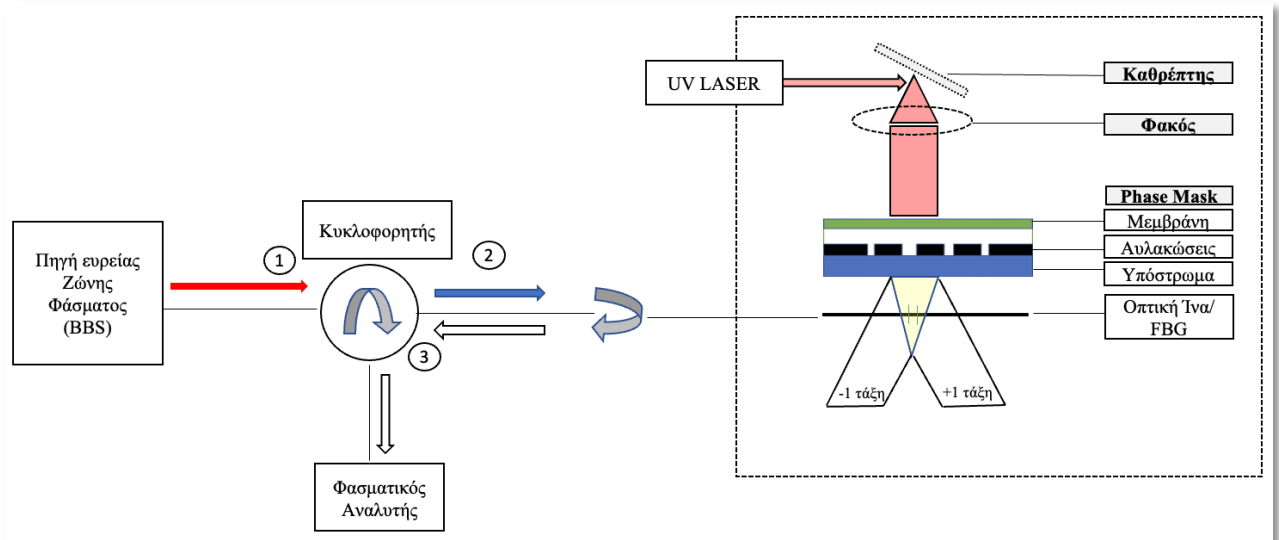
**Πίνακας 2.2:** Συγκεντρωτικά ποσοστιαία αποτελέσματα των ανακλαστικότητων για τα FBG<sub>1</sub> και FBG<sub>2</sub>

Αυτή η διαφορά στις τιμές των ανακλαστικότητων οφείλεται πάλι στο RBW και τον αριθμό των σημείων καθώς όπως δείχθηκε για τον υπολογισμό των ανακλαστικότητων λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές της ισχύος (ανακλώμενης και προσπίπτουσας). Καθώς ο κατασκευαστής του φορητού συστήματος για να κερδίσει κόστος ακολουθεί την γκαουσιανή μέθοδο προσέγγισης και παρεμβολής, έχοντας λιγότερα σημεία και παρεμβάλλοντας ανάμεσα σε αυτά τα σημεία με γκαουσιανή καμπύλη με τη χρήση λογισμικού έχει σαν αποτέλεσμα ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί η ανακλαστικότητα που επιτυγχάνει ο σταθερός OSA.

Στην επόμενη ενότητα θα δείχθει η διαδικασία εγγραφής των FBG στο εργαστήριο με τη χρήση της Phase Mask και στη συνέχεια θα χαρακτηριστούν με την διαδικασία ανάγνωσης που δείξαμε στις προηγούμενες παραγράφους πριν φτάσουμε στην εγγραφή.

### 2.3 Εγγραφή FBG Τεχνικής Phase Mask στο Εργαστήριο

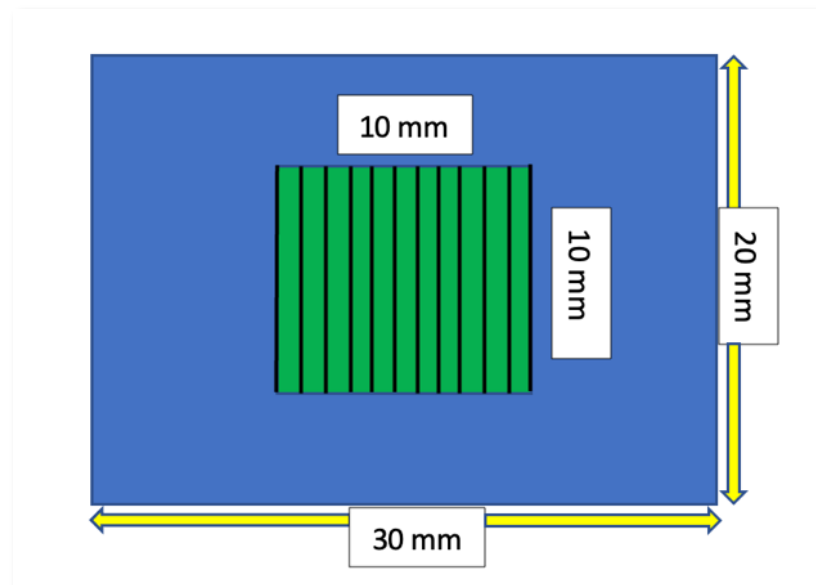
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκαν φωτοευαίσθητες ίνες, με σκοπό να εγγραφούν δύο νέα FBG, τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>, μέσω της διαδικασίας εγγραφής αισθητήρων με μάσκα (Phase Mask) στο Εργαστήριο Οπτικών Ινών, παρουσιάζεται όλη η τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία στο παρακάτω Σχήμα 2.5.



**Σχήμα 2.5:** Συνδεσμολογία FBG – Phase Mask

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν ορισμένα τεχνικά στοιχεία για την μάσκα εγγραφής. Η εν λόγω μάσκα έχει περιοδικότητα εγγραφής (pitch)  $\Lambda_p=1060$  nm, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγγραφή

σε φωτοευαίσθητη οπτική ίνα, μέσω laser εκπομπής UV στα 266 nm. Η διάμετρος δέσμης του λέιζερ είναι 6 mm. Οι διαστάσεις της μάσκας παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 2.6.



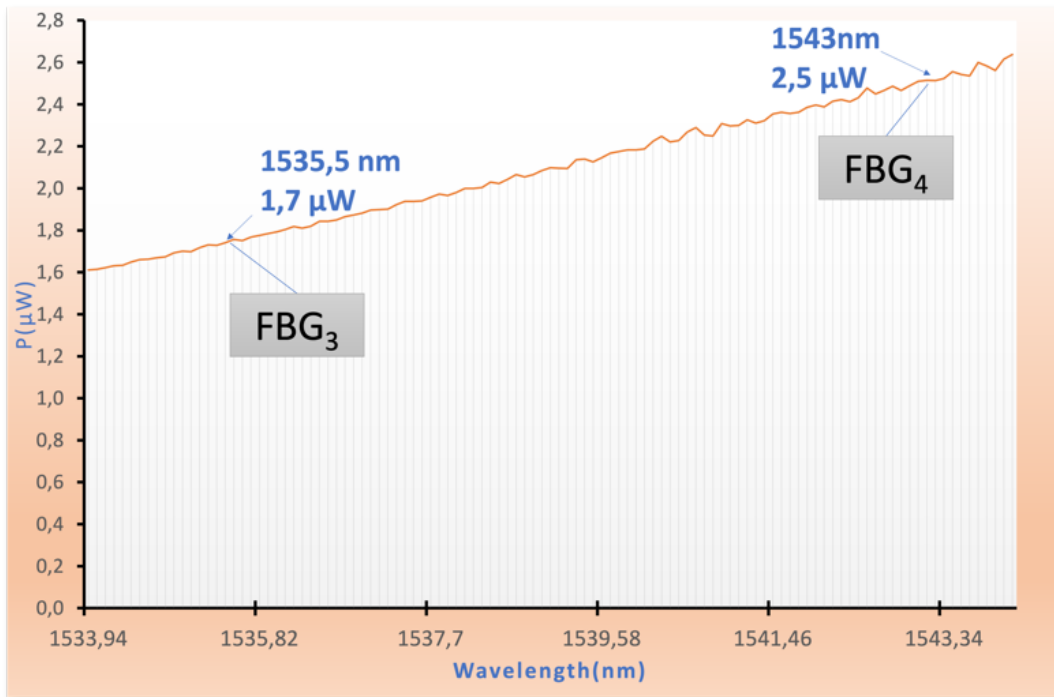
Σχήμα 2.6: Διαστάσεις Μάσκας Φάσης (Phase Mask)

Η διαδικασία υλοποίησης εγγραφής των FBG (FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>), μέσω της Phase Mask, στο εργαστήριο γίνεται ως εξής:

Αρχικά όπως έχουμε αναφέρει και στο κεφάλαιο 1, η ακτίνα UV που εκπέμπει το laser προσπίπτει σε έναν καθρέπτη και αλλάζει κατεύθυνση κατά 90°. Μετά η δέσμη των 6 mm προσκρούει σε έναν άλλον καθρέπτη και εκεί ανακατευθύνεται προς έναν κυλινδρικό φακό ο οποίος την συγκεντρώνει οριοθετώντας την σε μια μόνο διάσταση (ευθεία) πριν εισέλθει στη μάσκα. Καθώς προσπίπτει η δέσμη στη μάσκα εξαιτίας των αυλακώσεων που έχουν φτιαχτεί στο πάνω στη μάσκα και τον διαφορετικό δείκτη διάθλασης που παρουσιάζει διαθλάται. Σχηματίζοντας δυο ακτίνες που συμβάλουν μεταξύ τους όταν η ίνα βρεθεί στη κίτρινη περιοχή του Σχήματος 2.5. Η φωτοευαίσθητη οπτική ίνα απαρτίζεται μόνο από τον πυρήνα και τον μανδύα και είναι τοποθετημένη ακριβώς μπροστά στη μάσκα στην κίτρινη περιοχή ώστε να βρίσκεται στο πεδίο της συμβολής. Καθώς βρίσκεται σε εξέλιξη η εγγραφή παρακολουθείται η ανακλώμενη ισχύς στο εύρος μηκών κύματος εγγραφής του FBG. Η εγγραφή διαρκεί λιγότερο από μια ώρα για κάθε FBG ξεχωριστά. Η διαδικασία διακόπτεται μόλις δούμε την ανακλώμενη ισχύ να αντιστοιχεί στην επιθυμητή.

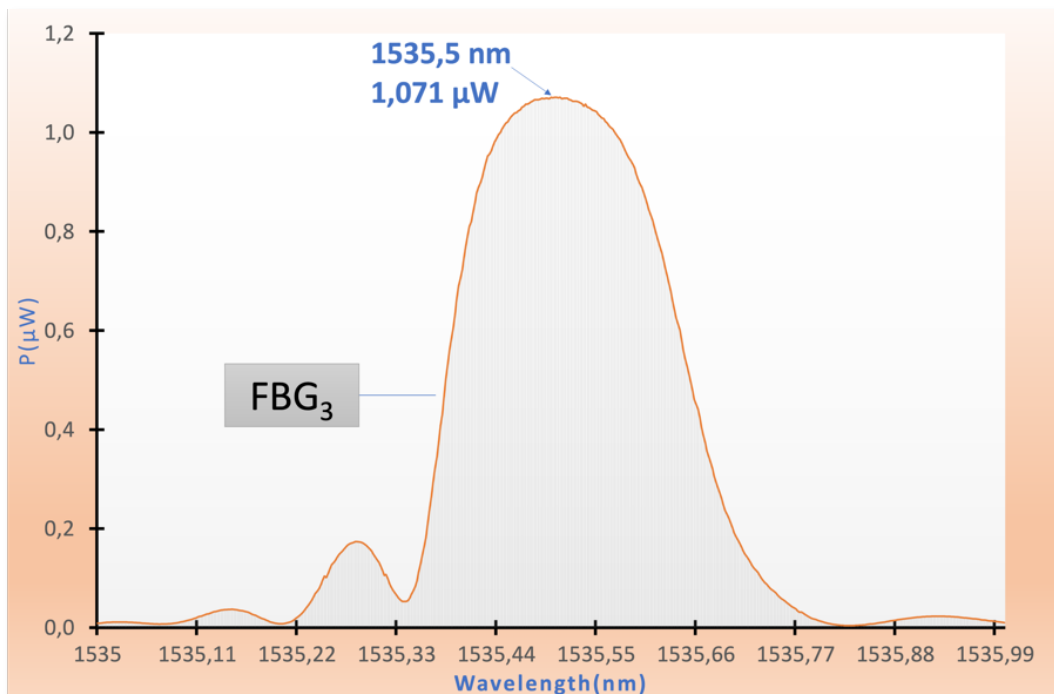
Επιπλέον, αναφέρεται ότι η διαδικασία εγγραφής FBG με Phase Mask προϋποθέτει τη λήψη ειδικών μέτρων ασφαλείας και προπαρασκευαστικών ενεργειών, με σκοπό την προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία του Laser (τάξεως των 266nm). Χρησιμοποιήθηκαν προστατευτικά πάνελς τα οποία καλύπτουν πλήρως την διαδρομή της δέσμης ώστε να μην διαφεύγει φως στο χώρο. Επιπρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν προστατευτικά γυαλιά ειδικά για το μήκος κύματος των 266nm και γάντια για πρόσθετη προστασία. Επίσης αφαιρέθηκε οτιδήποτε μεταλλικό αντικείμενο πχ ρολόγια υπήρχε είτε από τον πάγκο εργασίας είτε και τον χειριστή, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος τυχόν ανακλάσεων (αν και η διαδρομή ήταν προστατευμένη πλήρως).

Επαναλήφθηκε η διαδικασία μέτρησης των χαρακτηριστικών των νέων εγγεγραμμένων FBG (τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>), όπως ακριβώς πραγματοποιήθηκαν για τα προϋπάρχοντα (ήδη εγγεγραμμένα) FBG του εργαστηρίου. Συνεπώς, εντοπίστηκε στο φάσμα της BBS, το εκπεμπόμενο οπτικό κύμα πάνω στα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>. Τα κεντρικά μήκη κύματος ήταν 1535,5 nm και 1543,04 nm (με φασματική μεταξύ τους απόσταση 7.5 nm), ενώ η προσπίπτουσα ισχύς σε αυτά είναι 1.7 μW και 2.5 μW αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο παρακάτω Γράφημα 2.10.



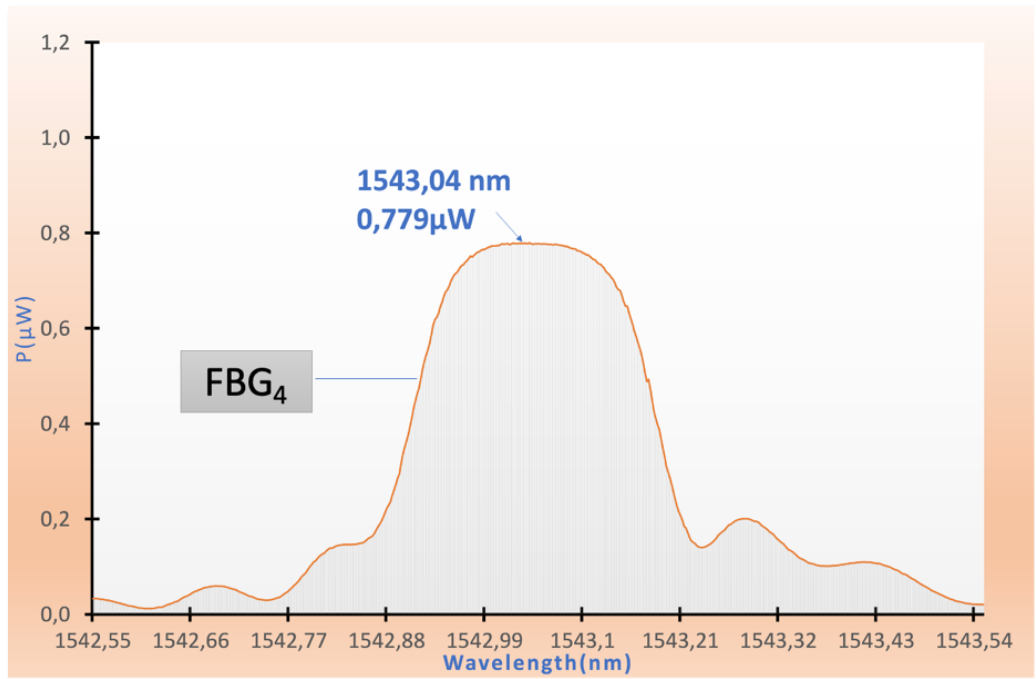
**Γράφημα 2.10:** Περιοχή Εγγραφής των FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> πάνω στην BBS με σταθερό OSA

Όπως προκύπτει από τον σταθερό OSA, η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς για το FBG<sub>3</sub> είναι 1,071 μW και για το FBG<sub>4</sub> είναι 0,779 μW. Η απεικόνιση του φάσματος ανακλαστικότητας των FBG (3 και 4), σε εύρος σάρωσης 1 nm, παρουσιάζεται στα παρακάτω Γραφήματα 2.11 και 2.12.



**Γράφημα 2.11:** Φάσμα του FBG<sub>3</sub> με σταθερό OSA





Γράφημα 2.12: Φάσμα του FBG<sub>4</sub> με σταθερό OSA

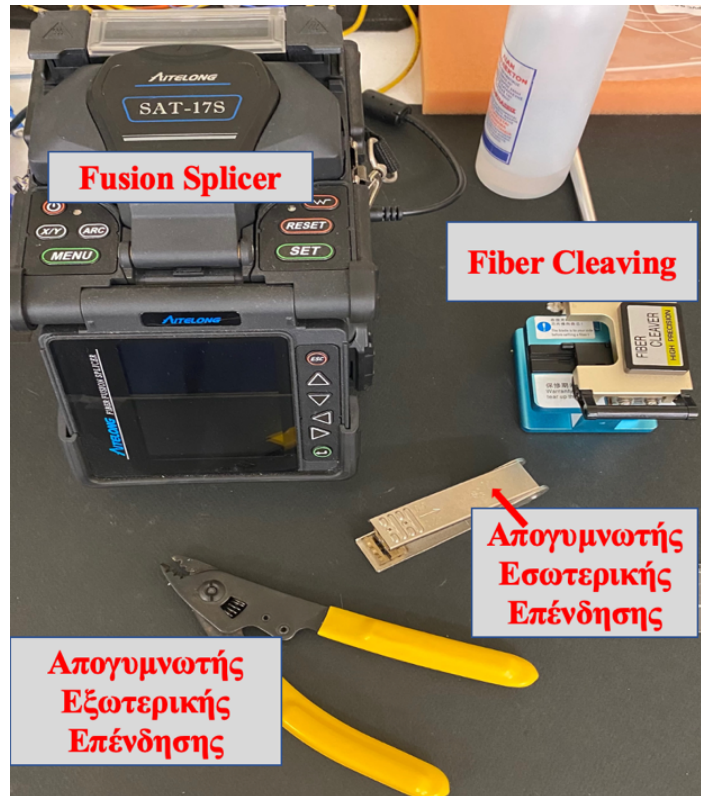
Η ανακλαστικότητα που προκύπτει για το κάθε FBG είναι :

$$\mathbf{FBG_3 = 63 \%, FBG_4 = 31,16 \%}$$

Στην επόμενη παράγραφο θα δειχθεί ο τρόπος συγκόλλησης μιας ίνας με μια άλλη ώστε να γίνει μια ενιαία και να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στο δοκίμιο. Αυτή η ενιαία ίνα πλέον θα φέρει πάνω της τα 2 FBG με σκοπό παρακάτω τη χρήση του ενός για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση και του άλλου για μέτρηση των μηχανικών καταπονήσεων. Τέλος σε αυτή την παράγραφο θα παρθεί μέτρηση σε κατάσταση ηρεμίας με τους δυο διαθέσιμους φασματικούς αναλυτές ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρξει κάποια μεταβολή σε σχέση με χωριστά τα δυο FBG.

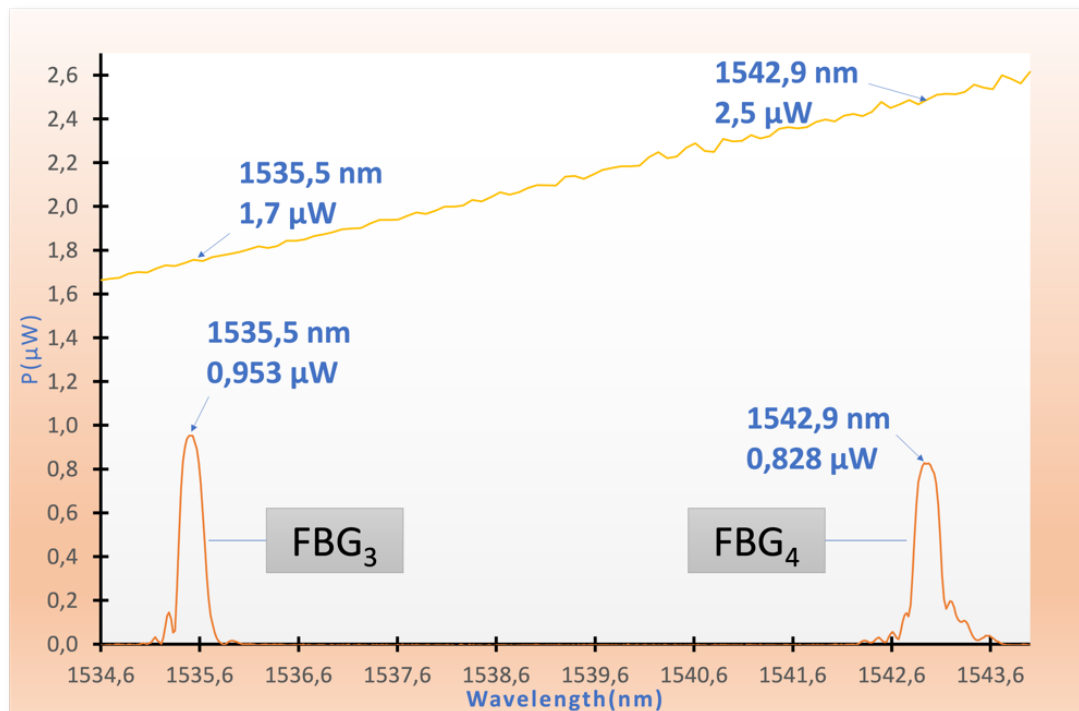
### 2.3.1 Συγκόλληση των δύο FBG σε σειρά

Η συγκόλληση μιας οπτικής ίνας χρειάζεται μεγάλη προσοχή για να μην τραυματίσουμε ή σπάσουμε την ίνα. Αρχικά αφαιρέσαμε την εξωτερική επένδυση στο άκρο της ίνας με τη χρήση ενός απογυμνωτή και στη συνέχεια με έναν άλλο απογυμνωτή το jacket χωρίς να τραυματιστεί η ίνα. Στη συνέχεια την τοποθετήσαμε σε ένα Fiber Cleaving για να κοπεί η ίνα τέλεια χωρίς κάποια προεξοχή. Έπειτα αφού κάναμε την ίδια διαδικασία και στην άλλη ενεργοποιήσαμε τον Fusion Splicer και τοποθετήσαμε τις δυο οπτικές ίνες ώστε να συγκολληθούν. Έπειτα αφού συγκολλήσαμε (ενώσαμε) τις δυο φωτοευαίσθητες ίνες που περιέχουν τα δυο καινούργια FBG μεταξύ τους, εξήχθησαν μετρήσεις και παρουσιάστηκαν σε συγκεντρωτικά γραφήματα της ισχύος που λαμβάνει από το κάθε FBG στο δικό του κεντρικό μήκος κύματος και την μέγιστη ανακλώμενη ισχύ αντίστοιχα.



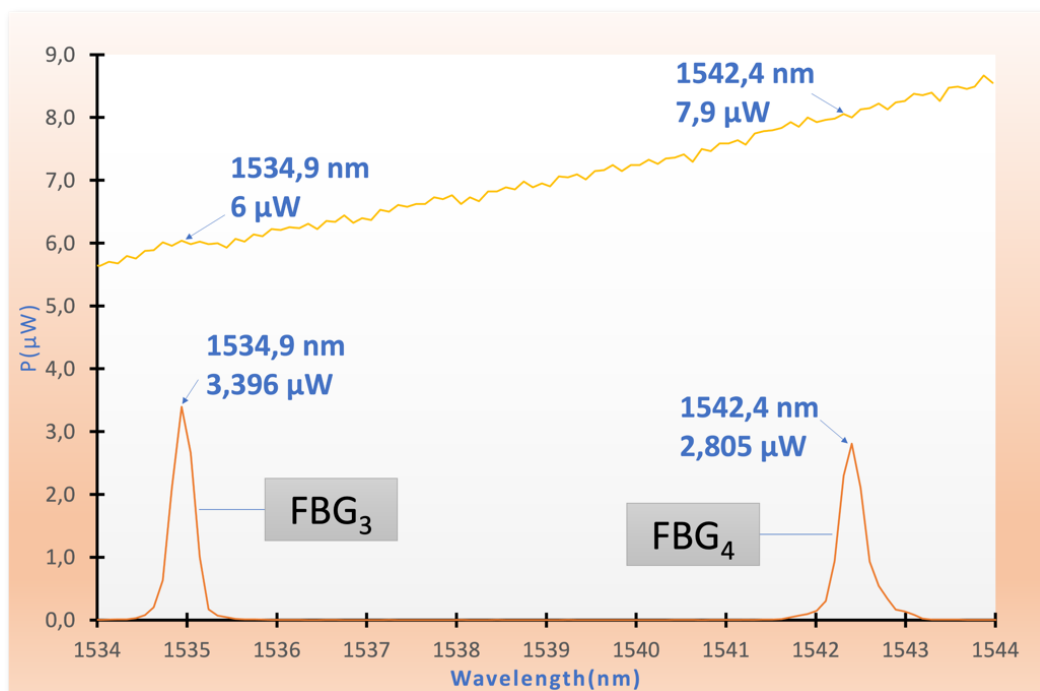
Εικόνα 2.5: Απαραίτητα εργαλεία για την συγκόλληση μιας οπτικής ίνας

Προβαίνουμε σε μετρήσεις, με τον σταθερό Οπτικό Αναλυτή OSA, για τα  $FBG_3$  και  $FBG_4$ . Εντοπίστηκαν: α) για το  $FBG_3$ , το κεντρικό μήκος είναι 1535,5 nm, η προσπίπτουσα ισχύς είναι 1,7  $\mu W$  και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 0,953  $\mu W$ , β) για το  $FBG_4$ , το κεντρικό μήκος είναι 1542,9 nm, η προσπίπτουσα ισχύς είναι 2,5  $\mu W$  και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 0,828  $\mu W$ .



