



**Τ.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ**

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΜΕΘΟΔΟΥ WLRS**

Όνομα Σπουδαστή ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Όνομα Επιβλέποντα Καθηγητή ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ**

**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2018**

# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 1**

<b><u>1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 2</u></b>
1.1 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ	ΣΕΛΙΔΑ 2
1.2 ΦΩΤΟΝΙΚΗ	ΣΕΛΙΔΑ 3
1.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ	ΣΕΛΙΔΑ 4-5
1.4 MEMS/SENSORS	ΣΕΛΙΔΑ 5
1.5 ΒΙΟΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ	ΣΕΛΙΔΑ 6
1.6 ΠΟΛΥΜΕΡΗ	ΣΕΛΙΔΑ 7
1.7 ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ (optical coatings)	ΣΕΛΙΔΑ 7-8
1.8 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΣΕΛΙΔΑ 8
1.9 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΣΕΛΙΔΑ 9

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 2**

<b><u>2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΥ ΘΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΟΥΜΕ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 10</u></b>
2.1 SINGLE WAVEFORM INTERFEROMETRY (SWI)	ΣΕΛΙΔΑ 14
2.2 WHITE LIGHT REFLECTANCE SPECTROSCOPY (WLRS)	ΣΕΛΙΔΑ 16

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 3**

<b><u>3. FR BASIC</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 19</u></b>
3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ FR-BASIC	ΣΕΛΙΔΑ 19
3.2 ΑΝΑΦΟΡΑ ΜΕΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ 20
3.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ 22

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 4**

<b><u>4.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 25</u></b>
4.1.1 ΣΚΟΤΕΙΝΟ ΦΑΣΜΑ (Dark Spectrum)	ΣΕΛΙΔΑ 25
4.1.2 ΦΑΣΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ(Reference Spectrum)	ΣΕΛΙΔΑ 25
<b><u>4.2 ΠΡΟΕΤΙΜΑΖΟΝΤΑΣ ΤΟ FR-BASIC ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 26</u></b>

## **ΕΝΟΤΗΤΑ 5**

<b><u>5.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 30</u></b>
5.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ 30
5.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ	ΣΕΛΙΔΑ 31
5.1.3 FITTING ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ	ΣΕΛΙΔΑ 32
<b><u>5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΙΟΥ 2 ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ Si3N4/SiO2/Si</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 36</u></b>
5.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ Si3N4	ΣΕΛΙΔΑ 36
5.2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ	ΣΕΛΙΔΑ 36
5.2. FITTING ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ	ΣΕΛΙΔΑ 37
<b><u>5.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΙΟΥ 3 ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ POLY-Si/Si3N4/SiO2</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 41</u></b>
5.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ POLY-Si	ΣΕΛΙΔΑ 41
5.3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ	ΣΕΛΙΔΑ 41
5.3.3 FITTING ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ	ΣΕΛΙΔΑ 42
<b><u>6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b>	<b><u>ΣΕΛΙΔΑ 45</u></b>

## ΕΝΟΤΗΤΑ 1

### 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια ειδικότερα έχουμε παρατηρήσει την εμφάνιση νέων τεχνολογιών όσο αναφορά τον τομέα των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα , ο τομέας των μετρήσεων ήταν ανέκαθεν σημαντικό κομμάτι της εξέλιξης των τεχνολογιών . Προκειμένου να τοποθετηθούν κάποια υλικά σε κάποια συστήματα δεν θα μπορούσε φυσικά η επιλογή τους να είναι τυχαία .Τα υλικά αυτά θα έπρεπε να περάσουν από διάφορα στάδια εξέτασης έτσι ώστε να κριθούν κατάλληλα για το σύστημα στο οποίο θα τοποθετηθούν. .

Για παράδειγμα στις φωτοβολταϊκές συσκευές η αποδοτικότητα εξαρτάται άμεσα στις ιδιότητες των επιπέδων του φωτοβολταϊκού πιο συγκεκριμένα στα υλικά **μονοκρυσταλικο πυριτιο(monocrystalline-Si)**, **πολυκρυσταλικο πυριτιο(polycrystalline-Si)** και **amorphous –Si, CIGS**). Για τον λόγο αυτό ο *δείκτης διάθλασης* και το *πάχος* του κάθε επιπέδου στην στοίβα των φωτοβολταϊκων πρέπει να μετρηθεί με μεγάλη ακριβεια.

Ετσι λοιπόν εμείς θα ασχοληθουμε με το κομματι των μετρήσεων συγκεκριμένων ιδιοτήτων των υλικών όπως **απορροφηση,διαπερατοτητα, φθορισμό, ανακλαστικότητα** .Οι συγκεκριμένες ιδιότητες αφορούν ως επι των πλείστον τους παρακάτω τομείς

#### 1.1 Ημιαγωγοί

**Ημιαγωγός** είναι κάθε υλικό που έχει ειδική αντίσταση με τιμές ανάμεσα σε αυτές των μονωτών (μεγάλη) και των αγωγών (μικρή) και που εμφανίζει ραγδαία μείωση της ειδικής του αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Ένας ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο, στην καθαρή κρυσταλλική του μορφή, είναι καλός μονωτής. Ωστόσο, όταν έστω και ένα άτομο μέσα σε εκατομμύρια αντικατασταθεί από μία πρόσμιξη (φωσφόρος ή αρσενικό) που προσθέτει ένα ηλεκτρόνιο από την κρυσταλλική δομή τότε η αγωγιμότητά τους αυξάνεται θεαματικά. Το ίδιο συμβαίνει αν η πρόσμιξη γίνει με άτομο που αφαιρεί ηλεκτρόνιο (βόριο, αργίλιο ή γάλλιο). Στην πρώτη περίπτωση, προκύπτει

ημιαγωγός τύπου  $n$  ( $n$  από negative καθώς έχουμε παραπάνω ηλεκτρόνια άρα και φορείς αρνητικού φορτίου) και στη δεύτερη τύπου  $p$  ( $p$  από positive καθώς έχουμε επιπλέον οπές που δηλώνουν απουσία ηλεκτρονίων άρα ύπαρξη θετικού φορτίου). Αυτός ο τρόπος πρόσμιξης ονομάζεται doping (νόθευση).

Λεπτά στρώματα ημιαγωγών υλικών συσκευασμένα μαζί συνθέτουν διάφορους τύπους τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές που αφορούν, μεταξύ άλλων, τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Το τρανζίστορ, η κρυσταλλοδίοδος, η δίοδος Zener, η δίοδος Tunnel και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι μερικά από τα στοιχεία που ανήκουν στους ημιαγωγούς.

Για την κατασκευή ηλεκτρονικών υποδομών και συσκευών χρειάζεται ένας συγκεκριμένος αριθμός διαδικασιών. Διάφορα υμενία (films) διαφόρων υλικών και σχημάτων, μεγεθών περιλαμβάνονται προκειμένου να έρθει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τα πιο σύνηθες υλικά είναι το πυρίτιο (Si) είτε στην μονοκρυσταλλική (monocrystalline) μορφή του, είτε στην πολυκρυσταλλική (poly-si) μορφή του, διηλεκτρικά υλικά όπως **SiO<sub>x</sub>**, **Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**, **HfO<sub>2</sub>**, φωτοαντιστάσεις,

## **1.2 Φωτονική**

**Φωτονική** ονομάζεται ο κλάδος των επιστημών και της τεχνολογίας που ασχολείται με την δημιουργία, τον έλεγχο και την ανίχνευση φωτονίων ιδιαίτερα στην περιοχή του ορατού φωτός και στο κοντινό υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Η Φωτονική ως επιστήμη σχετίζεται με την κβαντική οπτική και την οπτοηλεκτρονική, ενώ τα όρια μεταξύ τους δεν είναι σαφή. Συνήθως με τον όρο «κβαντική οπτική» αναφέρεται κανείς στην βασική έρευνα και με τον όρο «φωτονική» αναφέρεται στην εφαρμοσμένη έρευνα. Ο όρος «οπτοηλεκτρονική» αναφέρεται στην στενή περιοχή της μελέτης ενεργών αλλά και παθητικών υλικών που αλληλεπιδρούν ηλεκτρικά με το φως. Επιπλέον, δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ αυτών των πεδίων και της

οπτικής, ενώ χρησιμοποιούνται διαφορετικοί ορισμοί σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και σε διαφορετικές βιομηχανίες. Το πεδίο της φωτονικής παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις οπτικές τηλεπικοινωνίες.

Η φωτονική ως πεδίο εμφανίστηκε ουσιαστικά το 1960, με την εφεύρεση των λείζερ. Κατά την διάρκεια του 1970 η ανάπτυξη των οπτικών ινών όπως επίσης και των ενισχυτών προσμίξεων Ερβίου αποτέλεσαν την κύρια εφαρμογή της φωτονικής και έθεσαν τις βάσεις για την ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιών στα τέλη του 20ου αιώνα, ενώ παρείχαν την απαραίτητη υποδομή για την ανάπτυξη του διαδικτύου.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη της φωτονικής σε περιοχές που δεν αφορούν τις τηλεπικοινωνίες και το διαδίκτυο. Επιπλέον αναμένεται τεράστια ανάπτυξη του πεδίου αυτού αν ευοδωθούν οι προσπάθειες κατασκευής φωτονικών διατάξεων από πυρίτιο (*silicon photonics*).

Στην φωτονική η μέτρηση της απορροφητικότητας, διαπερατότητας, ανακλαστικότητας, φωταύγειας-φωτοβολίας, σε υποδομές και συσκευές είναι αναγκαία. Στην περίπτωση των Φωτονικών κρυστάλλων (Photonic Crystals) οι οποίοι αποτελούνται από περιοδικά διηλεκτρικά υλικά τα οποία είναι σχεδιασμένα να επηρεάζουν την κίνηση των φωτονίων ελέγχοντας, «παγιδεύοντας», καμπυλώνοντας, αλλάζοντας, ανακλώντας και αποδοτικά εξάγοντας φως το οποίο εκπέμπεται από ενσωματωμένους ημιαγωγούς. Είναι απαραίτητο να μετρηθεί λοιπόν με ακρίβεια το πάχος του κάθε υμενίου και η γενική οπτική απόδοση του συστήματος.

### **1.3 Φωτοβολταικα**

Με τον γενικό όρο **Φωτοβολταικά** ονομάζεται η βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταικών κυττάρων σε μία σειρά. Στην ουσία πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς (συνήθως από Πυρίτιο) οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μια Ηλεκτρική τάση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται "Φωτοβολταικό φαινόμενο".

Τα φωτοβολταικά ανήκουν στη κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Στην κατηγορία των ανανεώσιμων ηλιακών πηγών ενέργειας, τα ηλιοθερμικά συστήματα είναι πιο αποδοτικά από τα φωτοβολταικά<sup>[1][2]</sup>.

Τα Φ/Β πλαίσια έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο (solar cell) που είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός μικρού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Τα Φ/Β στοιχεία ομαδοποιούνται κατάλληλα και συγκροτούν τα φωτοβολταικά πλαίσια ή γεννήτριες (module), τυπικής ισχύος από 20W έως 300W. Οι Φ/Β γεννήτριες συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους και δημιουργούνται οι φωτοβολταικές συστοιχίες (arrays).

Τα **φωτοβολταικά** είναι διατάξεις που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα από την ηλιακή ακτινοβολία. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα χρησιμοποιείται για να δώσει ενέργεια σε μια συσκευή ή για τη φόρτιση μπαταρίας. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε μικροϋπολογιστές τσέπης που λειτουργούν χωρίς μπαταρία, απλώς με την έκθεσή τους στο φως.