Γράφημα 2.13: Η απόκριση των  $FBG_3$  και  $FBG_4$  συγκολλημένων σε σειρά με σταθερό OSA

Εν συνέχεια, προβαίνουμε σε μετρήσεις, με τον φορητό οπτικό φασματικό αναλυτή, για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>. Εντοπίστηκαν: α) για το FBG<sub>3</sub>, το κεντρικό μήκος είναι 1534,9 nm, η προσπίπτουσα ισχύς είναι 6 μW και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 3,396 μW, β) για το FBG<sub>4</sub>, το κεντρικό μήκος είναι 1542,4 nm, η προσπίπτουσα ισχύς είναι 7,9 μW και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 2,805 μW.



Γράφημα 2.14: Η απόκριση των FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> συγκολλημένων σε σειρά με φορητό OSA

Οι ανακλαστικότητες

Με σταθερό οπτικό αναλυτή : **FBG<sub>3</sub> = 56,05 %** και **FBG<sub>4</sub> = 33,12 %**

Με φορητό οπτικό αναλυτή : **FBG<sub>3</sub> = 56,6 %** και **FBG<sub>4</sub> = 35,5 %**

Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 3.2 με συγκεντρωμένα όλες οι ανακλαστικότητες που πάρθηκαν από τους δυο φασματικούς αναλυτές για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>.

Διακριτά FBG	Φασματικός οπτικός αναλυτής εργαστηρίου			Φορητός φασματικός οπτικός αναλυτής		
	Μήκος κύματος (nm)	Μέγιστη Ανακλώμενη Ισχύς (μW)	Ανακλαστικότητες (%)	Μήκος κύματος (nm)	Μέγιστη Ανακλώμενη Ισχύς (μW)	Ανακλαστικότητες (%)
FBG <sub>3</sub>	1535,5	1,071	63,16			
FBG <sub>4</sub>	1543,04	0,779	31,16			
<b>FBG Σε σειρά συνδεδεμένα</b>						
FBG <sub>3</sub>	1535,5	0,953	56,05	1534,9	3,396	56,06
FBG <sub>4</sub>	1542,9	0,828	33,12	1542,4	2,805	35,5

Πίνακας 2.3: Αποτελέσματα των ανακλαστικότητων για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>

Ο λόγος για τον οποίο συγκολλήθηκαν οι δυο φωτοευαίσθητες ώστε να έχουμε τα δυο FBG σε αυτή την εφαρμογή είναι γιατί θα χρειαζόταν διακόπτης στην μέτρηση πράγμα ασύμφορο το ίδιο θα συνέβαινε αν είχαμε περισσότερα FBG να μετρήσουμε. Σε περίπτωση που κάποιος θέλει να μετρήσει τις μηχανικές καταπονήσεις που ασκούνται σε όλο το μήκος π.χ. ενός προβόλου δεν θα χρειαστεί μόνο ένα FBG όπως κάναμε εμείς στην εφαρμογή αλλά πολλά περισσότερα. Γιατί όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση του βάρους από το σημείο πάκτωσης της ράβδου, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιμήκυνση της ίνας (μεγάλο τέντωμα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μετατοπίζεται διαφορετικά το κεντρικό μήκος κύματος από σημείο σε σημείο. Οπότε έχοντας τοποθετήσει σε σειρά τα FBG μπορεί κάποιος να δει τι συμβαίνει σε όλη την ράβδο με μια μόνο μέτρηση δίχως χρήση διακοπών για την μέτρηση των FBG κατά μήκος της ράβδου. Για να μπορέσει κάποιος να ενώσει δυο FBG και παραπάνω σε σειρά πρέπει να λάβει υπόψη του το μήκος εγγραφής του καθενός ξεχωριστά. Το μήκος αυτό θα πρέπει να είναι διαφορετικό σε κάποια λογική απόσταση ώστε να μην πέφτει το ένα πάνω στο άλλο και δημιουργούνται πολλαπλές ανακλάσεις με αποτέλεσμα να μην τα ξεχωρίζει αυτός που τα διαβάζει τι μετρά. Επιπλέον κατά την συγκόλληση μεταξύ τους στα σημεία συγκόλλησης μπορεί να υπάρξουν κάποιες απώλειες ή και ανακλάσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη αν είναι κρίσιμες ή όχι. Στην περίπτωση που είναι κρίσιμες εφόσον γίνεται θα αποκοπούν τα σημεία ένωσης και θα συγκολληθούν ξανά ή θα ξαναγραφούν καινούρια ακολουθώντας όλη την διαδικασία από την αρχή. Στην δική μας συγκόλληση, μετά τη συγκόλληση των δυο ινών που φέρουν πάνω τους τα FBG παρατηρούνται μικρές μεταβολές οι οποίες είναι λόγω της συγκόλλησης όπως ειπώθηκε νωρίτερα. Οι μεταβολές αυτές κρίνονται λογικές και μη κρίσιμες καθώς δεν επηρεάζουν ούτε παραμορφώνουν τα ανακλώμενα μήκη κύματος.

Απ' όλη τη διαδικασία εγγραφής διαπιστώθηκε σύμφωνα με την σχέση (1.1) ότι εφόσον η περιοδικότητα εγγραφής  $\Lambda$  της μάσκας είναι σταθερή στα 1060 nm και μπορεί μέσω της διαδικασίας της ανάγνωσης να μετρηθεί το κεντρικό μήκος κύματος ανακλαστικότητας  $\lambda_B$ . Γνωρίζοντας πλέον αυτά τα δυο μπορεί να υπολογιστεί ο πραγματικός ενεργός δείκτης διάθλασης  $n_{eff}$  στην θερμοκρασία που πάρθηκε η μέτρηση του ανακλώμενου φάσματος ενός FBG. Με αυτήν την αφορμή στην επόμενη ενότητα θα δειχθούν όλοι οι τρόποι υπολογισμών του ενεργού δείκτη διάθλασης  $n_{eff}$ .

## 2.4 Θεωρητικός και Πειραματικός Υπολογισμός του Ενεργού Δείκτη Διάθλασης

Αρχικά θα πραγματοποιηθεί υπολογισμός του ενεργού δείκτη διάθλασης ( $n_{eff}$ ) μέσω γραφημάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 με βάση τη σχέση (1.1) ο ενεργός δείκτης διάθλασης  $n_{eff}$  μιας μονορυθμικής ίνας μπορεί να προκύψει από το κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B$  της ανακλώμενης μέγιστης ισχύς του κάθε FBG, καθώς και από την περιοδικότητα εγγραφής  $\Lambda$  αυτών.

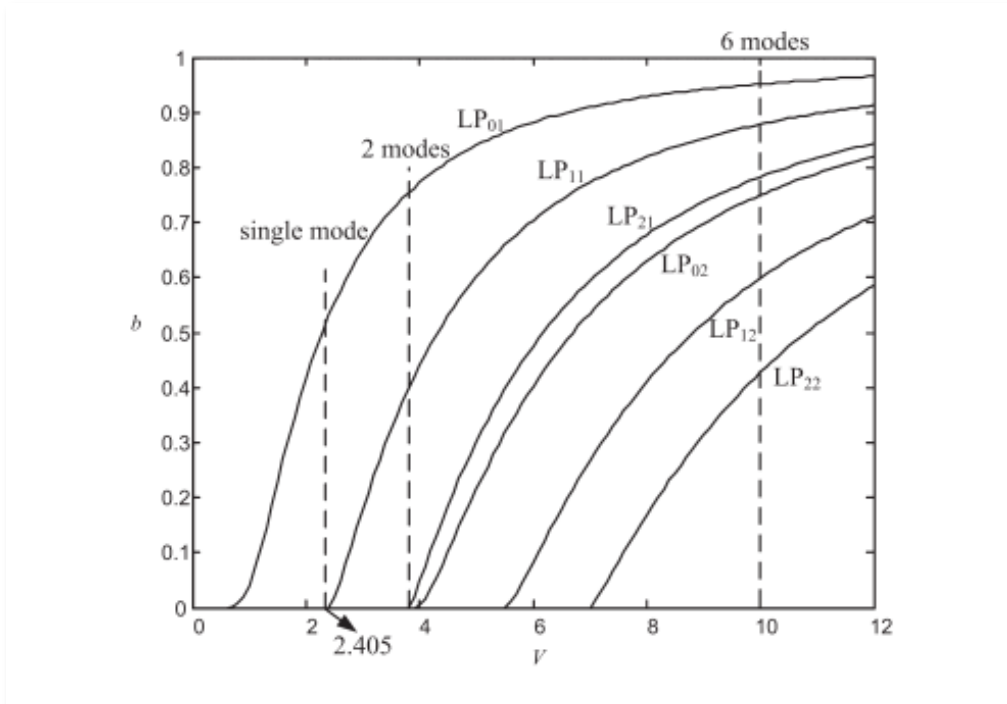
Ο ενεργός δείκτης διάθλασης  $n_{eff}$  αποτελεί έκφραση της σχετικής σταθεράς διάδοσης  $b$ , καθώς για να υπολογιστεί χρειάζεται τους δείκτες διάθλασης του πυρήνα και μανδύα. Υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$b = \frac{n_{eff}^2 - n_{cl}^2}{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.2)$$

όπου  $n_{co}$  είναι ο δείκτης διάθλασης πυρήνα, ο  $n_{cl}$  είναι ο δείκτης διάθλασης μανδύα και το  $b$  είναι η κανονικοποιημένη ή σχετική σταθερά διάδοσης [17],[26].

Με βάση την σχέση (2.2) παρατηρείται ότι το  $n_{eff}$  επηρεάζεται από την τιμή του  $n_{co}$ . Πιο συγκεκριμένα η τιμή του δείκτη διάθλασης του πυρήνα  $n_{co}$  καθορίζεται και από τις μεταβολές της θερμοκρασίας παρεμβαίνοντας έτσι στην τιμή του  $n_{eff}$ .

Από το ακόλουθο διάγραμμα διασποράς του γραφήματος 2.15, υπολογίζεται η κανονικοποιημένη σταθερά διάδοσης  $b$  και η συχνότητα  $V$  της οπτικής ίνας (Η κανονικοποιημένη συχνότητα  $V$  προσδιορίζει τον αριθμό ρυθμών διάδοσης  $M$  μίας πολύτροπης ίνας).



**Γράφημα 2.15:** Κανονικοποιημένη Συχνότητα  $V$  σε συνάρτηση με τη σταθερά Διάδοσης  $b$

Πηγή: <https://media.cheggcdn.com/media/86d/86dc8555-8630-48d7-9539-f47a1666837e/phpgZLRyo.png> (10/4/23)

Το  $V$  συσχετίζει την ακτίνα του πυρήνα με το μήκος κύματος λειτουργίας κανονικοποιημένα ως εξής:

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \alpha NA \quad (2.3)$$

όπου το  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος,  $\alpha$  είναι η ακτίνα του πυρήνα,  $NA$  το αριθμητικό άνοιγμα της ίνας. Το  $NA$  υπολογίζεται από το  $n_{cl}$  που είναι δείκτης διάθλασης του μανδύα και το  $n_{co}$  που είναι ο δείκτης διάθλασης πυρήνα ως εξής: :

$$V = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \alpha \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.4)$$

Στις step index μονορυθμικές ίνες το σημείο αποκοπής του επόμενου από τον βασικό ρυθμό LP01, ρυθμού LP11 αντιστοιχεί σε  $V = 2,405$ . Αυτό σημαίνει ότι όταν αυτή η τιμή ξεπεραστεί δηλαδή για  $V > 2,405$  έχουμε πολυρυθμική διάδοση.

Παρατηρείται με βάση τον τύπο (2.4) ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος  $\lambda$  τόσο μικρότερη τιμή έχει η κανονικοποιημένη συχνότητα  $V$ . Όταν η τιμή του  $V$  αυξάνεται σε μεγάλες τιμές το κύμα διαδίδεται μόνο στον πυρήνα με αποτέλεσμα η τιμή του  $n_{eff}$  να τείνει προς αυτή του  $n_{co}$ . Τονίζεται ότι οποιαδήποτε μεταβολή του ενεργού δείκτη  $n_{eff}$  ή του  $L$  (επιμήκυνση ή συρρίκνωση) θα έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος  $\lambda_B$  του ανακλώμενου του FBG. [17],[30]

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοευαίσθητων οπτικών ινών που είναι εγγεγραμμένα τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> που αναγράφονται στον πίνακα 2.4 προήλθαν από τα datasheet των κατασκευαστών. Πιο συγκεκριμένα παρέχουν για τον εκάστοτε τύπο φωτοευαίσθητης ίνας το  $NA$ ,  $n_{cl}$  και τη διάμετρο του πυρήνα. Από το  $NA$  και το  $n_{cl}$  μπορεί να υπολογιστεί το  $n_{co}$ .

Τεχνικά χαρακτηριστικά των FBG						
Ίνα	FBG	Κεντρικό Μήκος Κύματος $\lambda$ (nm)	Δείκτης διάθλασης πυρήνα $n_{co}$	Δείκτης διάθλασης μανδύα $n_{cl}$	Αριθμητικό άνοιγμα της ίνας (NA)	Διάμετρος πυρήνα (μm)
GF1AA	FBG <sub>3</sub>	1535,5	1,44993	1,4441	0,13	8,5
GF4A	FBG <sub>4</sub>	1543,04	1,47493	1,4441	0,3	3,5

**Πίνακας 2.4:** Πίνακας χαρακτηριστικών των FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> σύμφωνα με τον κατασκευαστή

Παρατηρείται ότι η τιμή του δείκτη διάθλασης πυρήνα  $n_{co}$  είναι διαφορετική του ενός τύπου φωτοευαίσθητης οπτικής ίνας με του άλλου αυτό οφείλεται γιατί αφορά τον πυρήνα της ίνας ο οποίος πέρα από το υλικό του γυαλιού έχει γερμάνιο (Ge) που έχει υδρογονοποιηθεί. Άλλος λόγος οφείλεται στην μεταβολή της θερμοκρασίας. Η τιμή του είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από τον δείκτη διάθλασης του μανδύα  $n_{cl}$  διότι πρέπει να έχουμε χαλαρή κυματοδότηση. Το  $n_{cl}$  μένει σταθερό καθώς δεν περιέχει κανένα είδος νόθευσης πέρα από την συγκεκριμένη σύνθεση του γυαλιού που απαρτίζεται το υλικό του μανδύα της ίνας.

Αρχικά υπολογίζουμε τις αντίστοιχες κανονικοποιημένες συχνότητες  $V$  με χρήση του τύπου (2.3) για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>, οπότε προκύπτει ότι  $V(\text{FBG}_3) = 2,261$  και  $V(\text{FBG}_4) = 2,137$ . Στη συνέχεια από το Γράφημα 2.15, εντοπίζονται οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες σταθερές διάδοσης  $b$  για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> και προκύπτει ότι  $b(\text{FBG}_3) \cong 0,5$  και  $b(\text{FBG}_4) \cong 0,49$ . Τέλος με την χρήση της σχέσης (2.2) για τη σταθερά  $b$  προκύπτουν οι ενεργοί δείκτες διάθλασης  $n_{eff}$  για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>, όπως αποτυπώνονται παρακάτω :

$$n_{eff(\text{FBG}_3)} \cong 1,44701 \text{ nm και } n_{eff(\text{FBG}_4)} \cong 1,45928 \text{ nm}$$

Οι τιμές αυτές φαίνονται λογικές αλλά δεν γίνεται να κρατηθούν καθώς η προσέγγιση της τιμής του  $b$  πραγματοποιείται με το χέρι μέσω του γραφήματος, ως αποτέλεσμα να είναι προσεγγιστικές. Εξαιτίας αυτού για μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία προβαίνουμε στην επίλυση της εξίσωσης διασποράς μέσω κώδικα στο Matlab. Η εξίσωση διασποράς επιλύεται μόνο με υπολογιστή και τη βοήθεια έτοιμων συναρτήσεων της βιβλιοθήκης Bessel η οποία είναι [30]:

$$U \frac{J_{l\pm 1}(U)}{J_l(U)} = \pm W \frac{K_{l\pm 1}(W)}{K_l(W)} \quad (2.5)$$

Όπου  $U = \sqrt{\beta_1 - \beta}$  για τον μανδύα,  $W = \sqrt{\beta - \beta_2}$  για τον πυρήνα,  $J_l$  η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και τάξης  $l$  και  $K_l$  τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και τάξης  $l$ . Επιπλέον όπου  $\beta_1 = n_{co} k_0$  η σταθερά διάδοσης για τον πυρήνα και  $\beta_2 = n_{cl} k_0$  η σταθερά διάδοσης για τον μανδύα.

Για την εύρεση του  $n_{eff}$  μέσω του κώδικα θα χρειαστούν επιπλέον οι εξής τύποι :

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k_0} \quad (2.6)$$

όπου  $\beta$  ο συντελεστής σταθεράς διάδοσης φάσης και  $k_0 = 2\pi/\lambda$  ο κυματαριθμός. Επιπλέον η κανονικοποιημένη συχνότητα  $V$  μπορεί να υπολογιστεί και από την εξής σχέση μέσω των μεταβλητών  $U$  και  $W$  της συνάρτησης Bessel στις αντίστοιχες περιοχές πυρήνα και μανδύα της ίνας.

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} \quad (2.7)$$

Ακολουθεί η παρουσίαση του κώδικα έχοντας σαν σχόλιο ακριβώς τι υπολογίζεται στην κάθε του γραμμή.

Υπολογισμός του ενεργού δείκτη διάθλασης ( $n_{eff}$ ) με χρήση κώδικα [30],[31]

Αρχικά είναι ο υπολογισμός του ενεργού δείκτη διάθλασης για το FBG<sub>3</sub>

```
clear workspace;
clc; %Clear Command Window
clearvars; %Clear variables from memory
global V % Κανονικοποιημένη συχνότητα V (κάνοντας την παράμετρο V κοινή για τις συναρτήσεις
που χρησιμοποιούν την εντολή αυτή).
lamdaB=1535.5e-9; %Κεντρικό Μήκος Κύματος λ_B(nm)
ko=2*pi/lamdaB; % Υπολογισμός κυματαριθμού
nco=1.44993; %Δείκτης διάθλασης πυρήνα n_co
ncl=1.4441; %Δείκτης διάθλασης μανδύα n_cl
a= 4.25e-6; %Ακτίνα πυρήνα (μm) = Διάμετρος/2
V=ko*a*sqrt(nco^2-ncl^2); %Υπολογισμός της κανονικοποιημένης συχνότητας V
Uo=fzero(@LP,V-.9);% Με αυτόν τον τρόπο στο matlab ορίζεται η fzero . Δηλαδή υπολογίζει για
ποιο U που είναι η παράμετρος ακτινικής φάσης του πυρήνα η LP γίνεται 0 με εύρος περιοχής που
μπορεί να οριστεί από .4 έως και .9 .
beta = sqrt(ko^2*nco^2-(Uo/a).^2); %Υπολογισμός σταθεράς διάδοσης φάσης β
b=((beta/ko)^2-ncl^2)/(nco^2-ncl^2); %Υπολογισμός κανονικοποιημένης σταθεράς διάδοσης b
neff = beta/ko; %Ενεργός δείκτης διάθλασης neff
fprintf('V=%i\n', V)
fprintf('β=%i\n', beta)
fprintf('b=%i\n', b)
fprintf('neff=%i\n', neff)

function Z=LP(U)
global V
W=sqrt(V^2-U.^2);%Υπολογισμός παραμέτρου αποσύνθεσης μανδύα
Z=besselj(0,U)/(U.*besselj(1,U)) - besselk(0,W)/(W.*besselk(1,W));
% Χρήση συνάρτησης Bessel του matlab επίλυσης της εξίσωσης διασποράς για τους ρυθμούς LP.
% Οι τελείες που μπαίνουν πριν από κάποια πράξη δηλώνουν πράξη στοιχείο προς στοιχείο.
end
```

Εμφάνιση αποτελεσμάτων στο Command Window του Matlab

V=2.258940e+00

β=5.920963e+06

b=4.933746e-01

neff=1.446979e+00

Αντικαθιστώντας στον κώδικα τις παραμέτρους που αφορούν το FBG<sub>4</sub>

```
lamdaB=1543.04e-9; %Κεντρικό Μήκος Κύματος λ_B(nm)
```

```
nco=1.47493; %Δείκτης διάθλασης πυρήνα n_co
```

```
ncl=1.4441; %Δείκτης διάθλασης μανδύα n_cl
```

```
a= 1.75e-6; %Ακτίνα πυρήνα (μm) = Διάμετρος/2
```

Εμφανίζονται τα εξής αποτελέσματα στο Command Window του Matlab

V=2.137700e+00

β=5.938245e+06

b=4.588944e-01

neff=1.458329e+00

Τέλος ο πειραματικός υπολογισμός του ενεργού δείκτη διάθλασης ( $n_{eff}$ )

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού μας δίνει την τιμή του  $n_{eff}$  για την θερμοκρασία που έχει εγγραφεί. Πράγμα που δεν συμβαίνει στον κώδικα καθώς έχει υπολογιστεί για μια συγκεκριμένη άλλη θερμοκρασία η οποία δεν είναι αυτή που εγγράφηκε το FBG ή μετρήθηκε. Όπως έχει αναφερθεί στην εγγραφή των FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> με την τεχνική Phase Mask, η εν λόγω μάσκα έχει περιοδικότητα εγγραφής  $\Lambda_p=1060$  nm. Η περιοδικότητα εγγραφής είναι σταθερή και οφείλεται στις αυλακώσεις της μάσκας. Υπολογίζεται για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>, ο ενεργός δείκτης διάθλασης  $n_{eff}$  συναρτήσει του κεντρικού μήκους κύματος  $\lambda_B$  και της περιοδικότητας εγγραφής της μάσκας  $\Lambda_p$  ως ακολούθως:

$$n_{eff(FBG_3)} = \frac{\lambda_B}{\Lambda_p} = 1,44858 \text{ nm}$$

Ομοίως

$$n_{eff(FBG_4)} = 1,45569 \text{ nm}$$

Ενεργός Δείκτης Διάθλασης $n_{eff}$ (nm)			
FBG	Θεωρητικός (Γράφημα)	Με χρήση κώδικα	Πειραματικός
FBG <sub>3</sub>	1,44701	1,446979	1,44858
FBG <sub>4</sub>	1,45928	1,458329	1,45569

**Πίνακας 2.5:** Πίνακας αποτελεσμάτων του ενεργού δείκτη διάθλασης για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι οι τιμές αποκλίνουν μετά το τρίτο ψηφίο. Αυτό οφείλεται σε δυο παράγοντες. Ο πρώτος έχει να κάνει με το θερμο-οπτικό φαινόμενο που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.1 όπου με τη μεταβολή της θερμοκρασίας έχουμε αλλαγή του δείκτη διάθλασης του υλικού, διαφορετικό  $n_{co}$  ως αποτέλεσμα την μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος  $\lambda_B$ , ενώ ο δεύτερος λόγω προσέγγισης της τιμής του  $b$  μέσω γραφήματος. Αν και με τον κώδικα λόγω προγράμματος υπάρχει μεγάλη ακρίβεια βασιζόμενοι στο θεωρητικό υπόβαθρο εμείς θα κρατήσουμε σαν αναφορά τα πειραματικά σε υπολογισμούς που θα πραγματοποιηθούν σε επόμενα κεφάλαια διότι έχουν υπολογιστεί με βάση την θερμοκρασία του περιβάλλοντος που πάρθηκε η μέτρηση εκείνη τη στιγμή.

Έχοντας τις πειραματικές τιμές του  $n_{eff}$  που διαθέτουν την ακρίβεια και με βάση την θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση μπορούμε να γυρίσουμε πίσω στον κώδικα. Μεταβάλλοντας την τιμή του  $n_{co}$  σε μια περιοχή με δοκιμές, θα προσπαθήσουμε να πετύχουμε την τιμή του ώστε να βγάζει σαν αποτέλεσμα το πειραματικό  $n_{eff}$  του κάθε FBG. Εντοπίζοντας με αυτόν τον τρόπο την πραγματική τιμή του  $n_{co}$  στη θερμοκρασία που πάρθηκε η μέτρηση.

Αντικαθιστώντας το  $n_{co}=1.451851$ ; στον κώδικα έχει επιτευχθεί το πειραματικό  $n_{eff}$  του FBG<sub>3</sub> εμφανίζονται τα εξής αποτελέσματα στο Command Window του Matlab :

```
V=2.605514e+00
β=5.927515e+06
b=5.773819e-01
neff=1.448580e+00
```

Συμπεραίνοντας ότι το  $n_{co}$  της ίνας που είναι εγγεγραμμένο το FBG<sub>3</sub> είναι **1,451851**.