Τα φωτοβολταικά χρησιμοποιούνται συχνά σε συστοιχίες για την παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Σε τέτοια μορφή χρησιμοποιούνται για να δίνουν ενέργεια σε δορυφόρους, διαστημόπλοια, αλλά και σε απλούστερες εφαρμογές, όπως για την ενεργειοδότηση απομακρυσμένων τηλεφώνων εκτάκτου ανάγκης σε εθνικές οδούς, σε σπίτια κλπ.

Σε πολλές χώρες έχουν ξεκινήσει προγράμματα επιδότησης των επενδύσεων σε φωτοβολταικά, τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια που μεταπωλείται

και εισάγεται στα δημόσια δίκτυα μεταφοράς. Τα προγράμματα αυτά έχουν στόχο τη διαφοροποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τη σταδιακή απεξάρτησή της από το πετρέλαιο.

Η θερμοκρασία είναι μια σημαντική παράμετρος λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος. Όπως έχουμε δει ο συντελεστής θερμοκρασίας για την τάση ανοικτού κυκλώματος είναι κατά προσέγγιση ίσος με  $-2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  για καθένα ηλιακό στοιχείο. Ο συντελεστής τάσης μιας βασικής μονάδας είναι επομένως αρνητικός και πολύ μεγάλος από τη στιγμή που συνδέονται σε σειρά 33 έως 36 ηλιακά στοιχεία. Ο συντελεστής ρεύματος, από την άλλη πλευρά, είναι θετικός και μικρός, περίπου  $+6 \text{ }\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$  ανά τετραγωνικό εκατοστό της βασικής μονάδας. Συνεπώς, μόνο η μεταβολή τάσης σε σχέση μ' αυτή της θερμοκρασίας λαμβάνεται υπόψη για πρακτικούς κυρίως υπολογισμούς, ενώ για κάθε βασική μονάδα αποτελούμενη από  $n_c$  ηλιακά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ισούται προς:

Είναι σημαντικό να σημειώσετε ότι η τάση καθορίζεται από τη θερμοκρασία λειτουργίας των ηλιακών στοιχείων, η οποία διαφέρει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Όπως και για καθένα ηλιακό στοιχείο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  μιας βασικής μονάδας είναι ανάλογο προς την ακτινοβολία και επομένως θα ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας κατά τον ίδιο τρόπο. Εφόσον η τάση είναι λογαριθμική συνάρτηση του ρεύματος, θα εξαρτάται επίσης λογαριθμικά και από την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια της ημέρας επομένως η τάση θα μεταβάλλεται λιγότερο από ότι το ρεύμα. Στο σχεδιασμό της Φ/Β γεννήτριας είναι συνηθισμένο να παραμελείται η μεταβολή της τάσης και να λαμβάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος ανάλογο προς την ακτινοβολία.

Η λειτουργία μιας βασικής μονάδας θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος. Είναι ένα σημαντικό γνώρισμα της χαρακτηριστικής της βασικής μονάδας, το ότι η τάση του σημείου μέγιστης ισχύος  $V_m$  είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ακτινοβολία. Η μέση τιμή αυτής της τάσης κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να εκτιμηθεί στο 80% της τάσης ανοικτού κυκλώματος κάτω από κανονικές συνθήκες ακτινοβολίας. Αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη για τη σχεδίαση της μονάδας ελέγχου της ισχύος της συσκευής.

Στα φωτοβολταικα λοιπόν η απόδοση εξαρτάται από τις ιδιότητες των στρωμάτων (layers) που αποτελούν την φωτοβολταικη διαταξη (monocrystalline-Si, Polycrystalline-Si, Amorphous-Si (thin film), CIGS) .Για τον λογο αυτό ο δείκτης διάθλασης και το πάχος κάθε στρώματος (layer) στην φωτοβολταικη στοιβάδα πρέπει να μετριέται με μεγάλη ακρίβεια.

#### **1.4 MEMS/SENSORS**

**Αισθητήρας** ονομάζεται μία συσκευή που ανιχνεύει ένα φυσικό μέγεθος και παράγει από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο. Για παράδειγμα, το υδραργυρικό θερμομέτρο μετατρέπει τη μετρούμενη θερμοκρασία σε διαστολή, η οποία μπορεί να αναγνωστεί από ένα βαθμονομημένο σωλήνα.

Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε καθημερινά αντικείμενα, όπως κουμπιά ανελκυστήρων ευαίσθητα στην αφή και λάμπες φωτισμού που εκπέμπουν λαμπρότερα ή απαλότερα αγγίζοντας τη βάση τους. Υπάρχουν αναρίθμητες ακόμη χρήσεις που οι περισσότεροι άνθρωποι δεν αντιλαμβάνονται. Εφαρμογές τους συναντούμε στα αυτοκίνητα, σε μηχανές, στην αεροναυπηγική, την ιατρική, τη βιομηχανία και τη ρομποτική.

Στις συσκευές αισθητήρων χρησιμοποιούνται μερικά λεπτά η χοντρά υμενια. Για παράδειγμα στους αισθητήρες με πολυμερή επικάλυψη το πάχος του υμενίου(film) και ο δείκτης διαπερατότητας αλλάζουν λογο τις αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον .Αυτό επηρεάζει την σωστή λειτουργία του αισθητήριου η της συσκευής.



## 1.5 Βιοαισθητήρες

Οι Clark και Lyons υπήρξαν πρωτοπόροι στη σύλληψη της έννοιας των βιοαισθητήρων με μία δημοσίευσή τους το 1962. Ειδικότερα, έκαναν αναφορά σε ένα 'ένζυμικό ηλεκτρόδιο' αποτελούμενο από ένα ακινητοποιημένο ένζυμο σε έναν ηλεκτροχημικό ανιχνευτή. Έτσι παρήγαγαν έναν αισθητήρα που ανταποκρινόταν στο υπόστρωμα του ενζύμου. Από τότε οι βιοαισθητήρες εξελίχθηκαν σημαντικά χάρη στην πρόοδο που πραγματοποιήθηκε στις τεχνολογίες ανίχνευσης και μετασχηματισμού σήματος. Στη σημερινή εποχή διατίθεται ένα ευρύ φάσμα βιολογικών και συνθετικών δεκτών και μεταλλακτών σήματος. Η συνηθέστερη προσέγγιση βασίζεται αρχικά στην επιλογή του προς ανάλυση στόχου (ή την προς ανάλυση ουσία) και στη συνέχεια του μορίου-δέκτη που έχει την απαιτούμενη συγγένεια και εκλεκτικότητα με την προς ανάλυση ουσία.

Οι βιοαισθητήρες είναι αναλυτικές διατάξεις (analytical devices) οι οποίες αξιοποιούν είτε ένα βιολογικό υλικό (βιοσυστατικό) είτε ένα υλικό 'βιομιμητή' (biomimetic) ως μόριο αναγνώρισης το οποίο είτε συνδέεται είτε ενσωματώνεται σε ένα φυσικοχημικό μεταλλάκτη σήματος. Ο συνήθης στόχος είναι η παραγωγή ενός ψηφιακού ηλεκτρονικού σήματος το οποίο είναι ανάλογο της συγκέντρωσης του συγκεκριμένου προς ανάλυση στοιχείου.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο της επιτυχίας ενός βιοαισθητήρα είναι η επιλογή του κατάλληλου υλικού στήριξης για την ακινητοποίηση των βιομορίων. Το βιομόριο πρέπει να συνδεθεί και να σταθεροποιηθεί στο υλικό με τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρήσει της φυσικοχημικές και καταλυτικές του ιδιότητες στο μέγιστο δυνατό βαθμό. Είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν καλύτερη εγγύτητα μεταξύ του βιομορίου και της

επιφάνειας στήριξης / μεταλλάκτη σήματος, η δομική του σταθερότητα καθώς και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης

Αναφορικά μια από τις πολλές στρατηγικές ακινητοποίησης είναι η παγίδευση των βιομορίων Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, ένα λεπτό φιλμ βιομορίου τοποθετείται στην ηλεκτροδιακή επιφάνεια με τη βοήθεια κάποιου πολυμερικού υλικού (οξική κυτταρίνη, κολλαγόνο, Teflon και πολυουρεθάνη) διαπερατού στην προσδιοριζόμενη ουσία.

Για την αναγνώριση των βιομοριων έχουν αναπτυχτεί πολλές τεχνικές στον τομέα αυτό λοιπόν είναι σημαντικό να μπορούμε να παρακολουθήσουμε και να μετρήσουμε την κινητική βιοαντίδραση και το πάχος των τελικών βιομοριακών υμενίων.

### **1.6 Πολυμερη**

**Πολυμερή** ονομάζονται οι [χημικές ενώσεις](#) με μεγάλα μόρια, τα λεγόμενα [μακρομόρια](#), που σχηματίζονται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων, που λέγονται "μονομερή". Τα πολυμερή προκύπτουν από τη [χημική αντίδραση](#) των μονομερών, που ονομάζεται [πολυμερισμός](#).

Όμως, προσοχή, καθώς δεν είναι όλα τα μακρομόρια πολυμερή, επειδή δεν αποτελούνται όλα τους από *όμοια* μόρια π.χ. τα λιπίδια

Τα πολυμερή διακρίνονται εκ της προέλευσής τους σε "φυσικά πολυμερή" και "συνθετικά πολυμερή". Τέτοια φυσικά πολυμερή είναι για παράδειγμα το [DNA](#), το [καουτσούκ](#), το [άμυλο](#), η [κνιφαρίνη](#), οι [πρωτεΐνες](#) κ.λπ., ενώ συνθετικά πολυμερή είναι τα [πλαστικά](#), οι εκρηκτικές ύλες, οι λευκαντικές ουσίες, τα σαπουνία κ.λπ. Επίσης, διακρίνονται σε θερμοπλαστικά, ελαστομερή και θερμοσκληρυνόμενα. Οι σιλικόνες είναι πολυμερή υλικά, τα οποία περιέχουν πυρίτιο, οξυγόνο, υδρογόνο, άνθρακα αλλά και άλλα στοιχεία, καθώς και οργανικές ομάδες.

Σήμερα τα πολυμερη χρησιμοποιούνται ολο και περισσότερο σε εφαρμογες με την μορφή υμενίων(films). Έτσι λοιπόν προκύπτει η αναγκαιότητα να μπορούμε να μετρήσουμε τις διάφορες ιδιότητες των υμενίων(films) αυτών προκειμένου να ανταποκριθούν στις ανάγκες τις εφαρμογής .

### **1.7 Οπτική επικάλυψη(optical coating)**

Με τον όρο οπτική επικάλυψη εννοούμε ένα η περισσότερα λεπτά στρώματα-επίπεδα υλικών που βρίσκονται σε ένα οπτικό στοιχείο όπως είναι για

παράδειγμα φακοί και καθρέπτες και μεταβάλλουν τις διάφορες ιδιότητες του οπτικού στοιχείου όπως την ανάκλαση και την μετάδοση του φωτός. Ένα παράδειγμα οπτικής επικάλυψης είναι η αντανάκλαστική επίστρωση η οποία μειώνει τις ανεπιθύμητες ανάκλασης από διάφορες επιφάνειες και χρησιμοποιείται συχνά σε φωτογραφικούς φακούς και γυαλιά. Άλλο είδος επικάλυψης είναι **high-reflector coating** το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθούν καθρέπτες που ανακλούν περισσότερο από το 99.99% του φωτός που πέφτει πάνω τους.