Παρατηρείται ότι η τιμή της κανονικοποιημένης συχνότητας  $V$  είναι 2,6 υπερβαίνοντας το όριο του 2,405 που κυματοδηγείται μόνο ο βασικός ρυθμός. Αυτό οφείλεται στο ότι δεν πρόκειται για κλασσική ίνα αλλά για φωτοευαίσθητη πράγμα που σημαίνει ότι έχει μεγαλύτερο αριθμητικό άνοιγμα  $NA$  από την κλασσική. Συνεπώς το  $NA$  σε συνδυασμό με την μεταβολή της θερμοκρασίας που αλλάζει η τιμή του  $n_{co}$  μπορεί ακόμη και σε μεγάλα μήκη κύματος να ξεπεραστεί αυτό το όριο ή να κυμαίνεται μεταξύ αυτού. Έχοντας ξεπεράσει το όριο του 2,405 της κανονικοποιημένης συχνότητας  $V$  κυματοδηγείται και δεύτερος ρυθμός. Συνεπώς μπορεί να υπάρξει απόκλιση στη προσομοίωση που θα δειχθεί στην επόμενη ενότητα καθώς τα αποτελέσματα της αφορούν μόνο τον βασικό ρυθμό κυματοδότησης.

Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία αυτή τη φορά για το FBG<sub>4</sub> και αντικαθιστώντας το  $n_{co}=1.4715$ ; στον κώδικα εμφανίζονται τα εξής αποτελέσματα στο Command Window του Matlab :

```
V=2.014095e+00
β=5.927502e+06
b=4.207172e-01
neff=1.455690e+00
```

Οπότε το  $n_{co}$  της ίνας που είναι εγγεγραμμένο το FBG<sub>4</sub> είναι **1,4715**.

Έχοντας πλέον συγκεντρώσει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά των FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> μπορούμε να προχωρήσουμε στην επόμενη ενότητα σε προσομοίωση όπου θα δειχθεί με βάση τις προδιαγραφές που διαθέτει ένα FBG που χρησιμοποιήσαμε στην πειραματική μας διάταξη ο εντοπισμός του κεντρικού ανακλώμενου μήκους κύματος και του ποσοστού της ανακλαστικότητας με χρήση κώδικα στο Matlab. Αυτό μας βοηθά να εντοπίσουμε με βάση το κεντρικό μήκος κύματος και την ανακλαστικότητα ενός FBG το συνολικό του μήκος και το βάθος διαμόρφωσης. Στοιχεία που δεν το γνωρίζαμε κατά την διάρκεια του πειράματος.

## 2.5 Προσομοίωση ανακλαστικότητας ενός FBG

Για την προσομοίωση χρειαζόμαστε το  $n_{eff}$ ,  $n_{co}$  του κάθε FBG στην θερμοκρασία που πάρθηκε η μέτρηση και το κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B$  του καθενός. Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης  $\Delta n$  και το συνολικό μήκος  $L$  προσαρμόζονται ανάλογα ώστε να επιτευχθεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό η προσαρμογή του πειραματικού ανακλώμενου φάσματος με εκείνο της προσομοίωσης όπως παρουσιάζεται στον κώδικα παρακάτω. Ο κώδικας βασίστηκε στην μέθοδο T-Matrix από την θεωρία Coupled Mode Theory (CMT) η οποία αναφέρθηκε στην ενότητα 1.1 σχέση (1.2).

```
clear workspace;
clc; %Clear Command Window
clearvars; %Clear variables from memory
neff=1.44858; %Ενεργός δείκτης διάθλασης
nco=1.451851; %Δείκτης διάθλασης πυρήνα n_co
lamdaB=1535.5e-9; %Κεντρικό Μήκος Κύματος λ_B(nm)
L=5.769e-3; %Συνολικό μήκος του FBG
LL=lamdaB/(2*neff);% Υπολογισμός περιодικότητας Λ
for i=1:250
lamda(i)=i*0.010e-9+1534.3e-9; % Μήκη κύματος για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας
% Σαρώνει για 250 φορές το 0,01 nm άρα πηγαίνει ανα 2,5 nm σε κάθε βήμα.
ko=2*pi/lamda(i);%Υπολογισμός κυματαριθμού
%-----CMT-----
delta=ko*neff-pi/LL;
```

```

E= 15844;
ksi=j*ko*nco/(E);% Υπολογισμός ποσοστού αλλαγής δείκτη διάθλασης Δn
gamma=sqrt(abs(ksi)^2-delta^2);
T=[cosh(gamma*L/2)+1j*delta*sinh(gamma*L/2)/gamma, ksi*sinh(gamma*L/2)/gamma;
conj(ksi)*sinh(gamma*L/2)/gamma,cosh(gamma*L/2)-1j*delta*sinh(gamma*L/2)/gamma];
%μητρώο T CMT
r(i)=-T(2,1)/T(2,2); %Απόκριση του FBG
rr(i)=(abs(r(i))^2); %Ανακλαστικότητα
fprintf('%i\n ', lamda(i))% Μήκη κύματος
fprintf('%i\n', rr(i)) % Ανακλαστικότητα
end
rawTable = readtable('Μετρήσεις.xlsx','Sheet','Φύλλο19');
%Διάβασμα excel αρχείου με τις πειραματικές μετρήσεις
x = rawTable.Var3; % επιλογή στήλης μετρήσεων από το αρχείο excel
y = rawTable.Var4;
figure('Name','Γραφική παράσταση ανακλαστικότητας για το FBG3','NumberTitle','off');
plot(lamda,rr*100,'blue',x,y,'red'); %Στον άξονα X είναι τα μήκη κύματος και στον άξονα Y η
ανακλαστικότητα
legend('Προσομοίωση', 'Πειραματική', 'Location', 'northeast');

```

Στην αρχή του κώδικα έχουμε τις προδιαγραφές του FBG<sub>3</sub>. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ανακλαστικότητας για διαφορετικά μήκη κύματος ορίζοντας το εύρος μηκών κύματος που θα έχει η γραφική παράσταση. Το εύρος αυτό το προσαρμόζουμε για κάθε FBG στην περιοχή ανακλαστικότητάς του ώστε να μπορεί να εντοπιστεί το κεντρικό μήκος κύματος. Η απόκριση του FBG προσομοιώνεται με το μητρώο T, στο οποίο βασίστηκε η CMT (Coupled Mode Theory) για ομοιόμορφα FBG[7]. Μετά περνάμε τις πειραματικές μετρήσεις που πάρθηκαν από τον σταθερό OSA έχοντας μετατρέψει τα μW σε ποσοστό ανακλαστικότητας, ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και του εργαστηρίου.

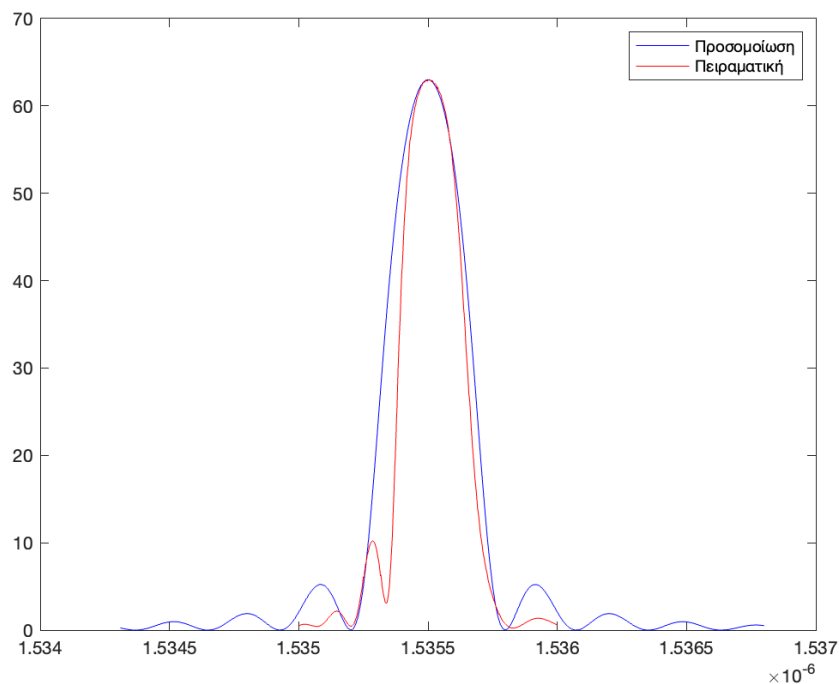
### 2.5.1 Προσομοίωση εγγραφής βάσει μετρήσεων

Λαμβάνοντας υπόψη πέρα από τα βασικά χαρακτηριστικά του FBG<sub>3</sub> την ανακλαστικότητα (63%) και το κεντρικό του μήκος κύματος (1535,5 nm) να προσαρμοστεί το φάσμα της προσομοίωσης με αυτό του πειράματος. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται να μεταβάλουμε την τιμή του συνολικού μήκους εγγραφής  $L$  και την τιμή του βάθους διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης  $\Delta n$ . Συγκεκριμένα για το  $\Delta n$  την τιμή του παρονομαστή καθώς η τιμή αυτή μας δείχνει πόσο μικρότερο είναι το  $\Delta n$  σε σχέση με το  $n_{co}$ .

Η τιμή του μήκους εγγραφής κυμαίνεται από 5-6 mm καθώς η διάμετρος δέσμης του λέιζερ είναι 6 mm. Αυτή η διακύμανση του μήκους οφείλεται στην απόσταση που είναι τοποθετημένη η ίνα από την μάσκα κατά την εγγραφή. Πιο συγκεκριμένα όσο πιο κοντά βρίσκεται στη μάσκα τόσο θα πλησιάζει ακριβώς τα 6 mm που είναι η μέγιστη τιμή. Όμως επειδή αποκλείεται να επιτευχθούν τα 6mm θα είμαστε λίγο λιγότερο αλλά μέσα στην κίτρινη περιοχή της συμβολής όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.

Άξονας X : Μήκη κύματος (nm)

Άξονας Y : Ποσοστό ανακλαστικότητας (%)



**Γράφημα 2.16:** Φάσμα αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών μετρήσεων του FBG<sub>3</sub> (Matlab)

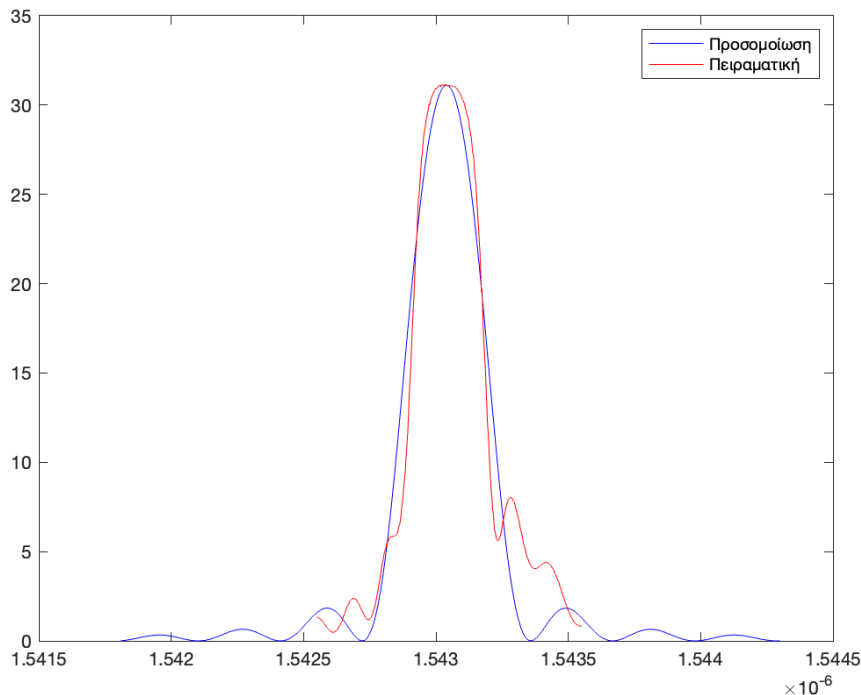
Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης  $\Delta n$  υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\Delta n = \frac{n_{co}}{E} \quad (2.9)$$

Όπου  $E$  οι φορές που θα διαιρεθεί το  $n_{co}$ . Έπειτα από προσαρμογές στις δυο μεταβλητές καταλήξαμε σε μήκος καταλήξαμε σε μήκος  $L = 5,769$  mm και  $\Delta n = 0,000091512$ .

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για το FBG<sub>4</sub>. Αντικαθιστώντας στον κώδικα όπως φαίνεται παρακάτω τις τιμές των προδιαγραφών που το αφορούν και προσαρμόζοντας το εύρος μηκών κύματος στην περιοχή ανακλαστικότητας του FBG<sub>4</sub> προκύπτει ότι :

```
neff=1.45569; %Ενεργός δείκτης διάθλασης
nco=1.4715; %Δείκτης διάθλασης πυρήνα n_co
lamdaB=1543.04e-9; %Κεντρικό Μήκος Κύματος λ_B(nm)
L=5.24e-3; %Συνολικό μήκος του FBG
E=24931;
ksi=j*ko*nco/(E);% Υπολογισμός ποσοστού αλλαγής δείκτη διάθλασης Δn
x = rawTable.Var1; % επιλογή στήλης μετρήσεων από το αρχείο excel
y = rawTable.Var2;
```



**Γράφημα 2.17:** Φάσμα αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών μετρήσεων του FBG<sub>4</sub> (Matlab)

Επίσης μετά από προσαρμογές στις δυο μεταβλητές καταλήξαμε σε μήκος  $L = 5,24$  mm και  $\Delta n = 0,00005916$ . Έχοντας και εδώ μεταβολή του δείκτη διάθλασης  $\Delta n$  της τάξεως του 0,005 %.

FBG	Συνολικό μήκος L (mm)	Μεταβολή δείκτη διάθλασης $\Delta n$
FBG <sub>3</sub>	5,769	0,000091512
FBG <sub>4</sub>	5,24	0,00005916

**Πίνακας 2.6:** Πίνακας αποτελεσμάτων  $L$  και  $\Delta n$  και για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>

Συνοψίζοντας οι τιμές του συνολικού μήκους  $L$  που αφορούν τα δυο FBG δεν ξεπερνούν τα 6mm αυτό οφείλεται όπως ειπώθηκε στην δέσμη εγγραφής του λέιζερ και κατά πόσο κοντά βρίσκονται σε αυτή κατά την εγγραφή. Η μεταβολή του δείκτη διαμόρφωσης  $\Delta n$  με βάση την θερμοκρασία του περιβάλλοντος όταν πάρθηκαν οι μετρήσεις είναι αμελητέα και στις δυο περιπτώσεις.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα δειχθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης η οποία είναι απαραίτητη για να διαπιστωθεί αν το FBG λειτουργεί δηλαδή αν αποκρίνεται ή όχι στις μηχανικές καταπονήσεις.

### 3 Βαθμονόμηση και Εφαρμογή σε πρόβολο του FBG<sub>4</sub>

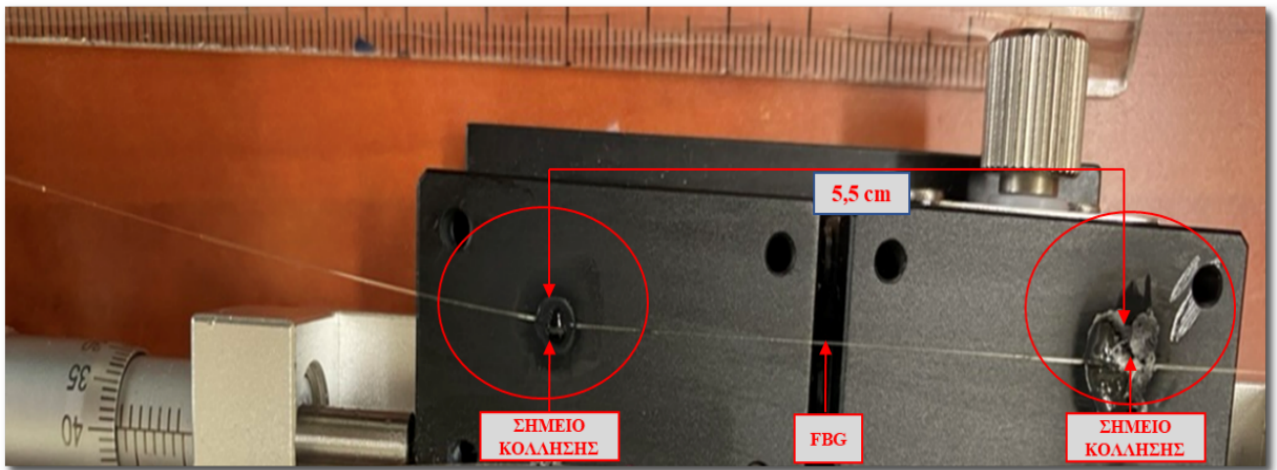
Σε αυτό το Κεφάλαιο, θα μελετηθεί η άσκηση της μηχανικής καταπόνησης στο FBG<sub>4</sub>, με σκοπό να υπολογιστεί η ευαισθησία του και να δειχθεί η γραμμικότητά του καθώς πρόκειται για αισθητήρα σε ένα εύρος μηχανικών εφαρμογών. Μέσω των μετρήσεων, θα υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά ευαισθησίας επιμήκυνσης του FBG<sub>4</sub>, ώστε να δειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής του ως αισθητήρας σε διάφορες κατασκευές. Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να είναι σε κτηριακές κατασκευές σε δομικά στοιχεία οικοδομών αλλά και σε μεταλλικές κατασκευές όπως βιομηχανικά κτήρια, γέφυρες, καθώς και σε πτέρυγες αεροσκαφών, ανεμογεννητριών, κλπ. Για την διερεύνηση της εφαρμογής ενός παρόμοιου αισθητήρα στις κατασκευές αυτές θα εξετάσουμε στην ενότητα 3.2 την συμπεριφορά του σε ένα πρόβολο ο οποίος έχει ομοιογενή δομή και σταθερή διατομή ενώ φορτίζεται στο άκρο του με δεδομένο φορτίο. Η εφαρμογή αυτή θα δώσει τη δυνατότητα αξιολόγησης του αισθητήρα σε μια ελεγχόμενη διάταξη ενώ παράλληλα θα βγουν συμπεράσματα για μια αντίστοιχη πραγματική κατασκευή. Ωστόσο πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση αυτής της διάταξης θα εξετάσουμε τη δυνατότητα βαθμονόμησης του αισθητήρα μέσω μιας μικρομετρικά ρυθμιζόμενης διάταξης επιμήκυνσης του αισθητήρα. Θα διαπιστώσουμε ότι η ακρίβεια μέτρησης της επιμήκυνσης του αισθητήρα φασματικά είναι πολύ μεγαλύτερη της μεταλλικής μικρομετρικής διάταξης όταν γίνεται με έναν φασματικό αναλυτή με τα χαρακτηριστικά του σταθερού OSA του εργαστηρίου.

#### 3.1 Διαδικασία της Βαθμονόμησης

Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται η μεταλλική μικρομετρικά ρυθμιζόμενη διάταξη η οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την βαθμονόμηση. Η ίνα είναι κολλημένη στα δύο μετακινούμενα μπλοκς με το FBG να βρίσκεται μεταξύ τους και περίπου στη μέση. Κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης διαπιστώθηκε ότι όταν μετατοπίζουμε το φάσμα μπορούμε και υπολογίζουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την μετατόπιση απ' ότι στο μικρόμετρο. Αυτό οφείλεται στο ότι ο φασματικός αναλυτής παρουσιάζει με μεγάλη ακρίβεια φασματικά την όποια μεταβολή προκληθεί στην ίνα κατά την μετατόπιση. Όπως έχει αναφερθεί το μικρό RBW που διαθέτει ο εργαστηριακός OSA παίζει σημαντικό ρόλο ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν σε σχέση με τη χρήση άλλης συσκευής ανάγνωσης FBG όπως ο φορητός φασματικός αναλυτής. Η επιμήκυνση αυτή που προκύπτει καθώς επιμηκύνουμε την ίνα στα 5,5 cm (απόσταση μεταξύ των σημείων συγκόλλησης) αντιστοιχεί ανάλογα στο μήκος του grating και κατ' επέκταση στην επιμήκυνση του φορέα πάνω στον οποίο θα κολληθεί το αισθητήριο στην όποια εφαρμογή (πχ πάνω σε μια ράβδο οπλισμού μεγάλου μήκους). Βαθμονομώντας τον αισθητήρα μπορεί να εξαχθεί η αντιστοιχία μεταξύ φασματικής μετατόπισης και φυσικής επιμήκυνσης. Αν η φασματική μετατόπιση κατά την ανάγνωση του αισθητήρα είναι ακριβής τότε αντίστοιχα ακριβής θα είναι και η φυσική επιμήκυνση που προκύπτει. Αν θα θέλαμε να βαθμονομήσουμε την επιμήκυνση του grating μέσω της φυσικής επιμήκυνσης διαβάζοντας το μικρόμετρο θα είχαμε σαφώς μικρότερη ακρίβεια για δύο λόγους. Ο πρώτος αφορά την λειτουργία της διάταξης και ο δεύτερος αφορά την δυνατότητά μας να διαβάσουμε με ακρίβεια το μικρόμετρο ώστε να αποφανθούμε για την τελική μέτρηση.

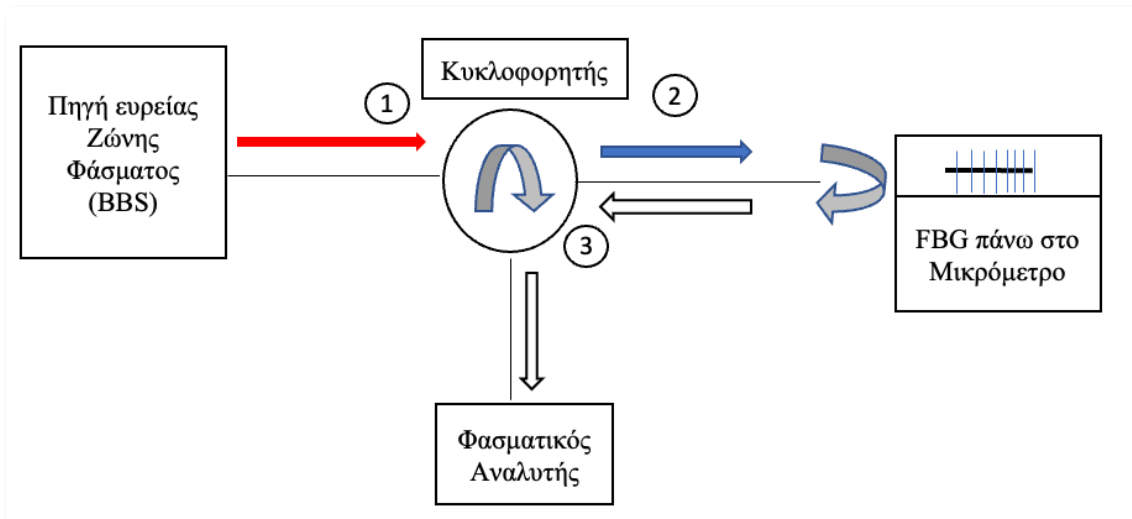
Στην ουσία λοιπόν γίνεται το αντίστροφο απ' ότι μπορεί να περιμένει κάποιος. Αντί να χρησιμοποιούμε την ένδειξη του μικρομέτρου για να βαθμονομήσουμε την ίνα που φέρει πάνω της το FBG χρησιμοποιούμε το ίδιο το FBG για να βαθμονομήσουμε το μικρόμετρο. Έτσι ανάλογα την μεταβολή που μας δείχνει φασματικά ο OSA βαθμονομούμε την ένδειξη που έχει το μικρόμετρο. Αναλυτικά η διαδικασία της βαθμονόμησης έχει ως εξής.

Το μικρόμετρο έχει ένα βερνιέρο με χάραξη να αντιστοιχεί περίπου σε 4  $\mu\text{m}$ , όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια, με το οποίο δύναται να αυξηθεί (τεντωθεί) ή να μειωθεί (συμπιεστεί) η απόσταση των σημείων κόλλησης της οπτικής ίνας, δηλαδή να προκαλείται μηχανική κίνηση της ίνας ως προς τον άξονα X.



Εικόνα 3.1: Στήριξη Οπτικής Ίνας σε Μικρομετρική διάταξη

Για την ανάγνωση του  $FBG_4$  χρησιμοποιήθηκε η συνδεσμολογία της ίδιας πειραματικής διάταξης, που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, με την μόνη διαφορά ότι προστέθηκε η μικρομετρική διάταξη. Η σειρά συνδεσμολογίας αυτής είναι BBS → Κυκλοφορητής → FBG/Μικρόμετρο → Κυκλοφορητής → OSA.