Η πιο απλή οπτική επικάλυψη (optical coating) γίνεται με λεπτά στρώματα μετάλλων όπως το αλουμίνιο το οποίο τοποθετείται σε γυαλί προκειμένου να φτιαχτούν επιφάνειες καθρεπτών. Το μέταλλο που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ανάκλασης του καθρέπτη. Για παράδειγμα το αλουμίνιο είναι ένα φθινό υλικό και το πιο διαδεδομένο στις οπτικές επιστρώσεις καθώς έχει δείκτη ανάκλασης περίπου 88%-92% στο ορατό φάσμα. Το ασήμι είναι ακόμα ένα μέταλλο που χρησιμοποιείται όμως είναι πολύ πιο ακριβό από το αλουμίνιο αλλά έχει ποσοστό ανάκλασης περίπου 95%-99% αλλά στο υπεριώδες φάσμα μειώνεται και δεν ξεπερνά το 90%.

Ελέγχοντας το πάχος και την πυκνότητα των μεταλλικών επιστρώσεων μπορούμε να μειώσουμε τον βαθμό ανάκλασης και να αυξήσουμε την μετάδοση της επιφάνειας. Άρα λοιπόν είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το πάχος και άλλες παραμέτρους προκειμένου να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση.

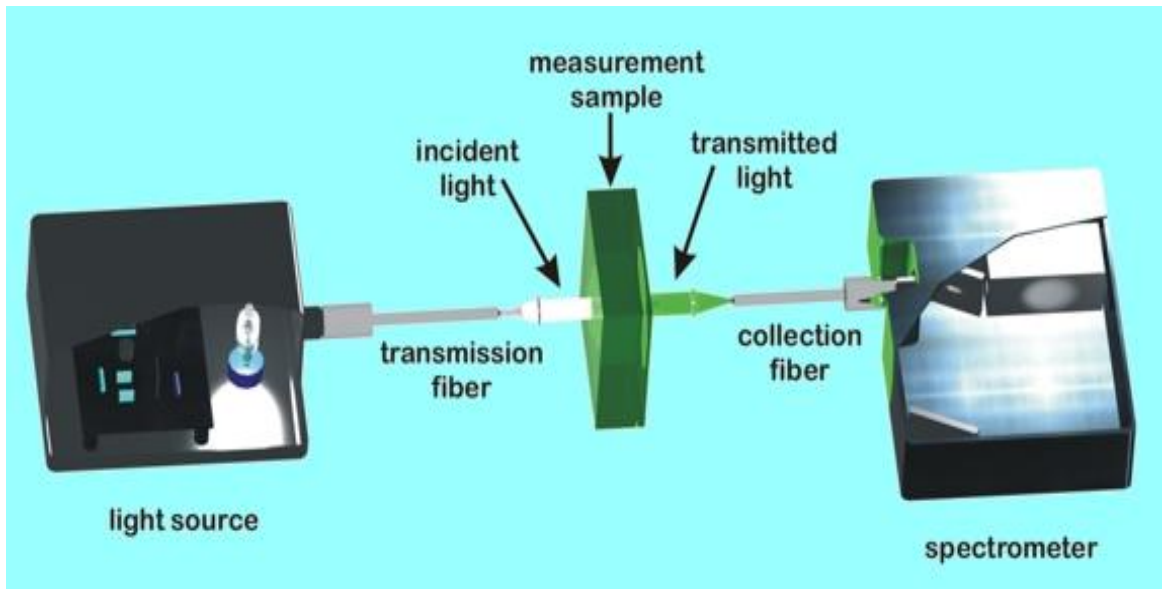
### **1.8 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι προκειμένου να μετρήσουμε τις διαφορές ιδιότητες υλικών. Όμως για τις ιδιότητες που αναφεραμε παραπάνω (**απορρόφηση, διαπερατότητα, φθορισμό, ανακλαστικότητα**) δυνατά η χρήση των οπτικών μετρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με την εξής διαδικασία

1. Το ευζωνικό φως (**broadband light**) που εκπέμπεται από την πηγή οδηγείτε στο δείγμα προς μέτρηση μέσω της οπτικής ίνας μετάδοσης

2. Η αλληλεπίδραση του φωτός που εκπέμπεται στο δείγμα προς μέτρηση προκαλεί μετατροπή στο αρχικό φάσμα

3. Η απόκτηση του καινούργιου φάσματος μέσω του φασματομέτρου
4. Ο υπολογισμός του αποκτούμενου φωτός μέσω των κατάλληλων αλγορίθμων

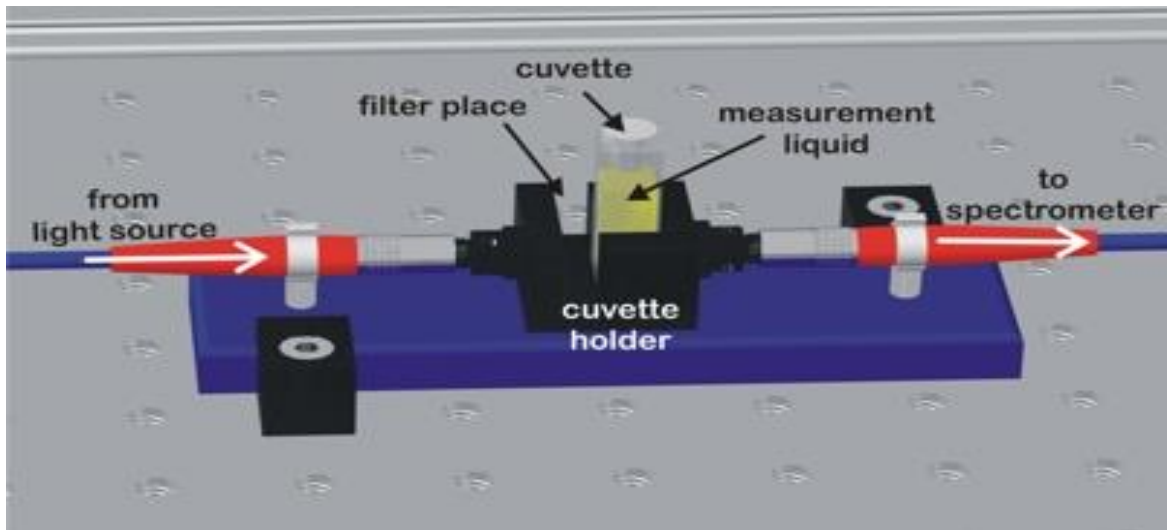


Λόγω της μη γραμμικής έντασης της πηγής φωτός, του «θορύβου» (σκόνη, κακός φωτισμός, δυνατός ήχος) που «πιάνει» το φασματόμετρο, και της φασματικής ανταπόκρισης απαιτείται η χρήση δυο ακόμα φασμάτων προκειμένου να έχουμε καλύτερη ακρίβεια στην μέτρηση μας και να εκμηδενίσουμε όσο μπορούμε τους εξωτερικούς παράγοντες. Τα φάσματα είναι το **φάσμα αναφοράς(reference spectrum)** και το **σκοτεινό φάσμα(dark spectra)**. Σε επόμενη ενότητα θα αναλύσουμε και θεωρητικά και πρακτικά το κάθε ένα ξεχωριστά.

### 1.9 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ

Το φάσμα απορροφητικότητας/μετάδοσης (absorbance/transmittance) δείχνει το απορροφούμενο/μεταδιδόμενο φως διάμεσο του δείγματος προς μέτρηση.

Το δείγμα μπορεί να είναι είτε στερεό είτε υγρό. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ένα υγρό δείγμα προς μέτρηση με ένος FR-Tool συστήματος.



Ενδεικτικά η μέτρηση της **απορροφητικότητας** προκύπτει από τους τύπους

- $A(\lambda) = -\log_{10}(I_s/I_o)$ 
  1. Όπου  $I_o$  είναι το φως εκπομπής
  2. Όπου  $I_s$  είναι η ένταση του φωτός που διαπερνάει το δείγμα

Για να έχουμε ακριβείς μετρήσεις το σκοτεινό φάσμα (dark spectrum) πρέπει να αφαιρεθεί τόσο από το δείγμα όσο και από το φάσμα αναφοράς (reference spectrum) έτσι λοιπόν η παραπάνω εξίσωση γίνεται

- $A(\lambda) = -\log_{10}((I_{sam} - I_{dark}) / (I_{ref} - I_{dark}))$ 
  1. Όπου  $I_{ref}$  είναι η ένταση αναφοράς του φωτός. Για παράδειγμα η ένταση του φωτός της πηγής χρησιμοποιείται όπως έχει μετρηθεί από το φασματόμετρο χωρίς να έχει περάσει μέσα από το δείγμα που μας ενδιαφέρει (ένα άδειο δοχείο για υγρά δείγματα).
  2. Όπου  $I_{sam}$  είναι η ένταση του φωτός αφού έχει περάσει μέσα από το δείγμα. Για παράδειγμα η ένταση του φωτός που έχει

μετρηθεί από το φασματόμετρο όταν το φως από την πηγή περνά μέσα από το δείγμα προς μέτρηση

3. Όπου  $I_{\text{dark}}$  είναι η «σκοτεινή» ένταση (dark intensity). Πιο συγκεκριμένα είναι η ένταση του φωτός που μετρήθηκε από το φασματόμετρο με το φως πηγής σβηστό .

Συνήθως ο δείκτης απορροφητικότητας είναι μεταξύ [0,2]

Από την άλλη ο ορισμός της **μετάδοσης** δίνεται από τον τύπο  $T(\lambda)=I_s/I_o$   
\*100%

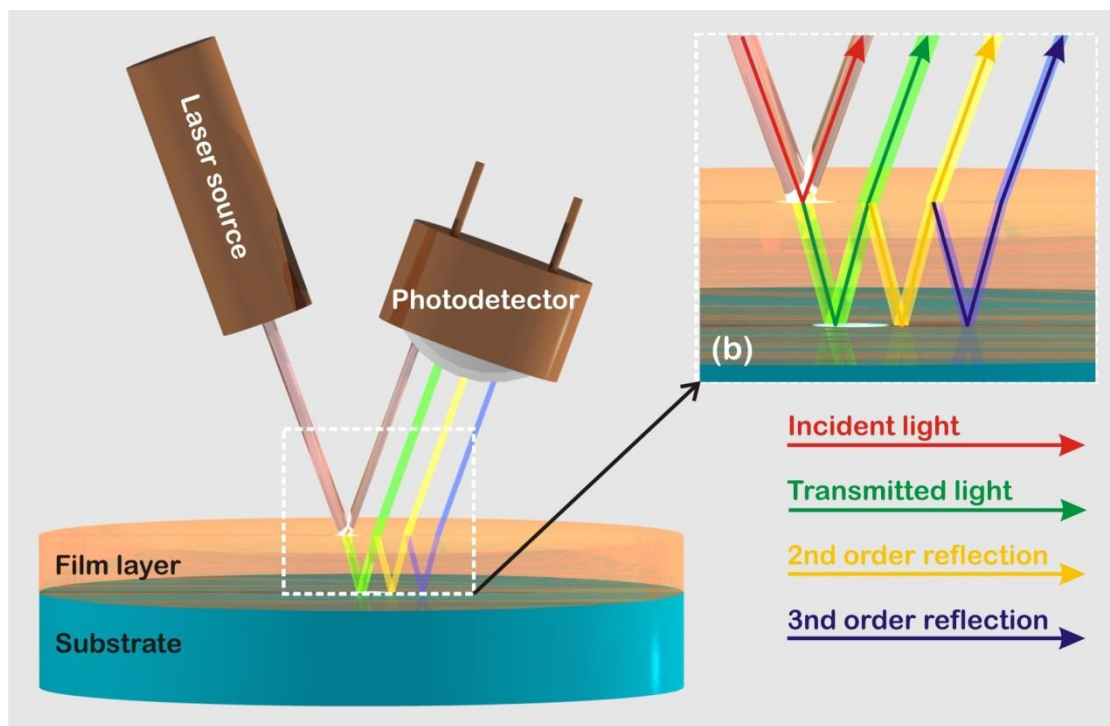
## ΕΝΟΤΗΤΑ 2

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΥ ΘΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΟΥΜΕ ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

#### 2.1 Single Wavelength Interferometry(SWI)

Το **SWI**(Single Wavelength Interferometry) είναι μια χαμηλή κόστους οπτικής μεθοδολογίας κατάλληλη για την παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα η μείωση πάχους, διόγκωση υμένα που συμβαίνει κατά την επεξεργασία ημι-διάφανων και διάφανων υμένων.