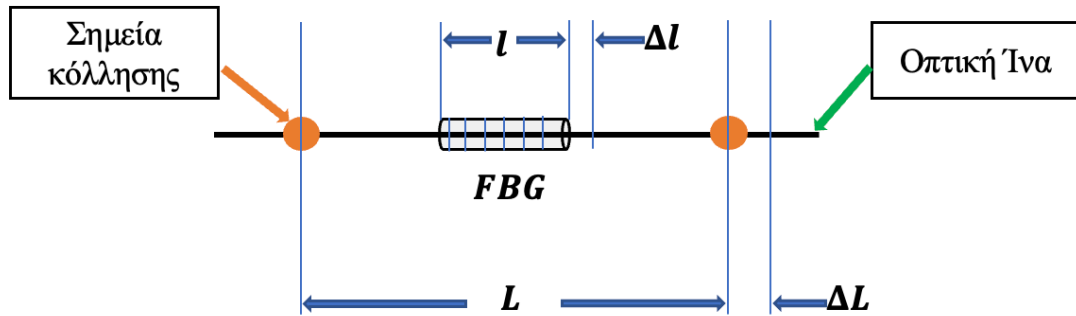
Σχήμα 3.1: Διάταξη Συνδεσμολογίας Βαθμονόμησης του FBG

### 3.1.1 Λήψη και Επεξεργασία Μετρήσεων

Περιστρέφουμε το βερνιέρο του μικρομέτρου, από 0-15 με βήμα 5 (δεν αναγράφεται η μονάδα μέτρησης καθώς δεν γνωρίζουμε τι αντιπροσωπεύει η ένδειξη). Παρατηρούμε κάθε φορά το οπτικό φασματικό του αναλυτή (OSA) του εργαστηρίου και ειδικότερα το ανακλώμενο κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_{B(x)}$  του  $FBG_4$  (σε σχέση με το αρχικό  $\lambda_{B(0)}$ ), το οποίο είχε υποβληθεί σε συνεχόμενες επιμηκύνσεις. Η αρχική μέτρηση πάρθηκε σε κατάσταση ηρεμίας και για συγκεκριμένη θερμοκρασία δωματίου. Αυτό διότι θεωρούμε δεν θα υπάρξει κάποια θερμοκρασιακή μεταβολή κατά την διάρκεια των μετρήσεων στον χώρο του εργαστηρίου. Έπειτα σε κάθε βήμα περιστροφής του βερνιέρου αποθηκεύαμε την κάθε μεταβολή του φάσματος που αφορά το  $FBG_4$  ξεχωριστά. Αυτό διότι δεν έχει την δυνατότητα ο OSA του εργαστηρίου να μας δείξει την προηγούμενη μέτρηση με την επόμενη ταυτόχρονα για να συγκριθεί και να απεικονιστεί η μεταβολή του φάσματος σε ένα γράφημα.

Οι μετρήσεις πάρθηκαν σε εύρος σάρωσης (span) 1nm για να εντοπιστεί με λεπτομέρεια το ανακλώμενο φάσμα και εξαιτίας του χαμηλού RBW υπάρχει μεγάλη ακρίβεια σε αυτή την μέτρηση. Αυτή η ακρίβεια και λεπτομέρεια οφείλεται στα 501 σημεία που εντοπίζει σε εύρος σάρωσης 1nm.

Είναι σημαντικό να δειχθεί ο τρόπος με τον οποίο αντιστοιχίζουμε την μετατόπιση του φάσματος σε φυσική επιμήκυνση του αισθητήρα. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται ότι η επιμήκυνση  $\Delta L/L$  αντιστοιχεί σε εκείνη του grating  $\Delta l/l$  και τελικά αντιστοιχεί σε  $\frac{\Delta\lambda_B(x)}{\lambda_{B(0)}}$  όπως έχει συμπληρωθεί στον πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.2: Επιμήκυνση FBG

Συγκεκριμένα, έχοντας γράψει ένα FBG το οποίο έχουμε κολλήσει σε δυο σημεία σε απόσταση  $L$  αυτό θα επιμηκυνθεί σε κάθε βήμα στροφής του βερνιέρου κατά  $L + \Delta L$ . Αυτό σημαίνει ότι το FBG από το αρχικό του μήκος  $l$  επιμηκύνεται κατά  $\Delta l$ . Τότε η επιμήκυνση του FBG είναι  $\frac{\Delta l}{l}$ . Το μήκος του FBG υπολογίζεται ως  $l = N \cdot \Lambda$  όπου  $\Lambda$  είναι η περίοδος εγγραφής με  $\Lambda = \frac{\lambda_B}{2 n_{eff}}$  και όπου  $N$  ο αριθμός των περιόδων από τις οποίες αποτελείται όλο το grating. Αυτό σημαίνει ότι η κάθε περίοδος θα επιμηκυνθεί, έτσι ώστε να οδηγήσει σε νέο μετατοπισμένο κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B + \Delta\lambda_B$  που βλέπουμε στην οθόνη του OSA. Συνεπώς η περιοδικότητα  $\Lambda$  γίνεται  $\Lambda' = \frac{\lambda_B + \Delta\lambda_B}{2 n_{eff}}$  και το μήκος  $l$  γίνεται

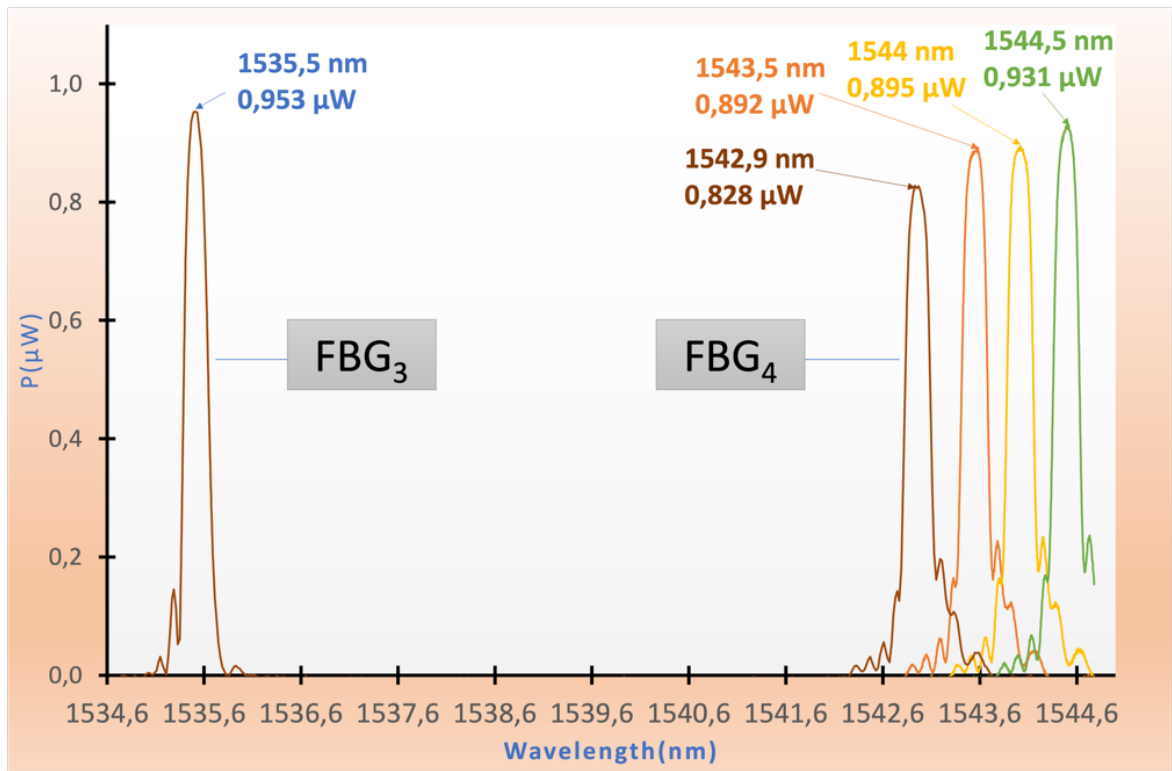
$$l' = N \cdot \Lambda' = N \cdot \frac{\lambda_B}{2 n_{eff}} + N \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{2 n_{eff}} = N \cdot \Lambda + N \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{2 n_{eff}}. \text{ Άρα καταλήγουμε σε}$$

$$l' = l + \Delta l \text{ και η επιμήκυνση είναι } \frac{\Delta l}{l} = \frac{N \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{2 n_{eff}}}{N \cdot \frac{\lambda_B}{2 n_{eff}}} = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3.1)$$

Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος  $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}$  αντιστοιχεί στην φυσική επιμήκυνση του αισθητήρα. Αυτό το αποτέλεσμα αντιστοιχεί επίσης στο αρχικό μήκος  $L$  καταλήγοντας σε επιμήκυνση  $\Delta L/L$  και μπορεί να εκφραστεί σε microstrain μια μονάδα η οποία εκφράζει  $\mu m/m$ . Η εφαρμογή του προβόλου, όπως αυτή θα παρουσιασθεί παρακάτω, προβλέπει την επιμήκυνση της ίνας που είναι κολλημένη πάνω στον πρόβολο όταν ασκηθεί κάποια δύναμη στο άκρο του. Αυτό θα έχει συνέπεια την παρακολούθηση της επιμήκυνσης της άνω πλευράς του προβόλου εξαιτίας του φορτίου μέσω της επιμήκυνσης της ίνας.[27],[28]

Στο Γράφημα 3.1 απεικονίζονται οι φασματικές αποκρίσεις του αισθητήρα σε τέσσερις διαδοχικές θέσεις του βερνιέρου. Από τις ενδείξεις αυτές φαίνεται η γραμμική συμπεριφορά του αισθητήρα ενώ οι όποιες αποκλίσεις οφείλονται στην δυσκολία ρύθμισης και ανάγνωσης του μικρομέτρου. Επίσης η μεταβολή της ισχύος μέγιστης ανάκλασης οφείλεται στην διαφορετική ισχύ την οποία εκπέμπει η πηγή στην συγκεκριμένη φασματική περιοχή. Στο Γράφημα 3.1 παρουσιάζεται επίσης και η φασματική ανακλαστικότητα ενός πρόσθετου αισθητήρα (FBG<sub>3</sub>) ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο θερμοκρασιακής αναφοράς. Συγκεκριμένα το αισθητήριο αυτό δεν είναι κολλημένο στη διάταξη οπότε δεν ακολουθεί τις μηχανικές του μεταβολές. Ωστόσο παρακολουθεί τις θερμοκρασιακές μεταβολές της περιοχής στην οποία είναι τοποθετημένο το ενεργό αισθητήριο.

Συνεπώς κάθε μεταβολή του ενεργού αισθητηρίου αξιολογείται σε συνδυασμό με την ενδεχόμενη φασματική μεταβολή λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής.



**Γράφημα 3.1:** Φασματική ανακλαστικότητα του FBG<sub>4</sub> για διάφορες θέσεις του μικρομέτρου.

Όπως αποδείχθηκε από την (3.1) η φασματική μεταβολή αντιστοιχίζεται με την φυσική επιμήκυνση του αισθητήρα για τις διάφορες θέσεις του μικρομέτρου :

$$\frac{\Delta\lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}} = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.2)$$

Αξιοποιώντας τον λόγο (3.2) μπορεί υπολογιστεί σε πόσα  $\mu m$  αντιστοιχεί η κάθε χάραξη στην ένδειξη του βερνιέρου, δηλαδή το πόσο ακριβώς επιμηκύνει την ίνα σε κάθε βήμα.

Αφού τα σημεία κόλλησης της οπτικής ίνας έχουν μεταξύ τους απόσταση 5,5 cm, θεωρούμε ότι το  $l$  του αισθητήρα FBG<sub>4</sub> ισούται με 5,5cm ή 55000 $\mu m$ . Συνεπώς για την μέγιστη μεταβολή του  $\Delta l$  της οπτικής ίνας σε σύγκριση με τις ενδείξεις του μικρομέτρου έχουμε τα εξής:

$$\frac{\Delta\lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}} = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \Delta l_{(1)} = l * \frac{\Delta\lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}} \Rightarrow \Delta l_{(1)} = 21,34 \mu \cong 20 \mu$$

$$\Delta l_{(2)} = 39,21 \mu \cong 40 \mu, \quad \Delta l_{(3)} = 57,03 \cong 60 \mu$$

Τα αποτελέσματα αυτά που προέκυψαν θα συμπληρωθούν στον πίνακα 3.1 παρακάτω όπου θα είναι συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων και υπολογισμών που πάρθηκαν από την διαδικασία της βαθμονόμησης. Για να μπορέσουμε να περιγράψουμε την επιμήκυνση ενός αντικειμένου που καταπονείται από εξωτερικούς παράγοντες με αποτέλεσμα να προκαλείται η παραμόρφωσή του, χρησιμοποιείται ο όρος strain. Για τα δομικά στοιχεία τα οποία παρακολουθούνται μέσω των FBG αυτές οι μεταβολές είναι πάρα πολύ μικρές της τάξεως  $\mu m/m$  οπότε χρησιμοποιείται η μονάδα microstrain ( $\mu\epsilon$ ) και εκφράζει την επιμήκυνση σε μικρόμετρα ανά

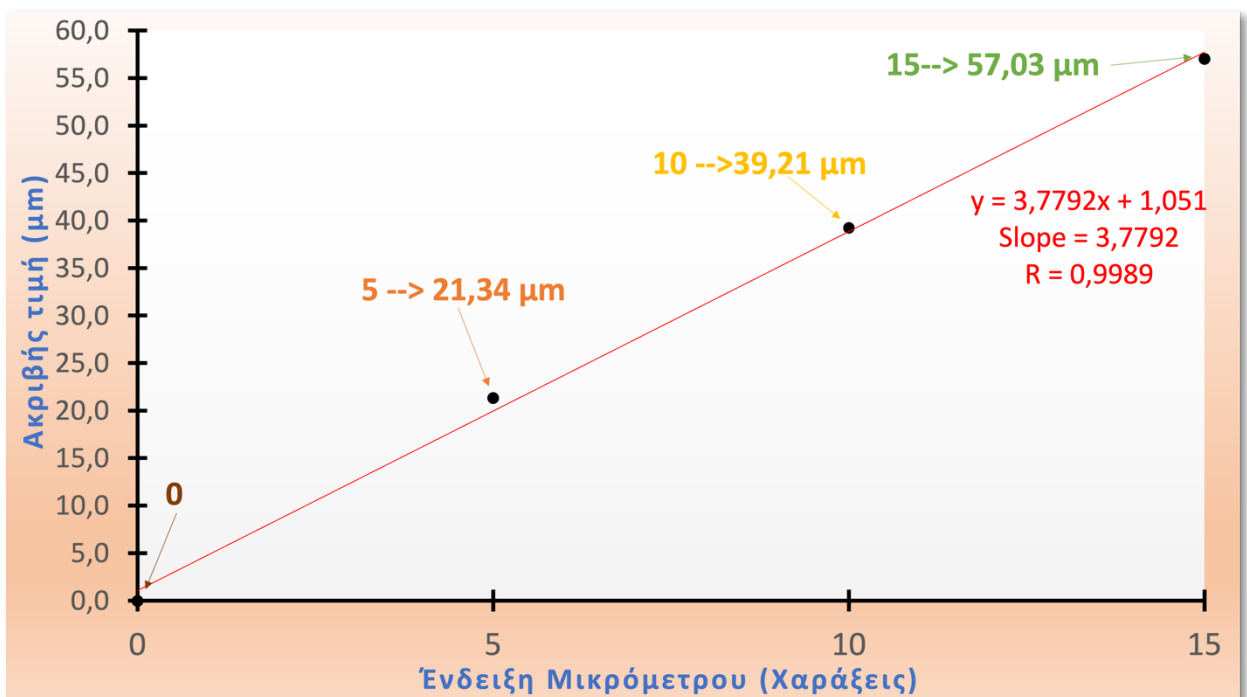


μέτρο μήκους του στοιχείου. Για τον υπολογισμό της επιμήκυνσης του FBG σε microstrain ( $\mu\epsilon$ ) χρησιμοποιείται ο λόγος (3.2) με μόνη διαφορά την αλλαγή στην μονάδα μέτρησης το αριθμητή από nm σε  $\mu\text{m}$ . Το  $\mu\epsilon$  παίρνει θετικές τιμές όταν πρόκειται για επιμήκυνση και αρνητικές για συρρίκνωση.

Συνοψίζοντας τις μετρήσεις, υπολογίστηκαν αρχικά η μεταβολή του μήκους κύματος  $\Delta\lambda_{\chi}$  του ανακλώμενου για κάθε βήμα. Η φυσική επιμήκυνση της ίνας με βάση τον λόγο  $\Delta\lambda_{B(\chi)}/\lambda_{B(0)}$  έπειτα η μετατόπιση  $\Delta l$  με βάση την ένδειξη του μικρομέτρου και τέλος υπολογίστηκε το πόσο επιμηκύνθηκε ίνα σε microstrain (επιμήκυνση σε  $\mu\text{m}$  ανά μέτρο), όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα 3.1.

FBG <sub>4</sub> με μετρήσεις Σταθερού OSA					
Ένδειξη Μικρομέτρου (Βερνιέρου)	Με βάση την Ένδειξη του Μικρομέτρου η Μετατόπιση $\Delta l$ ( $\mu\text{m}$ )	Κεντρικό Μήκος Κύματος $\lambda_{B(\chi)}$ (nm)	Μεταβολή Ανακλώμενου Κεντρικού Μήκους Κύματος $\Delta\lambda_{B(\chi)}$ (nm)	$\frac{\Delta\lambda_{B(\chi)}}{\lambda_{B(0)}}$	Microstrain ( $\mu\epsilon$ )
0	0	1542,9	0	0	0
5	21,34	1543,5	0,6	0,000388	388
10	39,21	1544	1,1	0,000713	713
15	57,03	1544,5	1,6	0,001037	1037

Πίνακας 3.1: Πίνακας μετρήσεων κατά την επιμήκυνση της ίνας.



Γράφημα 3.2: Γράφημα ευαισθησίας με αντιστοίχιση των ενδείξεων βερνιέρου και την ακριβή επιμήκυνση της ίνας

Σύμφωνα με το Γράφημα 3.2 η ευαισθησία (κλίση ευθείας) βρίσκεται στα 3,7792 και η παλινδρόμηση (Regression)  $R= 0,9989$  που δηλώνει πόσο καλή είναι η ταύτιση των τιμών με την ευθεία όταν η τιμή του  $R$  πλησιάσει στο 1. Επίσης προκύπτει τυπική απόκλιση  $\sigma = 1,36$ .

Σημαντικό είναι να γνωρίζουμε μέχρι που μπορεί να φτάσει η μέγιστη φασματική επιμήκυνση που μπορεί να έχουμε σε ένα FBG. Το όριο αυτό είναι μέχρι περίπου 2,5 nm όπως το δοκιμάσαμε στο εργαστήριο και για τα αισθητήρια που κατασκευάσαμε. Αυτή η φασματική μεταβολή αντιστοιχεί σε επιμήκυνση της ίνας περίπου 1620  $\mu\epsilon$  (microstrain) αν και με καλύτερη και πιο προσεκτική εγγραφή αυτή η τιμή μπορεί να αυξηθεί. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί η ίνα θα κοπεί στο σημείο εγγραφής με πιθανή αιτία την υπερθέρμανση κατά την εγγραφή, οπότε απαιτείται μικρότερος χρόνος εγγραφής και κατά συνέπεια μεγαλύτερο μήκος εγγραφής για την ίδια ανακλαστικότητα. Επιπλέον η διακριτική ικανότητα όταν χρησιμοποιείται ο φασματικός αναλυτής του εργαστηρίου αντιστοιχεί στη δική του διακριτική ικανότητα που είναι καλύτερη από 0,01 nm οπότε και αντίστοιχη διακριτικότητα επιμήκυνσης καλύτερη από 6,48  $\mu\epsilon$  (microstrain).

### 3.2 Εφαρμογή Αισθητηρίου FBG σε Πρόβολο

Στην ενότητα αυτή θα αξιοποιήσουμε τις ιδιότητες του αισθητηρίου FBG που μελετήσαμε μέχρι τώρα, για την μέτρηση της παραμόρφωσης μιας δοκού όταν αυτή καταπονείται από ένα μηχανικό φορτίο. Μέσω της μέτρησης της παραμόρφωσης μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος του εφαρμοζόμενου φορτίου σε περιβάλλον εργαστηρίου ή στην πράξη θα μπορούσε να δειχθεί αν η δοκός λειτουργεί στην ελαστική της περιοχή ή αν διαρρέει. Συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί μια δοκός σταθερής ορθογωνικής διατομής από ομογενές υλικό η οποία είναι πακτωμένη στο ένα άκρο της και ελεύθερη στο άλλο άκρο σε μια μορφή προβόλου (Σχήμα 3.3). Ο πρόβολος είναι μια πολύ γνωστή περίπτωση δομικού στοιχείου παρόμοιας μορφής με τους προβόλους στα κτήρια (μπαλκόνια) με δυνατότητα υποδοχής φορτίου στο ελεύθερο άκρο. Παρόμοια με τους προβόλους στοιχεία είναι και οι αμφιέριστοι δοκοί με δύο σημεία στήριξης στα άκρα τους και με δυνατότητα υποδοχής φορτίου στο μέσον. Στα κτήρια, μορφή αμφιέριστης δοκού εμφανίζουν τα δοκάρια στο μέσον του κτηρίου (μεταξύ δύο κατακόρυφων δοκών) και η περίπτωση τους μπορεί να μελετηθεί με παρόμοιο τρόπο.

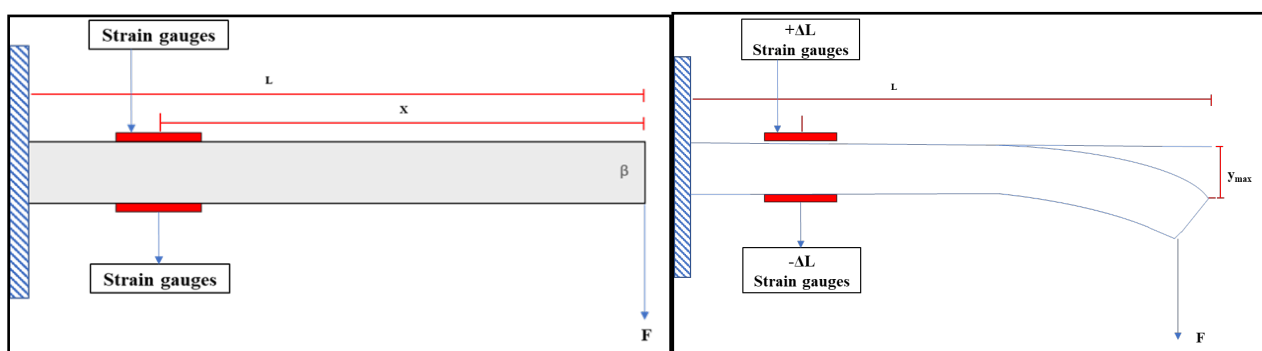


Σχήμα 3.3: Δοκός τύπου προβόλου

Με την πάκτωση του προβόλου στο ένα άκρο πετυχαίνουμε να περιορίσουμε την ελευθερία κινήσεων της δοκού δηλαδή δεν επιτρέπει καμιά μετακίνηση ούτε προς τα πάνω ,ούτε προς τα κάτω, ούτε δεξιά, ούτε αριστερά, ούτε και οποιαδήποτε περιστροφή. Η εφαρμογή οποιασδήποτε μορφής κάμψης ακολουθεί κάποιες παραδοχές. Πιο συγκεκριμένα στο αρχικό στάδιο η δοκός πρέπει να είναι ευθύγραμμη, να έχει σταθερή διατομή σε όλο το μήκος της, οι εξωτερικές δυνάμεις να είναι συνεπίπεδες δηλαδή να μην τείνουν να προκαλέσουν εφελκυσμό, θλίψη ή στρέψη αλλά μόνο κάμψη

και τέλος να είναι το υλικό ομογενές σε όλα τα σημεία του με το να έχει τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες σε όλες τις κατευθύνσεις. Εάν δεν ισχύει κάποιο από αυτά οι υπολογισμοί σε σχέση με τις μετρήσεις εμφανίζουν αποκλίσεις.

Τα χαρακτηριστικά του προβόλου είναι τόσο γεωμετρικά (μήκος και διαστάσεις διατομής) όσο και σύστασης (ελαστικότητα του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος). Ειδικότερα η διατομή είναι πολύ σημαντική και διαφέρει αν η μεγαλύτερη ή η μικρότερη διάσταση της διατομής είναι παράλληλη με την δύναμη που εφαρμόζεται στο ελεύθερο άκρο. Η εφαρμογή της δύναμης στο ελεύθερο άκρο δημιουργεί μια ροπή κάμψης που έχει σαν αποτέλεσμα την επιμήκυνση της άνω επιφάνειας του προβόλου (εφελκυσμός) και συρρίκνωση της κάτω επιφάνειας (θλίψη). Συνήθως για την μέτρηση της ροπής κάμψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο αισθητήρες (strain gauges) που είναι τοποθετημένοι σε κάποια απόσταση από το άκρο και κολλημένοι σε αμφοτέρως τις επιφάνειες του προβόλου όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4. Τα συνήθη αισθητήρια είναι ηλεκτρικά (αντίσταση) και ίδιας ακριβώς μορφής. Η χρησιμότητα της διπλής εφαρμογής τους θα φανεί παρακάτω.



Σχήμα 3.4: Τοποθέτηση Αισθητήρων Καταπόνησης (Strain Gauges) σε Πρόβολο

Η ανάλυση της λειτουργίας του προβόλου είναι γνωστή στη βιβλιογραφία και παρουσιάζεται περιληπτικά παρακάτω [29],[32].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4 του προβόλου με διατομή  $a \times b$  σε κάποια απόσταση  $x$  από το ελεύθερο άκρο τοποθετούνται οι δυο αισθητήρες, με κατεύθυνση προς τον οριζόντιο άξονα. Όταν εφαρμοστεί μια κατακόρυφη δύναμη  $F$  στο ελεύθερο άκρο, δημιουργείται βέλος κάμψεως  $y_{max}$ , το οποίο είναι ο λυγισμός που προκαλείται στη ράβδο, καθώς εκτρέπεται από την ευθύγραμμη θέση ισορροπίας. Αν μετά τον λυγισμό τα φορτία που ασκούνται σε όλο το μήκος της είναι μικρότερα από το όριο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής της, τότε μετά την αφαίρεση των φορτίων αυτών η ράβδος θα επανέλθει στην αρχική της θέση. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε μόνιμη παραμόρφωση (διαρροή). Εκτός από το υλικό κατασκευής και τις εξωτερικές εφαρμοσμένες δυνάμεις που μπορεί να ασκούνται στην ράβδο ο λυγισμός εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως το Σχήμα της διατομής της ράβδου και το μήκος της. Όπως αναφέραμε και παραπάνω η διάσταση διατομής  $b$  παίζει σημαντικό ρόλο στον λυγισμό της καθώς όσο μικρότερες είναι οι διαστάσεις τόσο πιο ευκολά θα υπάρξει λυγισμός με την αντίστοιχη άσκηση μικρότερου φορτίου.