Στην εικόνα παρουσιάζεται μια **SWI** διάταξη.



- a) Η οπτική διάταξη εμπεριέχει ένα στερεάς κατάστασης λέιζερ (solid-state laser) και έναν φωτοανιχνευτή τοποθετημένο σχεδόν κάθετα στο δείγμα υπό μέτρηση. Το δείγμα αποτελείται από ένα ανακλαστικό υπόστρωμα (π.χ Si wafer) και ένα διαφανές ή ημι-διαφανές υμένα.
- b) Περιγραφή των διαφορών ακτινών ανάκλασης από το λέιζερ λόγω της ανάκλασης μεταξύ του υμένα και του υποστρώματος του.

Πιο ειδικά η **SWI** διάταξη αποτελείται όπως περιγράψαμε παραπάνω από:

1. ένα λέιζερ,
2. ένα φωτοανιχνευτή,
3. τροφοδοτικά
4. ηλεκτρονικά διατήρησης σήματος
5. κάρτα απόκτησης πληροφοριών
6. έναν Η/Υ για την επεξεργασία των δεδομένων και τον έλεγχο της διάταξης.

Το τυπικό μήκος κύματος μια εκπομπής ενός λέιζερ που χρησιμοποιείται στην μεθοδολογία **SWI** (Single Wavelength Interferometry) βρίσκεται στο κόκκινο μέρος του φάσματος. Ωστόσο άλλα μήκη κύματος βρίσκονται στο πράσινο και στο μπλε κομμάτι του φάσματος. Το δείγμα τοποθετείται σε μια επιφάνεια και η ακτίνα φωτός από το λέιζερ προσπίπτει στο δείγμα υπό γωνία 90 μοιρών. Στην περίπτωση που το δείγμα περιέχει ένα λεπτό διάφανο υμένα (π.χ πολυμερή) πάνω σε ένα ανακλαστικό υπόστρωμα όπως το πυρίτιο (Si) τότε η ολική ενέργεια που προσπίπτει στον φωτοανιχνευτή είναι περίπου το άθροισμα της ενέργειας των δυο ακτινών. Δηλαδή η μια ακτίνα προέρχεται από το την επιφάνεια του υμένα και η δεύτερη ακτίνα από το υπόστρωμα του υμένα. Η ολική ενέργεια **E** που φτάνει στον φωτοανιχνευτή μπορεί να υπολογιστεί και από τον τύπο.

$$E = r_{01}^2 + r_{12}^2 + 2 \cdot r_{01} \cdot r_{12} \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot d_1}{\lambda}\right)$$

Όπου

$$r_{01} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad r_{01} = \frac{n_o - n_1}{n_o + n_1}$$

Είναι οι δείκτης διάθλασης μεταξύ των στρωμάτων ο δείκτης «0» θεωρείται ως περιβάλλον ο δείκτης «1» είναι του υμένα και ο δείκτης «2» είναι του υποστρώματος.  $n_1$  ο δείκτης διάθλασης και  $d_1$  το πάχος του υμένα,  $n_2$  ο δείκτης διάθλασης του υποστρώματος και  $\lambda$  το αντίστοιχο μήκος κύματος του λέιζερ που χρησιμοποιείται στην μέτρηση. Όλα αυτά λύνονται και βρίσκονται μέσω αλγορίθμων που χρησιμοποιεί το σύστημα και έτσι μπορούμε να πάρουμε γρήγορα και με ακρίβεια τις μετρήσεις μας.