Σύμφωνα με την θεωρία κάμψης το μέγεθος και η θέση που ασκούνται τα φορτία πάνω στη δοκό δημιουργούν την ροπή κάμψης  $M$  η οποία υπολογίζεται ως εξής :

$$M_z = Fx \quad (3.3)$$

όπου  $F$  η δύναμη που ασκείται κατακόρυφα στο ελεύθερο άκρο της δοκού και  $x$  η απόσταση από το σημείο όπου υπολογίζεται η ροπή και είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας, ενώ η κατεύθυνση του διανύσματος της ροπής είναι κάθετη στο επίπεδο  $x$ - $y$ .

Η μηχανική τάση κάμψεως για κάθε σημείο  $y$  της διατομής της δοκού είναι

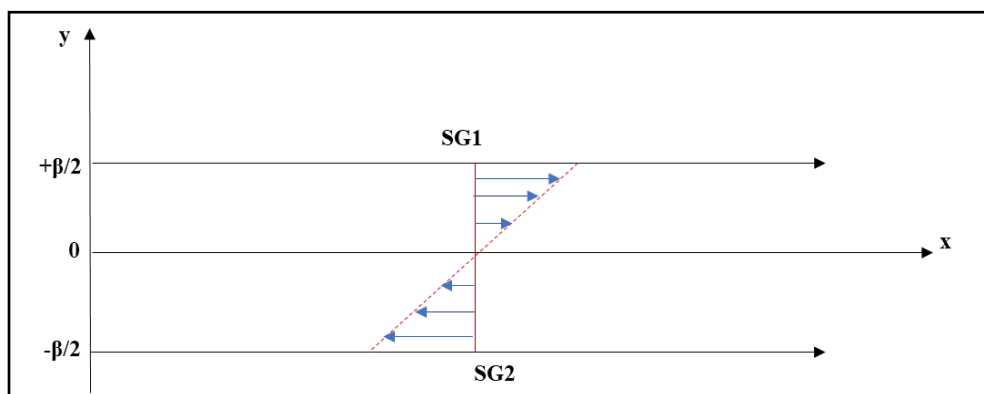
$$\sigma_{xx} = \frac{M_z}{I_{zz}} y \quad (3.4)$$

$$\text{όπου } I_{zz} = \frac{\alpha\beta^3}{12} \quad (3.5)$$

είναι η ροπή αδράνειας της ράβδου για τον άξονα  $z$  και για ορθογωνική διατομή. Για άλλη διατομή (πχ κυκλική) η σχέση αυτή αλλάζει και μπορεί να προκύψει μέσω αντίστοιχων πινάκων.

Πιο συγκεκριμένα η μηχανική τάση  $\sigma_{xx}$  σ' ένα σημείο της διατομής της δοκού είναι ανάλογη της ροπής κάμψης, είναι αντιστρόφως ανάλογη της ροπής αδράνειας της διατομής και είναι ανάλογη της αποστάσεως  $y$  του σημείου από τον άξονα  $x$ .

Το  $y$  λαμβάνει θετικές ή αρνητικές τιμές ανάλογα με το σημείο ενδιαφέροντος. Αν δηλαδή το σημείο ενδιαφέροντος είναι πάνω λαμβάνει θετικές τιμές αν είναι κάτω αρνητικές όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Αυτό θα φανεί και στην συνέχεια με την υλοποίηση της εφαρμογής.



Σχήμα 3.5: Γραφική παράσταση τάσεως κάμψεως  $\sigma_{xx}$  ως προς την απόσταση  $y$

Συνεπώς το  $\sigma_{xx}$  για τις δυο οριακές περιπτώσεις του  $y$  δηλαδή  $-\beta/2$  και  $+\beta/2$  λαμβάνει τιμές:

Για την πάνω επιφάνεια:

$$\sigma_{xx}(y = +\beta/2) = \frac{6Fx}{\alpha\beta^2} \quad (3.6)$$

Ενώ για την κάτω επιφάνεια :

$$\sigma_{xx}(y = -\beta/2) = \frac{6Fx}{\alpha\beta^2} \quad (3.7)$$

Η διαμήκης επιμήκυνση  $\epsilon$  του προβόλου είναι τότε:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L} \quad (3.8)$$

, όπου  $\Delta l$  είναι η μεταβολή μήκους του άνω αισθητήριου και  $L$  το μήκος του προβόλου.

Ανάλογα με το σημείο ενδιαφέροντος με το αν είναι στην πάνω πλευρά (+) ή στην κάτω πλευρά (-) προκύπτει:

$$\epsilon = \pm \frac{6Fx}{E\alpha\beta^2} \quad (3.9)$$

όπου  $F$  φορτίο που ασκείται στο ελεύθερο άκρο του προβόλου,  $x$  απόσταση του αισθητήρα από το φορτίο,  $\alpha$  η οριζόντια και  $\beta$  η κατακόρυφη διάσταση της διατομής του προβόλου ενώ  $E$  είναι η ελαστική σταθερά (ή σταθερά Young) του υλικού του προβόλου.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι αν τοποθετήσουμε δύο αισθητήρια σε απόσταση  $x$  από το άκρο του προβόλου και γνωρίζουμε την διατομή του, το συνολικό του μήκος και την ελαστική του σταθερά, μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη που εφαρμόστηκε στο άκρο του. Επειδή η σχέση μεταξύ δύναμης και επιμήκυνσης είναι γραμμική, μπορούμε να μετατρέψουμε την επιμήκυνση σε δύναμη και έτσι να έχουμε ένα τρόπο μηχανικής παρακολούθησης του προβόλου. Αυτό μπορούμε να το κάνουμε είτε με τους κλασσικούς ηλεκτρικούς αισθητήρες αντίστασης είτε με του αισθητήρες οπτικών ινών FBG. Αν μάλιστα εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι το επάνω αισθητήριο εφελκύεται (θετική επιμήκυνση) ενώ το κάτω θλίβεται (αρνητική επιμήκυνση) τότε μπορούμε να αυξήσουμε την ευαισθησία της μέτρησης, αφού για την ίδια φυσική επιμήκυνση θα έχουμε διπλάσια φασματική. Δηλαδή το επάνω αισθητήριο θα μετατοπίσει το φάσμα προς μεγαλύτερα μήκη κύματος ενώ το κάτω προς μικρότερα. Συνεπώς η διαφορά τους θα είναι το διπλάσιο από τη μετατόπιση του ενός. Επιπρόσθετα, αντισταθμίζεται και η θερμοκρασιακή μεταβολή τους διότι η διαφορά τους θα παραμείνει σταθερή έστω και αν μετατοπίζονται λόγω θερμοκρασίας.

Στην εφαρμογή που θα εξετάσουμε, τα FBG θα κολληθούν πάνω σε ένα πρόβολο από αλουμίνιο ορθογωνικής διατομής με σκοπό την προσομοίωση του τρόπου λειτουργίας ενός αισθητήριου FBG εάν αυτό τοποθετηθεί σε μια πραγματική δοκό, ως δομικό στοιχείο, πχ ενός κτηρίου.

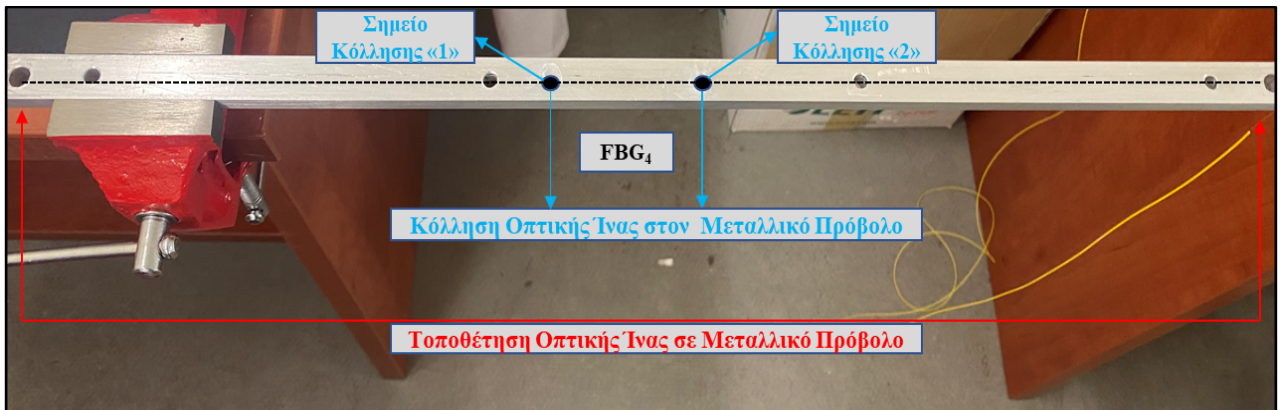
Οι μετρήσεις της μετατόπισης του κεντρικού μήκους κύματος, λόγω μηχανικής καταπόνησης, έχουν διεξαχθεί παράλληλα με σταθερό και φορητό Οπτικό Φασματικό Αναλυτή. Όπως έχει δειχθεί στο κεφάλαιο 2 δεν μας ενδιαφέρουν οι τιμές του κεντρικού μήκους κύματος αλλά μας ενδιαφέρει η μεταβολή του φάσματος κατά την άσκηση μηχανικών καταπονήσεων πάνω στην ίνα. Έτσι παίρνοντας μετρήσεις και με τους δυο φασματικούς αναλυτές διαπιστώνεται κατά πόσο μπορεί να υπάρχει αξιόπιστη μέτρηση για μια πραγματική εφαρμογή μέσω του φορητού οπτικού φασματικού αναλυτή ο οποίος διευκολύνει τη διεξαγωγή των μετρήσεων, λόγω φορητότητας και άρα λόγω πρακτικότητας, ειδικά σε περιπτώσεις που τα αισθητήρια FBG τοποθετούνται μέσα σε δοκό, σκυρόδεμα, σε πρόβολο, κτλ και οι μετρήσεις αυτές πρέπει να παρθούν εκτός εργαστηρίου.

### 3.2.1 Προετοιμασία

Χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος μια δοκός από αλουμίνιο, η οποία πακτώθηκε στην αριστερή της άκρη με σκοπό να παραμείνει σταθερή (ακίνητη) καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Πάνω στη δοκό τοποθετήθηκε η οπτική ίνα, η οποία φέρει τα εγγεγραμμένα FBG (3 και 4), που μελετήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.6, η οπτική ίνα κολλήθηκε σε δύο σημεία (1 και 2), εντός των οποίων βρίσκεται το FBG<sub>4</sub>, και καθορίζει την απόσταση από το ελεύθερο άκρο του προβόλου. Διευκρινίζεται ότι το FBG<sub>3</sub> είναι ελεύθερο (μη κολλημένο στον πρόβολο) στην οπτική ίνα και δύναται να χρησιμοποιηθεί για θερμοκρασιακή αντιστάθμιση. Δεν χρησιμοποιήθηκε το δεύτερο αισθητήριο ως ενεργό αισθητήριο κολλημένο στην κάτω πλευρά με σκοπό την θερμοκρασιακή αντιστάθμιση. Αυτό αποφασίστηκε διότι θα πρέπει να τοποθετηθεί ακριβώς στην ίδια θέση  $x$ , όπως και το επάνω αισθητήριο. Ωστόσο αυτό ήταν πολύ δύσκολο διότι δεν φαίνεται καθαρά η θέση εγγραφής (ήταν ασαφής στην πράξη) και θα μπορούσε να αλλοιώσει τις τελικές μετρήσεις. Επιπρόσθετα, με την επιβολή της μηχανικής τάσης και με την μέτρηση της επάνω πλευράς σε διάφορες θερμοκρασίες μπορεί να φανεί η μετατόπιση μέσω του ακόλλητου αισθητηρίου (dummy sensor).

Κατά την διάρκεια τοποθέτησης του αισθητήρα FBG<sub>4</sub> η ίνα έσπασε με αποτέλεσμα να χρειαστεί η εγγραφή καινούριου FBG στα ίδια μήκη κύματος εγγραφής, γύρω στα 1543 nm.

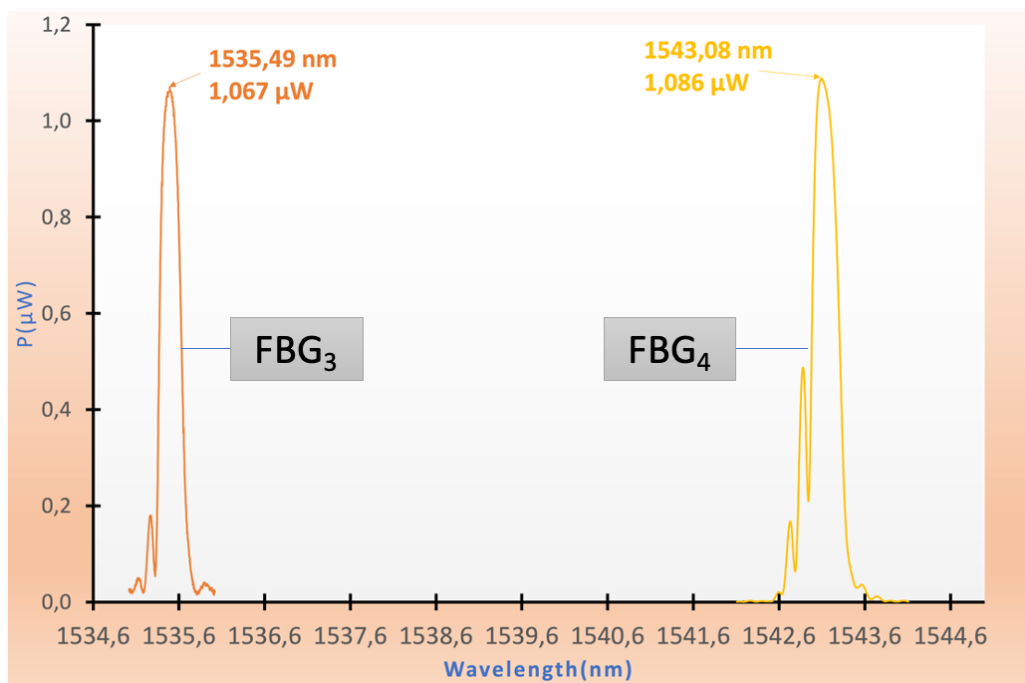
Αυτό διαφοροποιεί ελαφρώς τις ενδείξεις και την μορφή του ανακλώμενου κύματος από αυτές του προηγούμενου καθώς πρόκειται για καινούρια εγγραφή. Όμως αυτό δεν αποτελεί εμπόδιο στο να ληφθούν οι μετρήσεις και να συνεχιστεί η όλη διαδικασία.



Εικόνα 3.2: Κόλληση FBG<sub>4</sub> σε Πρόβολο

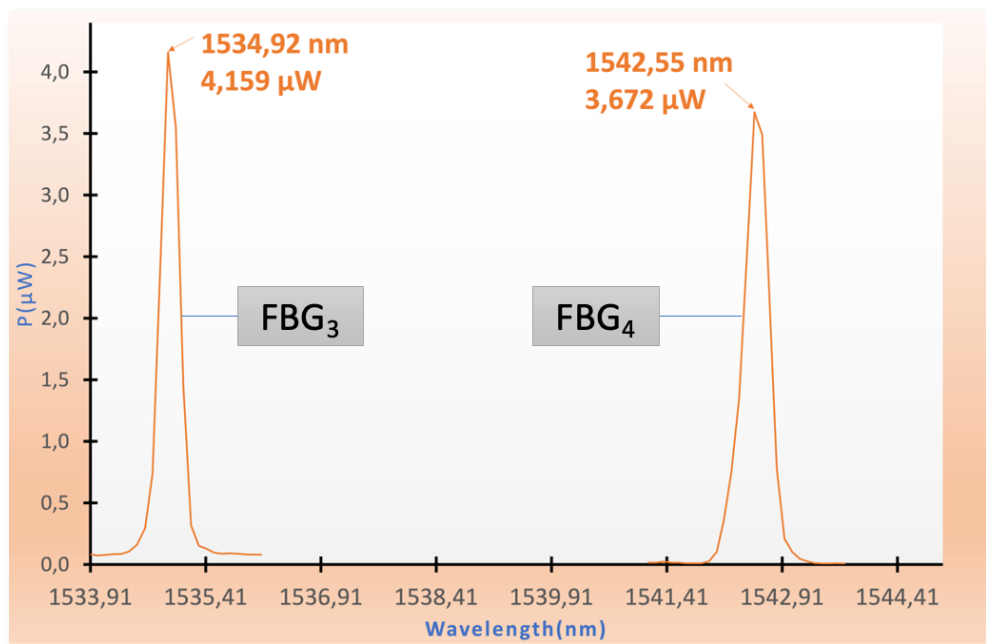
Στη συνέχεια, έγινε η λήψη της αρχικής κατάστασης των FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>, πριν την τοποθέτηση στον πρόβολο.

Η κόλληση γίνεται με προσοχή ώστε να μην τεντωθεί το αισθητήριο κατά την κόλληση. Παρόλα αυτά θα μπορούσαμε να κολλήσουμε το αισθητήριο με κάποια τάση (προένταση). Αυτό διευκολύνει αν θέλουμε να μετράμε όχι μόνο φορτία τα οποία έχουν κατεύθυνση προς τα κάτω (αρνητικά  $y$ ) αλλά και προς τα πάνω (θετικά  $y$ ). Προβαίνουμε σε μετρήσεις έχοντας τον πρόβολο ελεύθερο με κολλημένο το FBG<sub>4</sub> πάνω του, με τον Σταθερό Οπτικό Αναλυτή OSA, για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>. Όπως φαίνεται στο Γράφημα 3.3: α) για το FBG<sub>3</sub>, το κεντρικό μήκος είναι 1535,49 nm και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 1,067  $\mu\text{W}$ , β) για το FBG<sub>4</sub>, το κεντρικό μήκος είναι 1543,08 nm, και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 1,086  $\mu\text{W}$ .



Γράφημα 3.3: Γραφική Απεικόνιση FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> σε κατάσταση Ηρεμίας, από μετρήσεις Σταθερού OSA επί του Προβόλου (χωρίς Φορτίο)

Εν συνέχεια, προβαίνουμε σε μετρήσεις, με τον φορητό Οπτικό Αναλυτή OSA, για τα FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub>. Εντοπίστηκαν: α) για το FBG<sub>3</sub>, το κεντρικό μήκος είναι 1534,92 nm και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 4,159 μW, β) για το FBG<sub>4</sub>, το κεντρικό μήκος είναι 1542,55 nm, και η μέγιστη ανακλώμενη ισχύς είναι 3,672 μW.



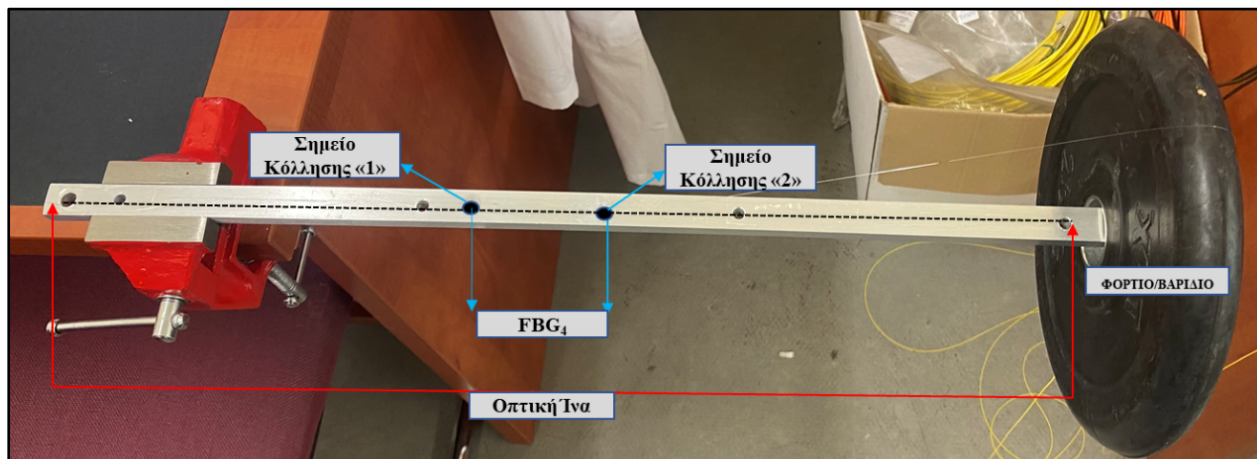
**Γράφημα 3.4:** Γραφική απεικόνιση FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> σε κατάσταση ηρεμίας, από μετρήσεις φορητού OSA επί του προβόλου (χωρίς φορτίο)

Όπως διαπιστώνεται δεν παρατηρείται σοβαρή μεταβολή στα ανακλώμενα μήκη κύματος των δυο FBG σε σχέση με όταν η ίνα βρισκόταν ελεύθερη εκτός προβόλου.

Στην επόμενη παράγραφο τοποθετούμε ένα βάρος 2,5 Kgr (ονομαστικό βάρος) στο ελεύθερο άκρο του προβόλου με σκοπό να επαληθεύσουμε ότι μέσω των μετρήσεων που μας παρέχουν τα αισθητήρια μπορούμε να υπολογίσουμε το βάρος.

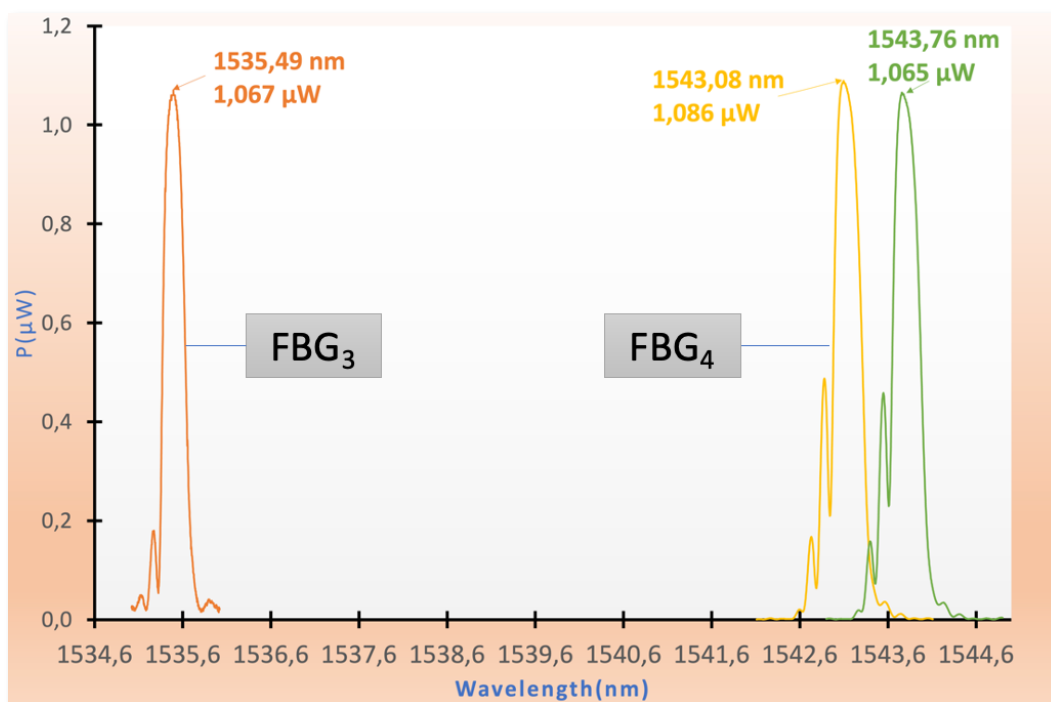
### 3.2.2 Τοποθέτηση και Μέτρηση Βάρους στο άκρο Προβόλου

Στην διάταξη του προβόλου, όπου έχει τοποθετηθεί οπτική ίνα και έχει κολληθεί το αισθητήριο FBG<sub>4</sub>, τοποθετήθηκε στο δεξιό άκρο της ράβδου βάρος 2,5 Kgr, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 3.3. Με σκοπό την μελέτη της λειτουργίας του αισθητηρίου FBG<sub>4</sub> μέσω της επιμήκυνσης της ίνας, εξαιτίας της μηχανικής τάσης (κάμψης του μεταλλικού προβόλου). Όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση του βάρους από το σημείο πάκτωσης της ράβδου, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιμήκυνση της ίνας (μεγάλος λυγισμός).



Εικόνα 3.3: Χρήση φορτίου σε πρόβολο για την μελέτη του αισθητήριου FBG<sub>4</sub>

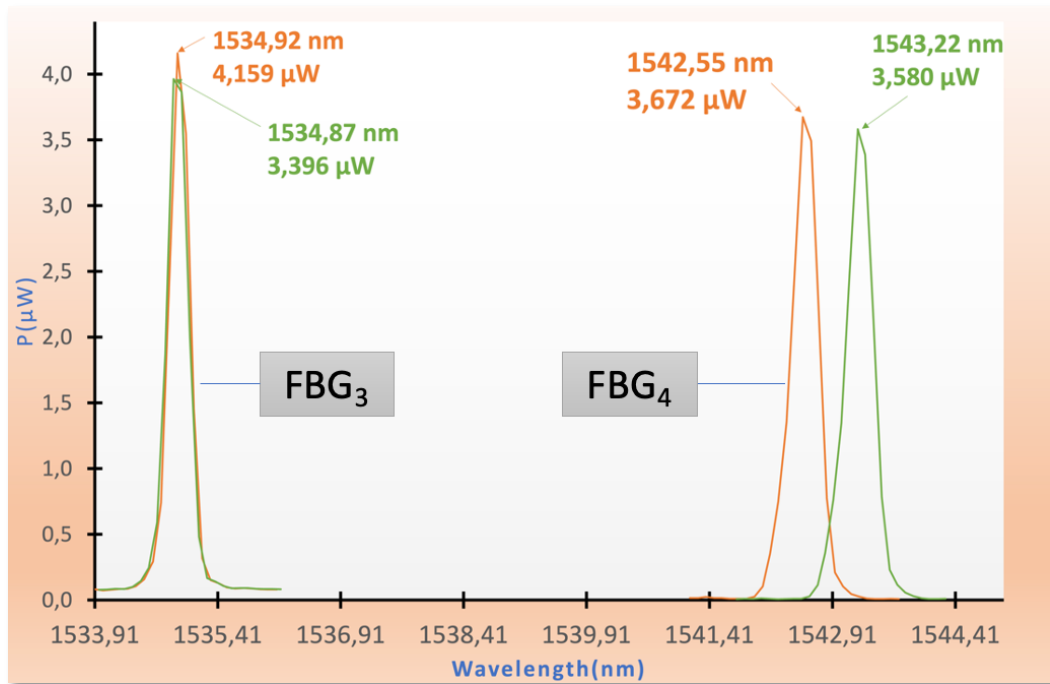
Κατόπιν, προβαίνουμε σε μετρήσεις, με τον σταθερό Οπτικό Αναλυτή OSA, για το FBG<sub>4</sub>. Εντοπίστηκε για το FBG<sub>4</sub>, το κεντρικό μήκος ότι μετατοπίστηκε από 1543,08 nm σε 1543,76 nm (δηλαδή μετατόπιση κατά 0,68 nm).



Γράφημα 3.5: Γραφική απεικόνιση FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> από μετρήσεις σταθερού OSA επί του προβόλου (με Φορτίο 2,5 Kgr)

Επαναλαμβάνουμε την μέτρηση με τον φορητό Οπτικό Αναλυτή OSA, για το FBG<sub>4</sub>. Εντοπίστηκε για το FBG<sub>4</sub>, το κεντρικό μήκος ότι μετατοπίστηκε από 1543,08 nm σε 1543,42 nm (δηλαδή μετατόπιση κατά 0,67 nm).





**Γράφημα 3.6:** Γραφική απεικόνιση FBG<sub>3</sub> και FBG<sub>4</sub> από μετρήσεις φορητού OSA επί του πρόβολου (με φορτίο 2,5 Kgr)

Παρατηρείται ότι οι τιμές της μετατόπισης των κεντρικών μηκών κύματος του FBG<sub>4</sub>, όταν τοποθετηθεί φορτίο 2,5 Kgr σε πρόβολο, υπάρχει μικρή απόκλιση. Καθώς ο φορητός μετρά την μεταβολή του κεντρικού μήκους κύματος στα 0,67 nm, ενώ ο σταθερός στα 0,68 nm. Γεγονός που είναι αναμενόμενο διότι ο σταθερός αναλυτής έχει καλύτερο RBW σε σχέση με τον φορητό. Αυτή όμως η απόκλιση είναι μικρή της τάξεως του 1,47 %. Ασχέτως αν υπάρχει απόκλιση στην απόλυτη τιμή των μετρήσεων του ανακλώμενου κεντρικού μήκους κύματος σε σχέση με τον σταθερό οπτικό αναλυτή. Εμείς μπορούμε να αξιοποιήσουμε τον φορητό φασματικό αναλυτή για να κάνουμε μετρήσεις μετατόπισης του φάσματος διότι μόνο η φασματική μετατόπιση μας ενδιαφέρει για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Όπως στη προηγούμενη ενότητα της βαθμονόμησης, υπολογίσαμε την επιμήκυνση της οπτικής ίνας έτσι και εδώ ακολουθώντας τον ίδιο τρόπο υπολογισμών καταλήγουμε στα εξής :

FBG <sub>4</sub> με μετρήσεις Σταθερού – Φορητού OSA					
Οπτικός Φασματικός Αναλυτής	Η Μετατόπιση $\Delta l$ (μm)	Κεντρικό Μήκος Κύματος $\lambda_{B(x)}$ (nm)	Μεταβολή Ανακλώμενου Κεντρικού Μήκους Κύματος $\Delta \lambda_{B(x)}$ (nm)	$\frac{\Delta \lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}}$	Microstrain (με)
Σταθερός	0	1543,08	0	0	0
	180,4	1543,76	0,68	0,000440	440
Φορητός	0	1542,55	0	0	0
	177,94	1543,22	0,67	0,000434	434

**Πίνακας 3.2:** Πίνακας μετρήσεων της εφαρμογής σε πρόβολο

Με βάση το συνολικό μήκος της ράβδου  $L = 41$  cm υπολογίζουμε την επιμήκυνση της ίνας  $\Delta l$ .

Για τον σταθερό OSA:

$$\frac{\Delta \lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}} = \frac{\Delta l}{L} \Rightarrow \Delta l = L * \frac{\Delta \lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}} \Rightarrow \Delta l = 180,4 \mu m$$

Για τον φορητό OSA:

$$\Delta l = 177,94 \mu m$$

Στην επόμενη παράγραφο θα χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων για να υπολογιστεί η διαμήκης παραμόρφωση  $\epsilon$ , με βάση τις προδιαγραφές της διάταξης του πειράματος και να συγκριθεί με αυτήν που υπολογίστηκε φασματικά. Επίσης θα υπολογιστούν η ροπή αδρανείας, κάμψης και η δύναμη  $F$  που αντιλαμβάνεται το FBG<sub>4</sub> κατά την καταπόνηση.

### 3.2.3 Υπολογισμός της Διαμήκης Παραμόρφωσης του Προβόλου

Στον πειραματικό τρόπο υπολογισμού διαμήκης παραμόρφωσης ο λόγος  $\frac{\Delta \lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}}$  μας δείχνει την επιμήκυνση που έχει υποστεί η ίνα όπως έχει υπολογιστεί στην προηγούμενη παράγραφο 3.2.2. Εναλλακτικά το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα που προήλθε από τον λόγο  $\frac{\Delta \lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}}$  προκύπτει αντικαθιστώντας την σχέση (3.8). Όπου  $\Delta l = 180,4 \mu m$  για σταθερό OSA και  $\Delta l = 177,94 \mu m$  για φορητό OSA η πραγματική επιμήκυνση της ίνας και συνολικό μήκος του προβόλου  $L=41$  cm .

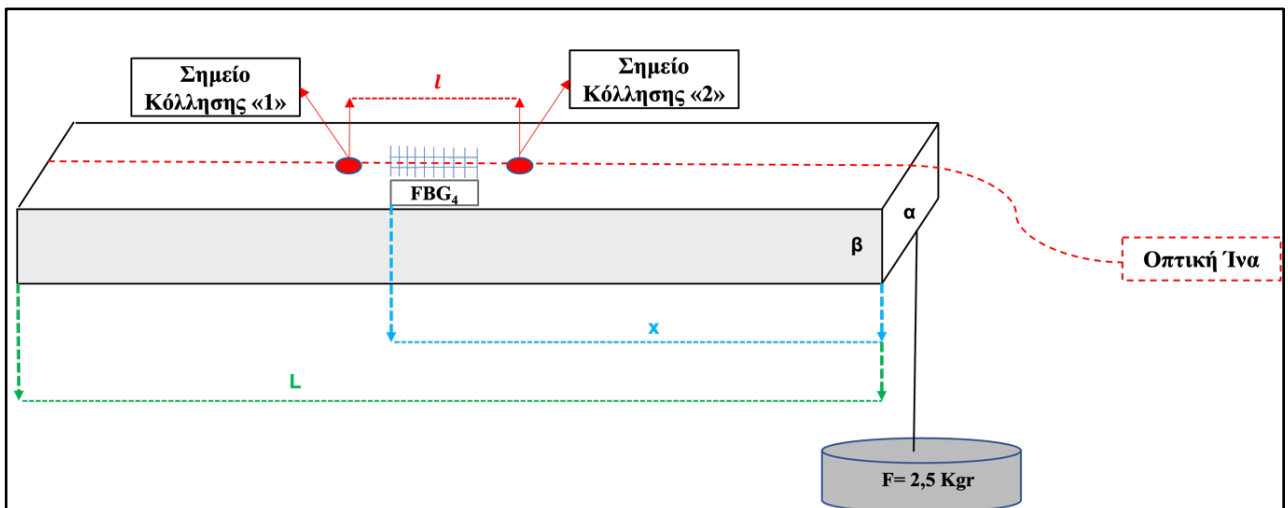
Με σταθερό OSA

$$\epsilon = 0,000440$$

Με φορητό OSA

$$\epsilon = 0,000434$$

Στο παρακάτω Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Με βάση την ανάλυση της συμπεριφοράς του προβόλου καθώς και με τα δεδομένα των μετρήσεων μπορούμε να υπολογίσουμε το βάρος το οποίο έχουμε εφαρμόσει στο ελεύθερο άκρο του προβόλου. Ωστόσο γνωρίζοντας την ονομαστική τιμή του βάρους μπορούμε να εξετάσουμε την αναμενόμενη επιμήκυνση της επάνω πλευράς μέσω της σχέσης (3.8)



Σχήμα 3.6: Μέτρηση Ροπής Κάμψης σε Πρόβολο με Χρήση Αισθητήρων FBG

Τα δεδομένα της πειραματικής διάταξης έχουν ως εξής:

<b>α</b> (πλάτος προβόλου ράβδου)	<b>β</b> (ύψος προβόλου ράβδου)	<b>F</b> (ονομαστική κατακόρυφη δύναμη)	<b>x</b> (απόσταση του FBG από το βάρος)	<b>L</b> (μήκος προβόλου ράβδου)	<b>E</b> (η ελαστική σταθερά του υλικού της ράβδου)
1,6 cm	0,8 cm	2,5 Kgr	25 cm	41 cm	69 GPa

**Πίνακας 3.3:** Δεδομένα της πειραματικής διάταξης Προβόλου - Βάρους

Χρησιμοποιούμε τη σχέση (3.9) της διαμήκους παραμόρφωσης  $\epsilon$  του προβόλου γνωρίζοντας ότι η ράβδος είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο και με την ελαστική του σταθερά (σταθερά του Young)  $E=69\text{ GPa}$ . [38] Γνωρίζουμε επιπλέον στην περίπτωση που εξετάζεται, ότι η διαμήκης παραμόρφωση  $\epsilon$  του προβόλου είναι θετική, διότι το FBG είναι κολλημένο στην επάνω πλευρά της ράβδου (εφελκύεται).

Με αντικατάσταση στη σχέση (3.10) για  $F=2,5\text{ Kgr}$ ,  $x=0,25\text{ m}$ ,  $E = \frac{69 \cdot 10^9}{9,80665} = 7,036 \cdot 10^9\text{ Kgr/m}^2$  [43],  $\alpha=0,016\text{ m}$  και  $\beta=0,008\text{ m}$ , προκύπτει ότι:

$$\epsilon=0,000520$$

Παρατηρείται ότι οι δυο τιμές της διαμήκους παραμόρφωσης διαφέρουν μεταξύ τους αποκλίνοντας 16,6%. Δηλαδή η φασματική παραμόρφωση σε σχέση με την θεωρητική που βασίζεται στις προδιαγραφές και το ονομαστικό βάρος διαφέρουν. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες οι οποίοι όλοι μαζί συμβάλλουν στο συνολικό σφάλμα. Πιο συγκεκριμένα αυτοί οι παράγοντες μπορεί να είναι οι εξής :

α) Η ανομοιογένεια του υλικού, καθώς η ίδια η ράβδος έχει οπές με αποτέλεσμα να χαλά την ομοιογένεια. Οπότε θα περίμενε κανείς μεγαλύτερο λυγισμό της ράβδου και συνεπώς μεγαλύτερη επιμήκυνση.

β) Η σύσταση του υλικού, καθώς δεν γνωρίζουμε αν πρόκειται σίγουρα για καθαρό αλουμίνιο ή κράμα αλουμινίου. Εικάζουμε ότι πρόκειται για καθαρό αλουμίνιο αλλά μπορεί να μην ισχύει κάτι τέτοιο. Άρα αυτό σημαίνει ότι η ελαστική σταθερά  $E=69\text{ GPa}$  που αφορά το καθαρό αλουμίνιο να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την συγκεκριμένη τιμή. Στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερη θα έχω λιγότερο βάρος, ενώ σε αντίθετη περίπτωση μεγαλύτερο.

γ) Η συγκόλληση του FBG πάνω στο υλικό, διότι έχει να κάνει με το γεγονός ότι γλιστρά όταν τεντώνεται η επάνω πλευρά του προβόλου δηλαδή έχει και αυτή μια ελαστικότητα. Με αποτέλεσμα να μην τεντώνεται η ίνα όσο ακριβώς τεντώνεται η ράβδος. Αυτομάτως είναι βέβαιο ότι το FBG χάνει φασματική μετατόπιση. Άρα υποτιμά το ονομαστικό βάρος. Αυτός είναι και ο κρισιμότερος παράγοντας.

Το πιθανότερο είναι να μην έχουμε καλή συγκόλληση πάνω στην επιφάνεια της ράβδου. Αυτό οφείλεται στην κόλλα που δεν είναι κατάλληλη ή ότι η κόλλα έπρεπε να τοποθετηθεί σε πιο μεγάλο μήκος από αυτό που καλύφθηκε. Το γεγονός ότι είναι πολύ λεία η επιφάνεια δεν ξέρουμε αν βοηθά ή όχι. Ίσως δεν υπάρχει πάρα πολύ καλή επαφή μεταξύ του πλαστικού (jacket) μέρους της ίνας και του αλουμινίου, διότι εμείς κολλάμε στο jacket του cladding το οποίο είναι πλαστικό και το κολλάμε πάνω σε μέταλλο. Αυτή η κόλληση δεν είναι εύκολη και πρέπει να γίνει με μεγαλύτερη επιμέλεια ώστε να μην υπάρχει το πρόβλημα της ολίσθησης.

δ) Ο τρόπος πάκτωσης της ράβδου, διότι δεν γνωρίζουμε αν γλιστρά την ώρα που εφαρμόζεται το βάρος. Εμείς σαν πάκτωση χρησιμοποιήσαμε μια μέγγενη. Οπότε στην περίπτωση που γλιστρά η

ράβδος από το σημείο πάκτωσης και δεν τεντώνεται τόσο όσο πρέπει η επάνω πλευρά της ράβδου οπότε ο OSA θα μετρά μικρότερη φασματική μετατόπιση.

Με βάση την σχέση 3.9 και επιλύοντας ως προς την δύναμη  $F$  μπορεί να συγκριθεί αν η μεταβολή  $\Delta\lambda_B$  που εντοπίζει ο σταθερός OSA στα 0,68 nm σε σχέση με αυτήν του φορητού στα 0,67 nm, επηρεάζει την δύναμη  $F$ . Αντικαθιστώντας την διαμήκης παραμόρφωση  $\varepsilon$  για σταθερό OSA προκύπτει :

$$F = \frac{\varepsilon E a \beta^2}{6 \chi} = 2,11 \text{ Kgr}$$

Αντίστοιχα για φορητό OSA προκύπτει :

$$F = 2,08 \text{ Kgr}$$

Η διαφορά που υπάρχει στις δυο περιπτώσεις εύρεσης του βάρους είναι αμελητέα. Πράγμα που αποδεικνύει ότι ο φορητός OSA είναι εξίσου αξιόπιστος στον εντοπισμό των φασματικών μεταβολών με τον σταθερό OSA έστω και αν υπάρχει απόκλιση στην απόλυτη τιμή της μέτρησης.

Σχετικά με την επιλογή του τρόπου τοποθέτησης της ράβδου και από την σχέση (3.5) φαίνεται ότι ο τρόπος με τον οποίο έχουμε πακτώσει την ακίνητη πλευρά της ράβδου η επιμήκυνση στις δύο πλευρές της ράβδου είναι η μεγαλύτερη δυνατή διότι η πλευρά  $\beta$  είναι μικρότερη από την  $\alpha$ . Συνεπώς αν πακτώναμε την ράβδο με τη πλευρά  $\beta$  στον άξονα  $z$  και την πλευρά  $\alpha$  στον άξονα  $y$  η επιμήκυνση θα ήταν η μισή. Συνεπώς η επιμήκυνση της οπτικής ίνας (δηλαδή το τέντωμα) παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στην πλευρά  $\beta$  (από ότι στην πλευρά  $\alpha$  του προβόλου), όπου ασκείται το φορτίο (βάρος) στον πρόβολο, γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι η πλευρά  $\alpha$  είναι μεγαλύτερης επιφάνειας από ότι πλευρά  $\beta$ .

Συγκεκριμένα επειδή η διάσταση  $\beta$  είναι μικρότερη από την  $\alpha$ , θα ήταν πολύ δυσκολότερη η κάμψη του προβόλου αν το  $\alpha$  ήταν μικρότερο του  $\beta$ , όπως είναι αναμενόμενο λόγω της ροπής αδρανείας  $I$  (στοιχείο του τανυστή) στον άξονα  $z$ , η οποία σύμφωνα με την (3.5) είναι :

$$I = 6,826 * 10^{-10} \text{ Kgr} \cdot \text{m}^2$$

Η ροπή αδρανείας, δηλαδή η αντίσταση στην κάμψη του προβόλου, εξαρτάται από τη διατομή του, ενώ η διαμήκης παραμόρφωση είναι αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας  $\alpha\beta^2$ .

Όσο πιο μικρό είναι το πλάτος  $\beta$  σε σχέση με το ύψος  $\alpha$  του προβόλου, τόσο η κάμψη του προβόλου είναι μεγαλύτερη και συνεπώς θα έχουμε μεγαλύτερη επιμήκυνση άρα και μεγαλύτερη ευαισθησία στο εφαρμοζόμενο φορτίο.

Επίσης η ροπή κάμψης με βάση την ονομαστική τιμή της δύναμης  $F$  που δέχεται η δοκός που προκύπτει αντικαθιστώντας τον τύπο (3.3) :

$$M_z = 0,625 \text{ Kgr} \cdot \text{m}$$

Αντίστοιχα η ροπή κάμψης για την δύναμη  $F$  που υπολογίστηκε με βάση την φασματική μεταβολή των μετρήσεων των δυο φασματικών αναλυτών

Με σταθερό OSA :

$$M_z = 0,5275 \text{ Kgr} \cdot \text{m}$$

Με φορητό OSA :

$$M_z = 0,52 \text{ Kgr} \cdot \text{m}$$

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να τοποθετήσουμε τον αισθητήρα μας σε μια ράβδο χαλύβδινου οπλισμού σκυροδέματος με σκοπό να διερευνήσουμε μια αντίστοιχη πιθανή εφαρμογή. Η περίπτωση αυτή ίσως προσφέρει καλύτερες συνθήκες συγκόλλησης με σχετική ομοιογένεια του υλικού και καλύτερες συνθήκες πάκτωσης. Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία μετρήσεων θα πακτώσουμε στην μέγγενη τον χαλύβδινο οπλισμό κυλινδρικής διατομής με σκοπό την λήψη μετρήσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση της λείας ράβδου ορθογωνικής διατομής.

### 3.3 Τοποθέτηση αισθητηρίου FBG πάνω σε οπλισμό σκυροδέματος

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή προχωρήσαμε σε νέα εγγραφή αισθητηρίου FBG<sub>5</sub> το οποίο έχει τώρα κεντρικό μήκος κύματος ανάκλασης  $\lambda = 1534,146 \text{ nm}$  και ανακλαστικότητα 26,79 % όπως φαίνεται στο Γράφημα 3.7. Η νέα εγγραφή ήταν αναγκαία διότι το προηγούμενο αισθητήριο δεν μπορεί να αποκολληθεί από την ράβδο αλουμινίου χωρίς να καταστραφεί.

Στη συνέχεια προσπαθήσαμε να συγκολλήσουμε την ίνα με το αισθητήριο πάνω στη χαλύβδινη ράβδο οπλισμού η οποία έχει διάμετρο 9 mm και περιφερειακές ραβδώσεις οι οποίες είναι συνήθεις για τις εφαρμογές στο οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η συγκόλληση πάνω στον οπλισμό γίνεται τώρα με καταλληλότερες κόλλες ώστε να μην είναι εφικτή η ολίσθηση όταν εφαρμόζεται το φορτίο στο ελεύθερο άκρο του. Η τελική μορφή της εφαρμογής της ίνας στη ράβδο φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Επίσης στην επιφάνεια που είναι τοποθετημένη η ίνα για να προστατευτεί έχει καλυφθεί με ελαστικό υλικό και αυτό σε περίπτωση που τοποθετηθεί μέσα σε σκυρόδεμα.

Το μη ελεύθερο άκρο της ράβδου είναι πακτωμένο στην μέγγενη όπου εξαιτίας του ότι έχει ραβδώσεις, δηλαδή δεν είναι λείο, η πάκτωση επιτυγχάνεται καλύτερα απ' ό,τι στο αλουμίνιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ολίσθησης καθώς ασκείται το φορτίο στο ελεύθερο άκρο.

Επιπρόσθετα επιλέξαμε την εφαρμογή μικρότερου βάρους (2 κιλών σε σχέση με τα 2,5 κιλά που χρησιμοποιήσαμε στην προηγούμενη ράβδο αλουμινίου) ώστε να περιορίσουμε όλες τις προηγούμενες παραμέτρους που συνετέλεσαν στην μεγάλη ανακρίβεια των μετρήσεών μας.

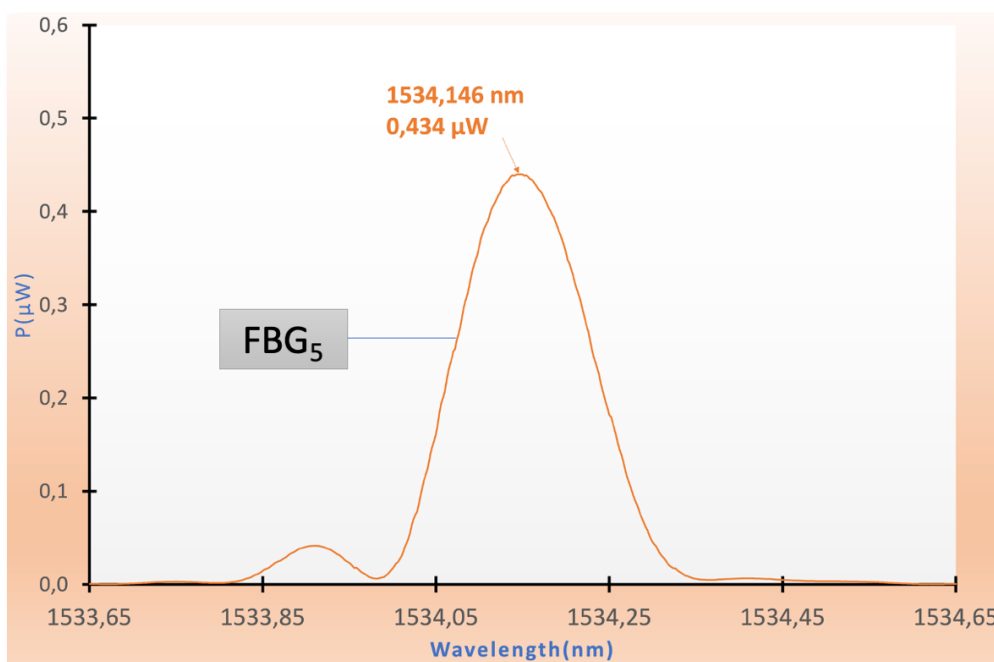


**Εικόνα 3.4:** Κόλληση FBG<sub>5</sub> σε οπλισμό σκυροδέματος. (Η θέση του αισθητηρίου είναι στο μέσον της λευκής περιοχής και είναι προστατευμένο σε συσκευασία η οποία έχει αντοχή κατά την σκυροδέτηση).

Σε αυτήν την περίπτωση η επιλογή του τρόπου τοποθέτησης της ράβδου στην μέγγενη είναι πιο εύκολη καθώς δεν υπάρχει η επιλογή της κατάλληλης πλευράς που θα προκαλούσε μεγαλύτερο λυγισμό, όπως ήταν στην περίπτωση με την ράβδο αλουμίνιου.

Με αυτές τις παρεμβάσεις περιμένουμε να έχουμε αποδεκτή ακρίβεια στη μέτρηση του βάρους στο ελεύθερο άκρο.

Η φασματική ανακλαστικότητα του νέου αισθητηρίου σε ηρεμία και για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία δωματίου όπου πάρθηκε η μέτρηση, φαίνεται στο Γράφημα 3.7 με χρήση του σταθερού OSA.



**Γράφημα 3.7:** Γραφική απεικόνιση FBG<sub>5</sub> σε κατάσταση ηρεμίας από μετρήσεις σταθερού OSA

Στη συνέχεια, και πριν προχωρήσουμε στην εφαρμογή του φορτίου στο ελεύθερο άκρο, θα πρέπει να εξετάσουμε τη σχέση (3.8) ώστε να εντοπίσουμε τις αλλαγές για τη νέα αυτή εφαρμογή. Συγκεκριμένα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη:

- α) την ελαστική σταθερά του χάλυβα  $E = 200 \text{ GPa} = 20,39 \cdot 10^9 \text{ Kgr/m}^2$  [38],[43]
- β) το στοιχείο z του τανυστή της ροπής αδρανείας για ομοιογενή κυλινδρική ράβδο δίνεται από την σχέση

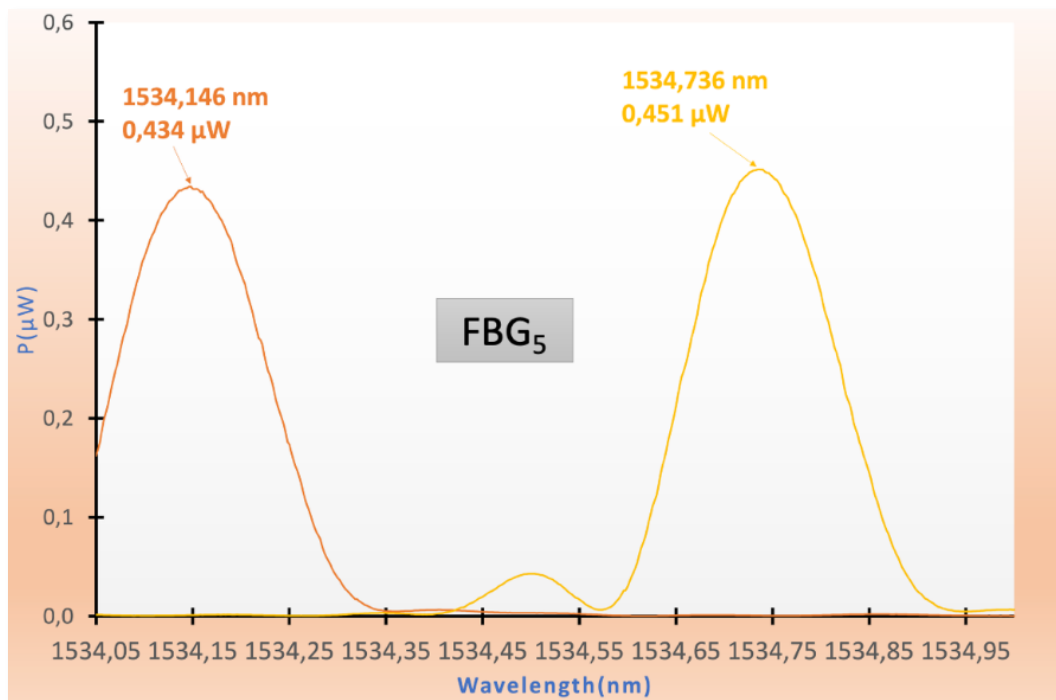
$$I_z = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3.10)$$

όπου D η διάμετρος της ράβδου [39]

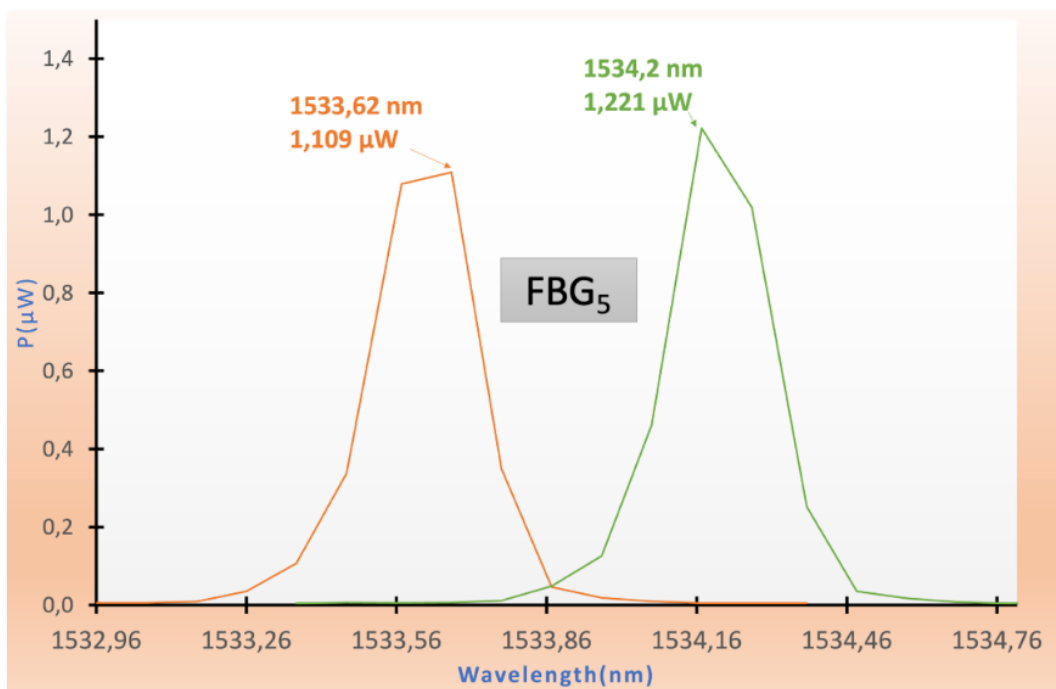
γ) την απόσταση του αισθητηρίου από το ελεύθερο άκρο x η οποία είναι 27 cm ενώ το συνολικό μήκος της ράβδου είναι  $L = 42 \text{ cm}$

δ) το φορτίο στο ελεύθερο άκρο είναι 2 Kgr (ονομαστική τιμή)

Με τα στοιχεία αυτά προχωρήσαμε στην εφαρμογή του φορτίου στο ελεύθερο άκρο και πήραμε την φασματική μετατόπιση που φαίνεται στα γραφήματα 3.8 και 3.9 με τον σταθερό και τον φορητό οπτικό αναλυτή.



**Γράφημα 3.8:** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> με την εφαρμογή φορτίου 2 Kgr στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA



**Γράφημα 3.9:** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> με εφαρμογή του φορτίου 2 Kgr στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του φορητού OSA.

Μετρήσεις FBG <sub>5</sub> σύμφωνα με τον σταθερό και τον φορητό OSA					
Οπτικός Φασματικός Αναλυτής	Η Μετατόπιση Δl (μm)	Κεντρικό Μήκος Κύματος λ <sub>B(x)</sub> (nm)	Μεταβολή Ανακλώμενου Κεντρικού Μήκους Κύματος Δλ <sub>B(x)</sub> (nm)	$\frac{\Delta\lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}}$	Microstrain (με)
Σταθερός	0	1534,146	0	0	0
	161,28	1534,736	0,59	0,000384	384
Φορητός	0	1533,62	0	0	0
	158,76	1534,2	0,58	0,000378	378

**Πίνακας 3.4:** Πίνακας μετρήσεων και επιμήκυνσης σύμφωνα με τις μετρήσεις των δύο OSA

Με βάση την νέα σχέση της ροπής αδρανείας  $I$  της σχέσης (3.10) που ισχύει για κυλινδρική συμπαγής ράβδο, η διαμήκης παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής :

$$\varepsilon = \pm \frac{32Fx}{E \pi D^3} \quad (3.11)$$

Με βάση το ονομαστικό βάρος  $F=2$  Kgr και αντικατάσταση στην σχέση (3.11) προκύπτει

$$\varepsilon = 0,000370$$

Με βάση τις μετρήσεις του σταθερού OSA φασματικά προκύπτει

$$\varepsilon = 0,000384$$

Με βάση τις μετρήσεις του φορητού OSA :

$$\varepsilon = 0,000378$$

Υπολογισμός της δύναμης  $F$  που αντιλαμβάνεται το FBG<sub>5</sub> με σταθερό OSA

$$F = \frac{\varepsilon E \pi D^3}{32 x} = 2,07 \text{ Kgr}$$

Αντίστοιχα η δύναμη  $F$  με φορητό OSA

$$F = 2,04 \text{ Kgr}$$



Επειδή η χαλύβδινη ράβδος αποτελεί ένα είδος κυλίνδρου σε όλη την περίμετρο της η κάμψη που προκαλείται είναι η ίδια έτσι η ροπή αδράνειας εξαρτάται από την διάμετρο, η οποία σύμφωνα με την (3.10) είναι :

$$I_z = 3,220 * 10^{-10} \text{ Kgr} \cdot \text{m}^2$$

Η ροπή κάμψης με βάση την ονομαστική τιμή της δύναμης  $F$  που δέχεται η χαλύβδινη ράβδος προκύπτει αντικαθιστώντας τον τύπο (3.3) :

$$M_z = 0,54 \text{ Kgr} \cdot \text{m}$$

Αντίστοιχα η ροπή κάμψης για την δύναμη  $F$  που υπολογίστηκε με βάση την φασματική μεταβολή των μετρήσεων των δυο φασματικών αναλυτών για την περίπτωση της χαλύβδινης ράβδου.

Με σταθερό OSA :

$$M_z = 0,5697 \text{ Kgr} \cdot \text{m}$$

Με φορητό OSA :

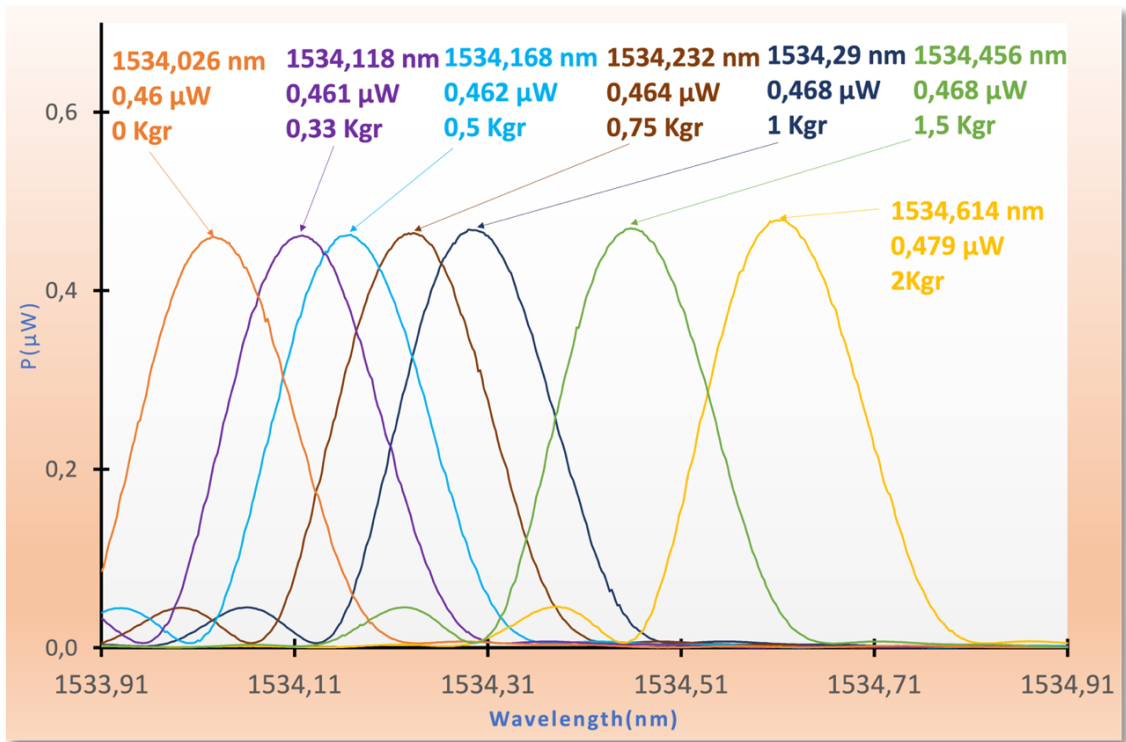
$$M_z = 0,5589 \text{ Kgr} \cdot \text{m}$$

Παρατηρείται ότι αυτή τη φορά οι μετρήσεις που αφορούν την χαλύβδινη ράβδο είναι πολύ πιο ακριβείς σε σχέση με αυτές της ράβδου αλουμινίου. Αυτό σημαίνει ότι βελτιώθηκαν όλα τα σημεία ανακρίβειας που εντοπίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για την ορθογώνια ράβδο αλουμινίου. Συγκεκριμένα έγινε καλύτερη κόλληση της ίνας που φέρει το FBG πάνω στην χαλύβδινη ράβδο ώστε να μην ολισθαίνει με την εφαρμογή του φορτίου. Σ' αυτό βοήθησε τόσο η τραχύτητα της επιφάνειας του χαλύβδινου οπλισμού, όσο και η τεχνική με τις κατάλληλες κόλλες ώστε να επιτευχθεί αυτή σταθερότητα. Ωστόσο, η μορφή της επιφάνειας της ράβδου με τις ρυτιδώσεις και τα διαμήκη νεύρα δημιουργεί έναν πρόσθετο παράγοντα δυσκολίας της επικόλλησης της ίνας στην επιφάνεια αυτή. Επίσης είναι σημαντικό ότι το υλικό είναι τώρα συμπαγές και ομογενές ώστε να εφαρμόζονται οι υπολογισμοί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η πάκτωση βελτιώθηκε όπως εξηγήθηκε εξαιτίας της τραχύτητας της επιφάνειας σύσφιξης και το φορτίο μειώθηκε ελαφρά ώστε να περιορίζεται ακόμη περισσότερη κάθε περίπτωση αστοχίας.

Τέλος αποδεικνύεται ότι η ακρίβεια είναι αρκετά καλή με τις διαφορές στις δυο περιπτώσεις εύρεσης του βάρους να είναι αμελητέα.

Σχετικά με την χρήση του φορητού OSA αποδεικνύεται ότι είναι αξιόπιστος για την μέτρηση των φασματικών μεταβολών της ανακλαστικότητας ώστε να είναι αντίστοιχα εφικτή η μέτρηση της επιμήκυνσης του οπλισμού εντός του σκυροδέματος

Στη συνέχεια έχοντας πλέον ως δεδομένη την ακρίβεια των μετρήσεων τοποθετούμε διάφορα βάρη στην άκρη της χαλύβδινης ράβδου μικρότερα των 2 Kgr που χρησιμοποιήθηκε αρχικά. Ο σκοπός μας είναι να διαπιστώσουμε κατά πόσο η απόκριση του αισθητηρίου είναι γραμμική με το εφαρμοζόμενο φορτίο στο άκρο του προβόλου. Επίσης θα πρέπει να εξετάσουμε ποια είναι η διακριτική ικανότητά του οπότε και ποιο είναι το μικρότερο φορτίο που μπορεί να ανιχνεύσει με ακρίβεια. Τα ονομαστικά βάρη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 0,33 Kgr, 0,5 Kgr, 0,75 Kgr, 1 Kgr, 1,5 Kgr και 2 Kgr. Η αρχική μέτρηση χωρίς κάποιο βάρος ( σε κατάσταση ηρεμίας ) είναι ελάχιστα διαφοροποιημένη από την προηγούμενη και αυτό εξαιτίας της αλλαγής της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος του εργαστηρίου εκείνη την συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές απεικονίζονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω Γράφημα 3.10.



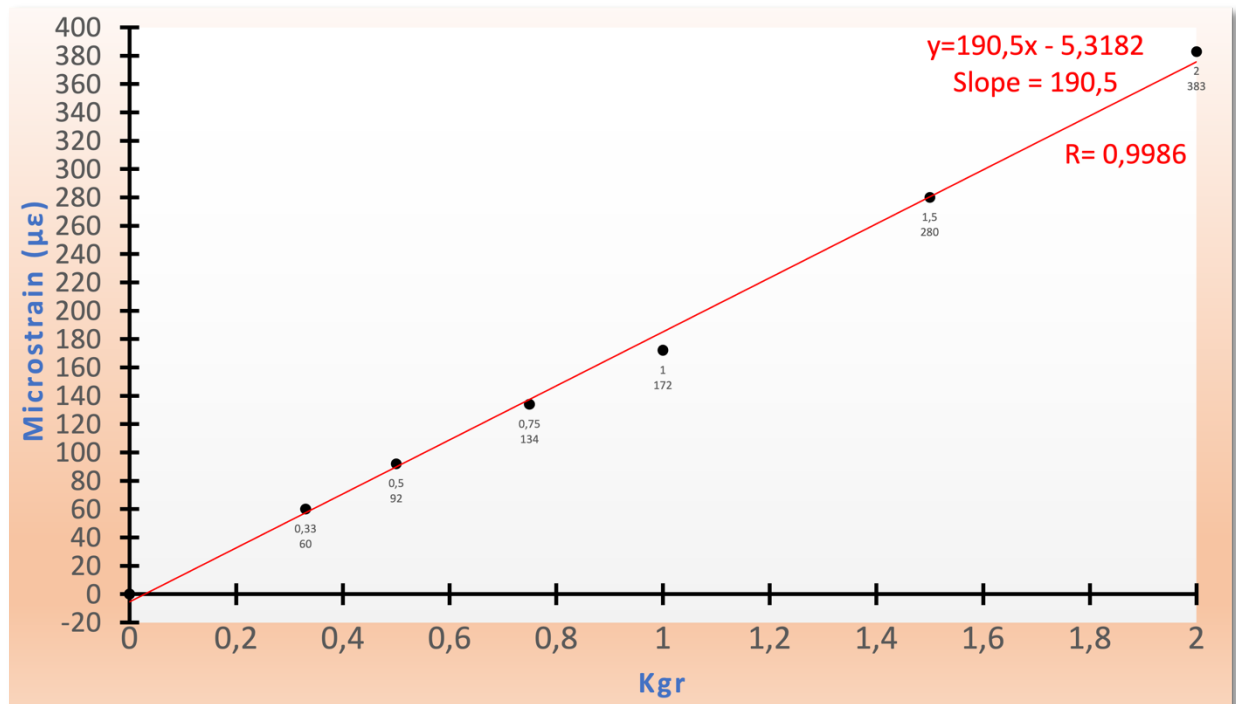
**Γράφημα 3.10:** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> σε κατάσταση εφελκυσμού με εφαρμογή διαφόρων ονομαστικών φορτίων στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.

Στη συνέχεια πραγματοποιούνται όλοι οι υπολογισμοί που χρειάζονται για τον υπολογισμό των microstrain όπως αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα 3.5.

Μετρήσεις FBG <sub>5</sub> σε εφελκυσμό σύμφωνα με τον σταθερό OSA					
Ονομαστικό Βάρος (Kgr)	Η Μετατόπιση Δl (μm)	Κεντρικό Μήκος Κύματος λ <sub>B(x)</sub> (nm)	Μεταβολή Ανακλώμενου Κεντρικού Μήκους Κύματος Δλ <sub>B(x)</sub> (nm)	$\frac{\Delta\lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}}$	Microstrain (μɛ)
0	0	1534,026	0	0	0
0,33	25,2	1534,118	0,092	0,000060	60
0,5	38,64	1534,168	0,142	0,000092	92
0,75	56,28	1534,232	0,206	0,000134	134
1	72,24	1534,29	0,264	0,000172	172
1,5	117,6	1534,456	0,43	0,000280	280
2	160,86	1534,614	0,588	0,000383	383

**Πίνακας 3.5:** Πίνακας μετρήσεων εφελκυσμού της ίνας σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA

Έπειτα φτιάξαμε ένα Γράφημα το οποίο έχει στον οριζόντιο άξονα τα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν σε Kgr και στον κατακόρυφο άξονα την επιμήκυνση εκφρασμένη σε microstrain.



Γράφημα 3.11: Γράφημα ευαισθησίας του FBG<sub>5</sub> σε εφελκυσμό

Στο Γράφημα 3.11 παρατηρείται πολύ καλή γραμμικότητα με την ευθεία προσαρμογής πολύ κοντά στις μετρήσεις. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι η ευαισθησία (κλίση ευθείας) είναι στα 190,5 με/Kgr ενώ η παλινδρόμηση (Regression) είναι  $R= 0,9986$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma = 7,46$  με.

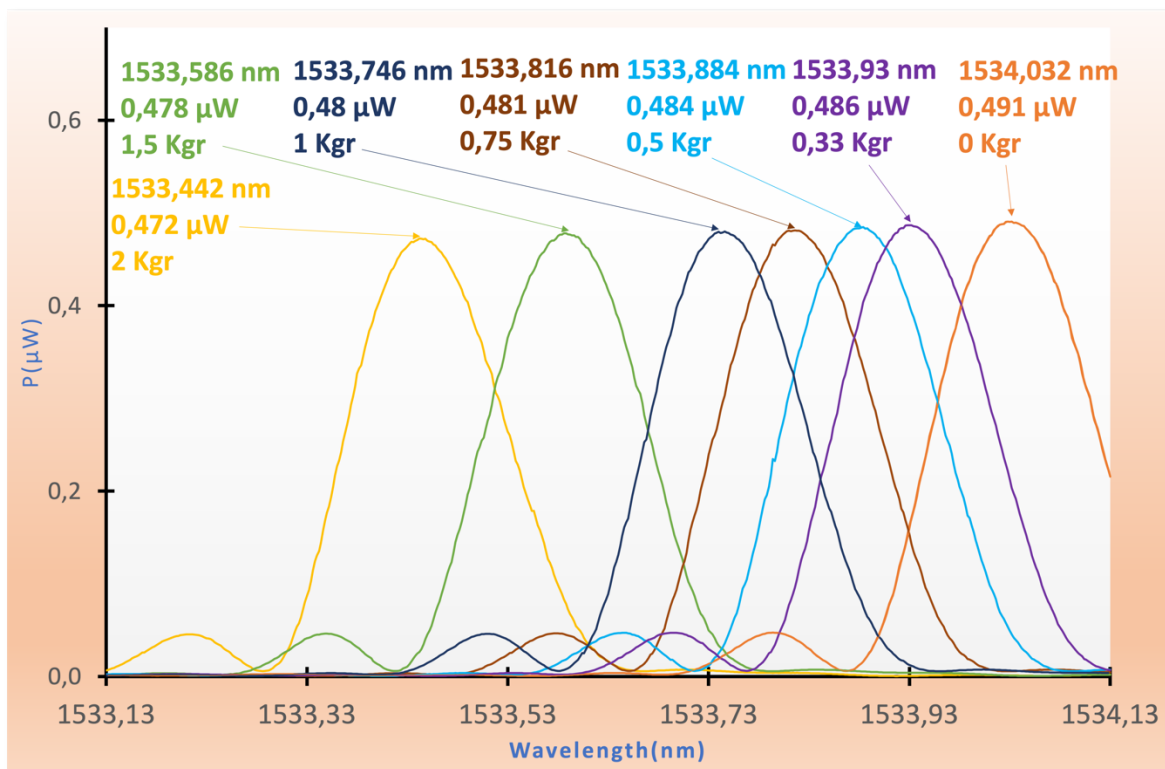
Στη συνέχεια τοποθετούμε τη ράβδο έτσι ώστε το αισθητήριο να υποβάλλεται σε θλιπτικές μεταβολές (δηλαδή να μειώνεται το μήκος του με την εφαρμοζόμενη δύναμη στο άκρο του προβόλου όπως στην Εικόνα 3.5).

Η ίνα είχε προενταθεί σε κατάσταση ηρεμίας όταν τοποθετήθηκε πάνω στην χαλύβδινη ράβδο. Το γεγονός όμως ότι περιβάλλεται από ελαστικό υλικό δεν βοηθά μόνο στην προστασία αλλά επιβάλλει στην ίνα να συρρικνωθεί όταν αυτό απαιτηθεί. Άρα στην περίπτωση της θλίψεως θα μπορεί να ανταποκριθεί.



Εικόνα 3.5: Περιστραμμένος 180° οπλισμός σκυροδέματος με το FBG<sub>5</sub> να βλέπει προς τα κάτω

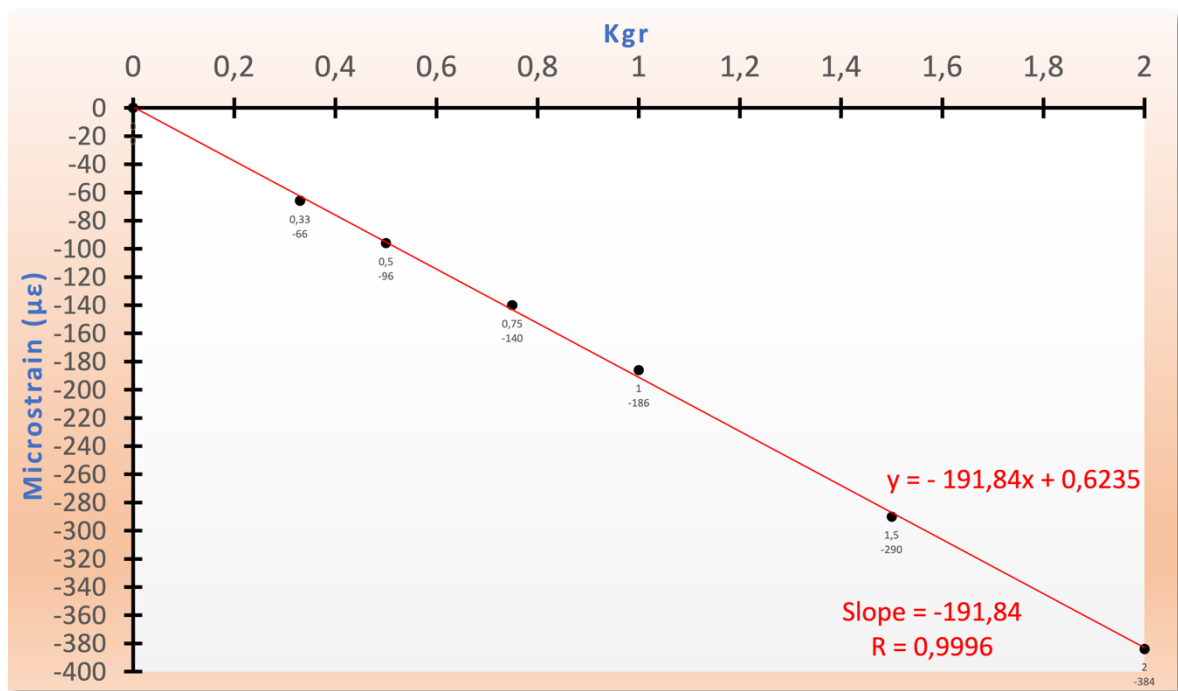
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση των ίδιων ακριβώς ονομαστικών βαρών 0,33 Kgr, 0,55 Kgr, 0,75 Kgr, 1 Kgr, 1,5 Kgr και 2 Kgr. Όπως παρουσιάζονται στο Γράφημα 3.12



**Γράφημα 3.12:** Μετατόπιση της φασματικής ανάκλασης του FBG<sub>5</sub> σε κατάσταση θλίψης με εφαρμογή διαφόρων ονομαστικών φορτίων στο ελεύθερο άκρο της ράβδου σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA.

Μετρήσεις FBG <sub>5</sub> σε θλίψη σύμφωνα με τον σταθερό OSA					
Ονομαστικό Βάρος (Kgr)	Η Μετατόπιση Δl (μm)	Κεντρικό Μήκος Κύματος λ <sub>B(x)</sub> (nm)	Μεταβολή Ανακλώμενου Κεντρικού Μήκους Κύματος Δλ <sub>B(x)</sub> (nm)	$\frac{\Delta\lambda_{B(x)}}{\lambda_{B(0)}}$	Microstrain (με)
0	0	1534,032	0	0	0
0,33	-27,72	1533,93	-0,102	-0,000066	-66
0,5	-40,32	1533,884	-0,148	-0,000096	-96
0,75	-58,8	1533,816	-0,216	-0,000140	-140
1	-78,12	1533,746	-0,286	-0,000186	-186
1,5	-121,8	1533,586	-0,446	-0,000290	-290
2	-161,28	1533,442	-0,59	-0,000384	-384

**Πίνακας 3.6:** Πίνακας μετρήσεων θλίψης της ίνας σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA



Γράφημα 3.13: Γράφημα ευαισθησίας του FBG<sub>5</sub> σε θλίψη

Στο Γράφημα 3.13 επίσης παρατηρείται πολύ καλή γραμμικότητα και βλέπουμε ότι η ευαισθησία (κλίση ευθείας) είναι στα -191,84 με/Kgr. Το αρνητικό πρόσημο είναι διότι έχουμε θλίψη (συρρίκνωση) της ίνας. Η παλινδρόμηση (Regression)  $R = 0,9996$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma = 3,43$

Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 3.7 με τι ακριβώς βάρη αντιλαμβάνεται το FBG<sub>5</sub> στις δυο περιπτώσεις είτε όταν εφελκύεται η ίνα είτε όταν συρρικνώνεται.

Μετρήσεις FBG <sub>5</sub> σύμφωνα με τον σταθερό OSA				
Κατάσταση FBG <sub>5</sub>	Ονομαστικό Βάρος (Kgr)	Διαμήκης Παραμόρφωση $\epsilon$ με βάση τη σχέση 3.10	Διαμήκης Παραμόρφωση $\epsilon$ με βάση τις μετρήσεις του OSA	Η δύναμη $F$ που αντιλαμβάνεται το FBG <sub>5</sub> (Kgr)
Εφελκυσμός	0	0	0	0
	0,33	0,000061	0,000060	0,3243
	0,5	0,000092	0,000092	0,5
	0,75	0,000138	0,000134	0,7242
	1	0,000185	0,000172	0,93
	1,5	0,000277	0,000280	1,513
	2	0,000370	0,000383	2,07
Θλίψη	0	0	0	0
	0,33	-0,000061	-0,000066	0,3567
	0,5	-0,000092	-0,000096	0,5189
	0,75	-0,000138	-0,000140	0,7567
	1	-0,000185	-0,000186	1,0053

	1,5	-0,000277	-0,000290	1,5674
	2	-0,000370	-0,000384	2,0754

**Πίνακας 3.7:** Πίνακας μετρήσεων εύρεσης της δύναμης  $F$  που αντιλαμβάνεται το FBG<sub>5</sub> σε εφελκυσμό και θλίψη σύμφωνα με τις μετρήσεις του σταθερού OSA

Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή γραμμική συμπεριφορά και πολύ μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις. Οι κλίσεις των ευθειών θλίψης και εφελκυσμού σχεδόν ταυτίζονται που σημαίνει ότι η ευαισθησία είναι ίδια παντού. Το μόνο που χρειάζεται κάποιος είναι να λάβει υπόψη του την θερμοκρασιακή αντιστάθμιση, ώστε να γνωρίζει αν αυτό που βλέπει είναι εξαιτίας της θερμοκρασιακής μεταβολής. Το FBG μπορεί να μετρήσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα φορτία σε πρόβολο όταν τηρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις (να έχει κολληθεί σωστά, να είναι συμπαγές το υλικό κλπ).

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά εξετάστηκε ο τρόπος διαβάσματος και χαρακτηρισμός των FBG μετά αλλά και κατά την διάρκεια της εγγραφής. Αυτό γιατί πρέπει κάποιος να γνωρίζει τι βλέπει κατά την εγγραφή ώστε να σταματήσει έγκαιρα τη διαδικασία ή να εντοπίσει πιθανά προβλήματα κατά την όλη διαδικασία. Με αυτές τις μετρήσεις των ανακλώμενων κυμάτων των FBG μέσω των δυο φασματικών αναλυτών διαπιστώθηκε ότι ο σταθερός αναλυτής έχει μεγάλη ακρίβεια (λόγω καλύτερου Resolution Bandwidth, καθώς σε εύρος μήκους κύματος 1 nm χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς 501 σημεία στην καμπύλη του φάσματος). Αντιθέτως, ο φορητός δεν έχει την ίδια ακρίβεια με τον σταθερό (διότι δεν έχει καλό Resolution Bandwidth, καθώς για το ίδιο εύρος μήκους κύματος 1 nm χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς 11 σημεία στην καμπύλη του φάσματος). Εντούτοις, οι τιμές του κεντρικού μήκους κύματος που εντοπίστηκαν για τα FBG<sub>1</sub> και FBG<sub>2</sub> με τους δύο οπτικούς αναλυτές (σταθερό και φορητό) είναι αρκετά κοντά, διότι αφενός μεν ο σταθερός OSA είναι εργαστηριακός και εκ των πραγμάτων πολύ ακριβής στις μετρήσεις του, αφετέρου ο φορητός χρησιμοποιεί κατάλληλο λογισμικό, που έχει δυνατότητα ρύθμισης και προσαρμογής των μετρήσεων του ώστε να ελαχιστοποιεί το σφάλμα αυτών. Έπειτα δείχθηκαν όλοι οι τρόποι υπολογισμού του ενεργού δείκτη διάθλασης  $n_{eff}$  που επηρεάζει όχι μόνο το μήκος του ανακλώμενου κύματος αλλά και της περιοδικότητας.

Στη συνέχεια με τη διαδικασία της βαθμονόμησης εστιάζοντας στα πιο βασικά συμπεράσματα αποδείχθηκε ότι η κάθε χάραξη στο μικρόμετρο αντιστοιχεί περίπου σε 4  $\mu\text{m}$ , συνεπώς ανά 5 γραμμές στην κλίμακα του μικρομέτρου αντιστοιχεί ως βήμα μεταβολής (επιμήκυνσης) της οπτικής ίνας περίπου 20  $\mu\text{m}$ . Επιβεβαιώθηκε η γραμμική συμπεριφορά του αισθητήρα.

Έπειτα προχωρήσαμε στην εφαρμογή πάνω σε πρόβολο αλουμινίου συμπεραίνοντας ότι ο αισθητήρας FBG<sub>4</sub> να μεν αποκρίνεται σε αυτό που περιμέναμε καθώς με την τοποθέτηση φορτίου και την καταπόνηση της ίνας το κεντρικό μήκος κύματος μετατοπίστηκε φασματικά κατά 0,68 nm τα οποία αντιστοιχούν σε 440 ( $\mu\text{ε}$ ). Αλλά τελικά η διαμήκης παραμόρφωση δηλαδή το βάρος που αντιλαμβάνεται το FBG<sub>4</sub> υπολογίστηκε στα 2,08 Kgr αποκλίνοντας σε σχέση με τα 2,5 Kgr που ήταν η τιμή του ονομαστικού βάρους. Συνεπώς αναλύθηκαν όλα τα πιθανά αίτια που μπορεί να προκάλεσαν αυτήν την απόκλιση με επικρατέστερο αυτό της συγκόλλησης. Επιπλέον διαπιστώθηκε η αξιοπιστία του φορητού οπτικού φασματικού αναλυτή. Καθώς οι φασματικές μεταβολές που εντόπιζε ήταν πάρα πολύ κοντά σε αυτές του σταθερού (σχεδόν ταυτίζονταν).

Τέλος πραγματοποιήθηκε μια ακόμη εφαρμογή πάνω σε πρόβολο, όμως με διαφορετικό υλικό πιο συγκεκριμένα σε χάλυβα οπλισμένου σκυροδέματος. Ο διαφορετικός τρόπος κόλλησης της ίνας πάνω σ' αυτό και η ομοιογένεια του υλικού οδήγησαν σε πολύ μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων. Μη αποκλίνοντας στις μετρήσεις σε καμία από τις περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν, είτε στον εφελκυσμό είτε στην θλίψη της ίνας.

Με αυτά τα αποτελέσματα των μετρήσεων από το κολλημένο FBG πάνω στον οπλισμό σκυροδέματος μπορεί στο μέλλον να τοποθετηθεί μέσα σε σκυρόδεμα αυτός ο οπλισμός και να παρθούν πραγματικές μετρήσεις φόρτισης που αφορούν μια δοκό ως στοιχείο δόμησης πιθανόν σε συνεργασία με το τμήμα πολιτικών μηχανικών.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., & Kawasaki, B. S. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied physics letters*, 32(10), 647-649.
- [2] Bass, M. (2021). *Fiber optics handbook fiber, devices, and systems for optical communications*.
- [3] Yin, S., Ruffin, P. B., & Francis, T. S. (Eds.). (2017). *Fiber optic sensors*. CRC press.
- [4] Kreuzer, Manfred. "Strain measurement with fiber Bragg grating sensors." *HBM, Darmstadt, S2338-1.0 e* (2006): 12.
- [5] Gao, W., Liu, J., Guo, H., Jiang, X., Sun, S., & Yu, H. (2022). Multi-Wavelength ultra-weak fiber bragg grating arrays for long-distance quasi-distributed sensing. *Photonic Sensors*, 12(2), 185-195.
- [6] Kashyap, R. (2009). *Fiber bragg gratings*. Academic press.
- [7] Stathopoulos, N. A., & Simos, I. (2022). Modelling of non-uniform and fs-Laser inscribed fibre Bragg gratings. *Optical Fiber Technology*, 70, 102878.
- [8] Deery, J. (2007). The Real History of Real-Time Spectrum Analyzers. *Sound and vibration*, 54-59.
- [9] Rao, Y. J. (1997). In-fibre Bragg grating sensors. *Measurement science and technology*, 8(4), 355.
- [10] Ghiringhelli, F. (2004). *Fundamental properties of Bragg gratings and their application to the design of advanced structures*.
- [11] Suchat, S., & Yupapin, P. P. (2003). A phase mask fiber grating and sensing applications. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 25(5).
- [12] He, J., Xu, B., Xu, X., Liao, C., & Wang, Y. (2021). Review of femtosecond-laser-inscribed fiber bragg gratings: Fabrication technologies and sensing applications. *Photonic Sensors*, 11(2), 203-226.
- [13] Martinez, A., Dubov, M., Khrushchev, I., & Bennion, I. (2004). Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser. *Electronics Letters*, 40(19), 1.
- [14] Dewra, S., & Grover, A. (2015). Fabrication and applications of fiber Bragg grating-a review. *Advanced Engineering Technology and Application*, 4(3), 7-17.
- [15] Alavie, A. T., Maaskant, R., Ohn, M. M., Karr, S. E., & Huang, S. Y. (1994, September). Bragg grating structural sensing system for bridge monitoring. In *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV* (Vol. 2294, pp. 53-59). SPIE.
- [16] Peral, E., Capmany, J., & Marti, J. (1996). Iterative solution to the Gel'Fand-Levitan-Marchenko coupled equations and application to synthesis of fiber gratings. *IEEE journal of quantum electronics*, 32(12), 2078-2084.
- [17] Othonos, A., Kalli, K., Pureur, D., & Mugnier, A. (2006). *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Springer Series in Optical Sciences, 123, 189-269.
- [18] Tosi, D. (2018). Review of chirped fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications. *Sensors*, 18(7), 2147.
- [19] Ouellette, F. (1991). All-fiber filter for efficient dispersion compensation. *Optics letters*, 16(5), 303-305.



- [20] James, S. W., & Tatam, R. P. (2003). *Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. Measurement science and technology*, 14(5), R49.
- [21] Chiavaioli, F., Baldini, F., & Trono, C. (2017). *Manufacturing and spectral features of different types of long period fiber gratings: Phase-shifted, turn-around point, internally tilted, and pseudo-random. Fibers*, 5(3), 29.
- [22] Campanella, C. E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A., & Passaro, V. M. (2018). *Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications. Sensors*, 18(9), 3115.
- [23] Broderick, N. R., & de Sterke, C. M. (1997). *Theory of grating superstructures. Physical review E*, 55(3), 3634.
- [24] Mizrahi, V., & Sipe, J. E. (1993). *Optical properties of photosensitive fiber phase gratings. Journal of lightwave technology*, 11(10), 1513-1517.
- [25] Gabriele Comanducci, Filippo Ubertini, Annibale Luigi Materazzi, *Structural health monitoring of suspension bridges with features affected by changing wind speed, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, June 2015.*
- [26] Udd, E., & Spillman Jr, W. B. (Eds.). (2011). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. John Wiley & Sons.*
- [27] Instruments, N. (2016). *Measuring strain with strain gages. Natl. Instruments Meas. Fundam. Ser*, 2, 1-6.
- [28] Gautschi, G. (2002). *Piezoelectric sensors. In Piezoelectric Sensorics (pp. 73-91). Springer, Berlin, Heidelberg.*
- [29] Ν. Σταθόπουλος «Μετρήσεις – ΗΝ Συστήματα Μετρήσεων και Αισθητήρια», , Εκδ. Αράκυνθος, (2017).
- [30] Senior, J. M., & Jamro, M. Y. (2009). *Optical fiber communications: principles and practice. Pearson Education.*
- [31] Galle, M. A. (2007). *Single-arm 3-wave interferometer for measuring dispersion in short lengths of fiber. University of Toronto.*
- [32] «Στατική – Μηχανική απαραμόρφωτου στερεού », 904 σελίδες, Εκδ. Ανδρομάχη Βουθούνη, (2018).
- [33] Ye, X. W., Ni, Y. Q., & Yin, J. H. (2013). *Safety monitoring of railway tunnel construction using FBG sensing technology. Advances in Structural Engineering*, 16(8), 1401-1409.
- [34] Lee, K. Y., Lee, K. K., & Ho, S. L. (2004). *Exploration of using FBG sensor for axle counter in railway engineering. WSEAS Trans. on Sys*, 6, 2440-2447.
- [35] Caponero, M., D'Amato, R., Polimadei, A., & Terranova, G. (2018). *Polymer-coated FBG humidity sensors for monitoring cultural heritage stone artworks. Measurement*, 125, 325-329.
- [36] Yang, J., Wang, W., Li, Y., Qiao, L., & Liu, C. (2020). *A Fiber Bragg Grating Acceleration Sensor for Measuring Bow Slamming Load. In Communications, Signal Processing, and Systems: Proceedings of the 8th International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems 8th (pp. 422-430). Springer Singapore.*
- [37] Shen, W., Yan, R., Xu, L., Tang, G., & Chen, X. (2015). *Application study on FBG sensor applied to hull structural health monitoring. Optik*, 126(17), 1499-1504.
- [38] *Engineering ToolBox*, (2003). *Young's Modulus, Tensile Strength and Yield Strength Values for some Materials. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d\\_417.html](https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html) [Accessed 19-2-22 ].*

- [39] Gross, D., Ehlers, W., Wriggers, P., Schröder, J., Müller, R., Gross, D., ... & Müller, R. (2017). *Moments of Inertia. Statics–Formulas and Problems: Engineering Mechanics 1*, 217-236.
- [40] Singh, Y., Raghuwanshi, S. K., Prakash, O., & Saini, P. K. (2021). *Design and development of tilted fiber Bragg grating (TFBG) chemical sensor with regression analysis of grating parameters for sensitivity optimization. Optical and Quantum Electronics*, 53, 1-14.
- [41] Chen, C., Xiong, L., Caucheteur, C., Mégret, P., & Albert, J. (2006, October). *Differential strain sensitivity of higher order cladding modes in weakly tilted fiber Bragg gratings. In Photonic Applications for Aerospace, Transportation, and Harsh Environments (Vol. 6379, pp. 113-119). SPIE.*
- [42] Korposh, S., James, S. W., Lee, S. W., & Tatam, R. P. (2019). *Tapered optical fibre sensors: Current trends and future perspectives. Sensors*, 19(10), 2294.
- [43] Young, W. C., Budynas, R. G., & Sadegh, A. M. (2012). *Roark's formulas for stress and strain. McGraw-Hill Education.*

## Παράρτημα Α

### Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κυκλοφορητή (Circulator)

<b>Part Number</b>	<b>FOC3PC1FA</b>		
<b>Serial Number</b>	<b>A8031192</b>		
<b>Date of Production</b>	<b>8/7/2013</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Unit</b>	<b>Specifications</b>	<b>Test Data</b>
Center Wavelength	nm	1550	1550
Bandwidth	nm	± 40	±40
Insertion Loss ( Port 1 to Port 2)	dB	<0.8	0.63
Insertion Loss ( Port 2 to Port 3)	dB	<0.8	0.58
PDL (Port 1 to Port 2 )	dB	≤0.15	0.05
PDL (Port 2 to Port 3 )	dB	≤0.15	0.07
Minimum Isolation at 23°C	dB	≥40	53
DIR	dB	≥50	58
Return Loss	dB	≥45	57
connector Type	FC/APC		
Fiber Type	SMF-28e with 900um loose tube		
Fiber Length	m	1.0	
Optical Power (CW)	mW	≤300	
Operation Temperature	°C	0 to +70	
Storage Temperature	°C	- 40 to +85	
Dimension	mm	Φ5.5 x 50	

## Παράρτημα Β

### Τεχνικά Χαρακτηριστικά Οπτικού Αναλυτή Φάσματος (Optical Spectrum Analyzer -OSA)

#### Optical Spectrum Analyzer MS9740A Specifications

##### Optical Spectrum Analyzer MS9740A

Supported Optical Fiber	SM fiber (ITU-T G.652), 50 μm/125 μm GI fiber*1, PC Connector (reflection attenuation 40 dB or more)	
Optical Connector	User replaceable: FC, SC, ST, DIN (All connectors are PC polished.)	
Wavelength Measurement Range	600 nm to 1750 nm	
Wavelength Accuracy*2	±20 pm (1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.03 nm to 0.2 nm), ±100 pm (1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.5 nm, 1.0 nm)*3 ±300 pm (600 nm to 1520 nm), ±200 pm (1520 nm to 1570 nm), ±300 pm (1570 nm to 1750 nm)*4	
Wavelength Stability*2	±5 pm (1 min, smoothing: 11 pt, at center wavelength of half maximum, Using SM fiber)	
Wavelength Linearity*2	±20 pm (1520 nm to 1620 nm)	
Setting Resolution	0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 nm (0.03 nm, 0.05 nm only 1550 nm band and room temperature)	
Resolution Accuracy*2, *5	±7% (Resolution: 0.1 nm), ±3% (Resolution: 0.2 nm), ±2.2% (Resolution: 0.5 nm) [1520 nm to 1620 nm] ±30% (Resolution: 0.1 nm), ±15% (Resolution: 0.2 nm), ±7% (Resolution: 0.5 nm) [600 nm to 1520 nm, 1620 nm to 1750 nm]	
Measurement Range*2	-65 to +10 dBm (600 nm to 1000 nm), -85 to +10 dBm (1000 nm to 1250 nm), -90 to +10 dBm (1250 nm to 1600 nm), -85 to +10 dBm (1600 nm to 1650 nm), -65 to +10 dBm (1650 nm to 1700 nm), -55 to +10 dBm (1700 nm to 1750 nm) [5° to 30°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: Off] -60 to +10 dBm (600 nm to 1000 nm), -80 to +10 dBm (1000 nm to 1250 nm), -85 to +10 dBm (1250 nm to 1600 nm), -80 to +10 dBm (1600 nm to 1650 nm), -60 to +10 dBm (1650 nm to 1700 nm), -50 to +10 dBm (1700 nm to 1750 nm) [30° to 45°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: Off] -70 to +23 dBm (1100 nm to 1600 nm), [5° to 30°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: On] -65 to +23 dBm (1100 nm to 1600 nm), [30° to 45°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: On]	
Level Accuracy*2, *6	±0.4 dB (Wavelength: 1310 nm, 1550 nm, Input: -10 dBm, Resolution: 0.1 nm to 1.0 nm)	
Level Stability*2	±0.02 dB (1 min, Wavelength: 1550 nm, Input: -23 dBm, Resolution: 0.1 nm to 1.0 nm, no polarization fluctuation)	
Level Linearity*2	±0.05 dB (Wavelength: 1550 nm, Input: -50 to 0 dBm, Optical Att: Off) ±0.05 dB (Wavelength: 1550 nm, Input: -30 to +20 dBm, Optical Att: On)	
Level Flatness*2, *7	±0.1 dB (Wavelength: 1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.5 nm, Optical Att: Off)	
Polarization Dependency*2	±0.05 dB (Wavelength: 1550 nm/1600 nm), ±0.1 dB (Wavelength: 1310 nm), [Resolution: 0.5 nm, 1.0 nm]	
Dynamic Range*2	High dynamic range: 70 dB (1 nm from peak wavelength), 60 dB (0.4 nm from peak wavelength), 42 dB (0.2 nm from peak wavelength) Normal dynamic range: 62 dB (1 nm from peak wavelength), 58 dB (0.4 nm from peak wavelength), 42 dB (0.2 nm from peak wavelength) [Wavelength: 1550 nm, Resolution: 0.05 nm, Optical Att: Off, 20° to 30°C]	
Optical Return Loss*2	≥35 dB (Using SM fiber with wavelength of 1300 nm and 1550 nm)	
Sweep	Sweep width: 0.2 nm to 1200 nm, 0 nm Sweep speed: ≤0.2 s (span: 5 nm, Resolution: 0.1 nm), ≤0.3 s (span: 500 nm) [VBW: 10 kHz, Normal dynamic range, center 1550 nm (span: 5 nm), 1200 nm (span: 500 nm), sweep start to stop, no optical input, sampling point: ≤501]	
Display	800 × 600 dots, 8.4 inch SVGA color LCD	
Function	Measurement functions: Auto Measure, Optical pulse measurement (External trigger), Power monitor Display functions: Normalized, Max Hold, Min Hold, Overlap, Value in Air/Vacuum, Effective Resolution, Multi fiber mode Analysis functions: Wavelength Subtraction, Marker, Wavelength Analysis (Threshold, ndB-Loss, Envelope, RMS, SMSR, Spectrum Power), Light Source Evaluation (FP-LD, DFB-LD, LED, LD Module), Optical AMP NF Evaluation, PMD Measurement, WDM Signal Evaluation, WDM Filter Analysis Calibration functions: Auto Align, Wavelength cal., Level offset, Wavelength offset Memory function: Display measurement data to memory A to J (10 waveforms) Interfaces: Ethernet, GPIB (Option) Input/Output function I/O: Save and read files to USB memory Input: External trigger terminal (0 to 0.8 V/2 V to 5 V, high impedance) Output: Measured data text file output, measurement screen file (BMP, PNG) output, VGA output	
Operating Conditions	Operating temperature: +5° to +45°C, Storage temperature: -20° to +60°C, Relative humidity: 0 to 90% (no condensation)	
Power Supply	100 V(ac) to 120 V(ac)/200 V(ac) to 240 V(ac), 50 Hz to 60 Hz, ≤75 VA	
Dimensions and Mass	426 (W) × 177 (H) × 350 (D) mm (excluding projections), ≤15.0 kg (without options)	
CE	EMC	2014/30/EU, EN61326-1, EN61000-3-2
	LVD	2014/35/EU, EN61010-1
	RoHS	2011/65/EU, EN50581
Remote Control Interfaces	Ethernet, GPIB (Opt-001)*8	

## Παράρτημα Γ

### Τεχνικά Χαρακτηριστικά Πηγής Ευρείας Ζώνης Φάσματος (Benchtop BroadBand Source-BBS)

**Datasheet of BaySpec MiniLite Wide-band Light Source (MWLS)**

Model Number:	MWLS-C-1550-040-SM-FA
Serial Number:	011308000889
Test Date:	08/07/2013

Parameter	Value
Power Supply Requirement	DC +5V/2A
Maximum Power Consumption	7 W
Storage Temperature	-40 to 85 °C
Operating Temperature	0 to 65 °C
Total Output Power	13.5mW
Peak Wavelength	1560.59nm
Center Wavelength	1558.45nm
3dB Bandwidth	42.10nm
Package Type	Card-mount
Package Dimension (WxHxD)	120x95x13 mm <sup>3</sup>
Optical Fiber Pigtail Type	SMF-28, 900μm tight buffer
Optical Connector	FC/APC