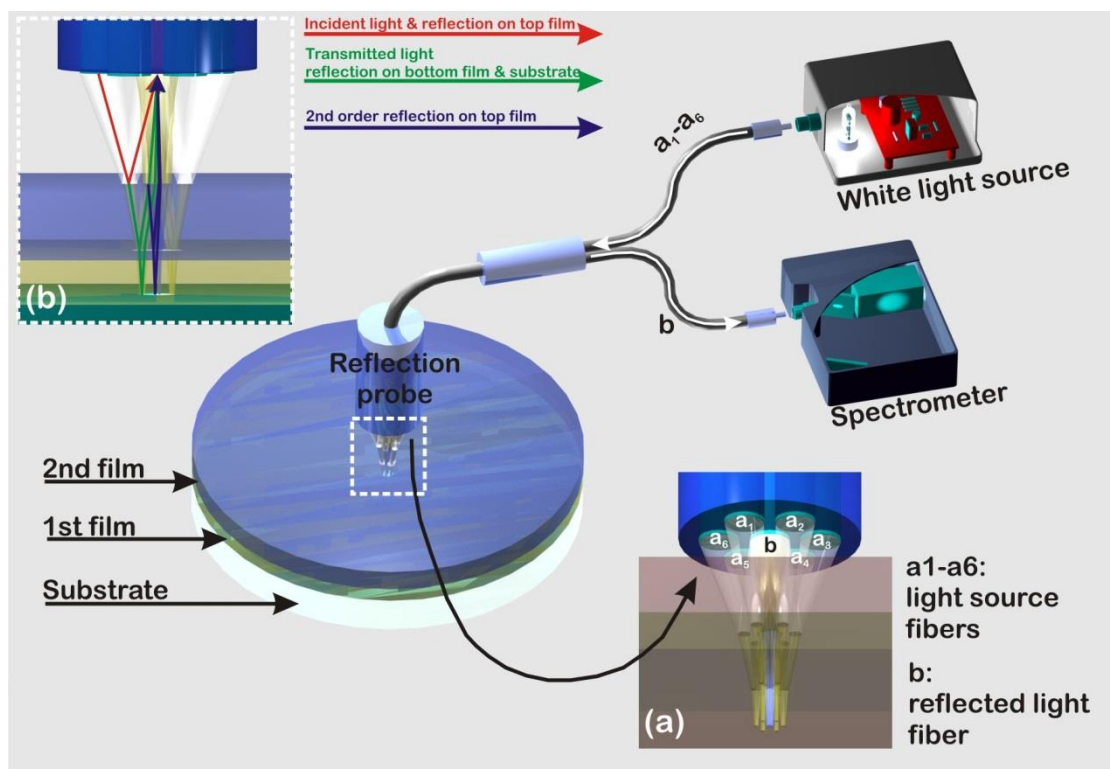
Στην κύρια εξίσωση το σήμα που φτάνει στον φωτοανιχνευτή εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης, το πάχος του υμένα και το μήκος κύματος που εξετάζουμε. Οποιαδήποτε αλλαγή στις ιδιότητες του υμένα προκαλεί αλλαγές στην πληροφορία που συλλέγεται από τον φωτοανιχνευτή, η οποία καταγράφεται στον Η/Υ. Παραδείγματος χάρη έστω ότι έχουμε έναν υμένα με δείκτη διάθλασης 1.5 και εξεταζόμενο μήκος κύματος 635nm η αλλαγή στο πάχος του υμένα για μια ολόκληρη περίοδο του φωτοανιχνευτή είναι περίπου 211nm ωστόσο αν το μήκος κύματος είναι 532nm (πράσινο μέρος του φάσματος) το ισοδύναμο πάχος μειώνεται στα 177nm προσφέροντας μια πιο «ευαίσθητη» ανίχνευση αλλαγών των μικρών πυκνοτήτων / δεικτών διάθλασης.

## **2.2 White Light Reflectance Spectroscopy(WLRS)**

Η φασματοσκόπια ανάκλασης λευκού φωτός (White Light Reflectance Spectroscopy-WLRS) είναι μια μεθοδολογία που θυμίζει αρκετά την SWI που αναλύσαμε προηγουμένως, όμως αντί για λέιζερ (μόνο μήκος κύματος) χρησιμοποιείται μια ευριζωνική πηγή φωτός (UV, VIS, NIR) και ένα φασματόμετρο το οποίο λειτουργεί στο αντίστοιχο εύρος φάσματος αντί για



φωτοανιχνευτή. Το λευκό φως που εκπέμπεται από την πηγή περνά μέσω των ινών (a1-a6) όπως φενεται στην παρακατω φωτογραφια το οποιο προσπίπτει κάθετα πανω στο δειγμα προς μετρηση. Ένα τυπικο δειγμα περιέχει διαφορες στoίβες διάφανων η ημιδιάφανων υμένων πάνω σε ένα αντανακλαστικό υπόστρωμα (πυριτιο, γυαλι). Την ίδια ωρα ένας δεκτης (Reflection Probe) συλλεγει το αντανακλώμενο φως και το κατευθυνει διαμεσου της ινας «b» στο φασματομετρο. Η ακτινα από την πηγη φωτος αλληλεπιδρά με το δειγμα και παραγει ένα σημα ανάκλασης το οποιο συνεχώς καταγράφεται από το φασματόμετρο.



Ο συντελεστής ανάκλασης ενός δείγματος με  $k$ -επίπεδα μπορεί να υπολογιστεί με διάφορα μοντέλα όμως η προσέγγιση Abeles είναι η πιο κατάλληλη.

Για στρώμα-επίπεδο  $k-1$  έχουμε τον παρακάτω τύπο

$$\rho_{k-1} e^{i\Delta_{k-1}} = \frac{r_{k-1} + \rho_k e^{i\Delta_k - 2i\delta_{k-1}}}{1 + r_{k-1} \rho_k e^{i\Delta_k - 2i\delta_k}}$$

Όπου  $\rho$  είναι το εύρος και  $\Delta$  είναι η φάση. Από τα παραπάνω μπορεί να βρεθεί ο δείκτης ανακλασης για κάθε  $k$ -th στρωμα-επιπεδο. Συγκεκριμένα όμως στην περίπτωση που έχουμε δυο διαφανη στρωματα μεταξύ ενός υποστρώματος τότε η ολική ενέργεια μπορεί να γραφτεί:

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

$$A = r_{01}^2 + r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{01}r_{12}^2r_{23} + r_{01}^2r_{12}^2r_{23}^2 + 2r_{01}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(n_1d_1 + n_2d_2)\right) + 2r_{12}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_1d_1\right) +$$

$$2r_{01}r_{12}r_{23}^2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_2d_2\right) + 2r_{01}r_{12} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_1d_1\right) + 2r_{01}^2r_{12}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_1d_1\right)$$

$$B = 1 + r_{01}^2r_{12}^2 + r_{01}^2r_{23}^2 + r_{12}^2r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_2d_2\right) + 2r_{01}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(n_1d_1 + n_2d_2)\right) +$$

$$2r_{01}^2r_{12}r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_2d_2\right) + 2r_{01}r_{12} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_1d_1\right) + 2r_{01}r_{12}r_{23}^2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}n_1d_1\right) + 2r_{01}r_{12}^2r_{23} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}(n_1d_1 - n_2d_2)\right)$$

Όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του  $i$ -th στρώματος ( $i=0$  για τον αέρα,  $i=1$  για τον πρώτο υμένα,  $i=2$  για τον δεύτερο υμένα,  $i=3$  για το υπόστρωμα ) και  $d_1$  του  $i$ -th στρώματος και  $\lambda$  το μήκος κύματος.

## ΕΝΟΤΗΤΑ 3

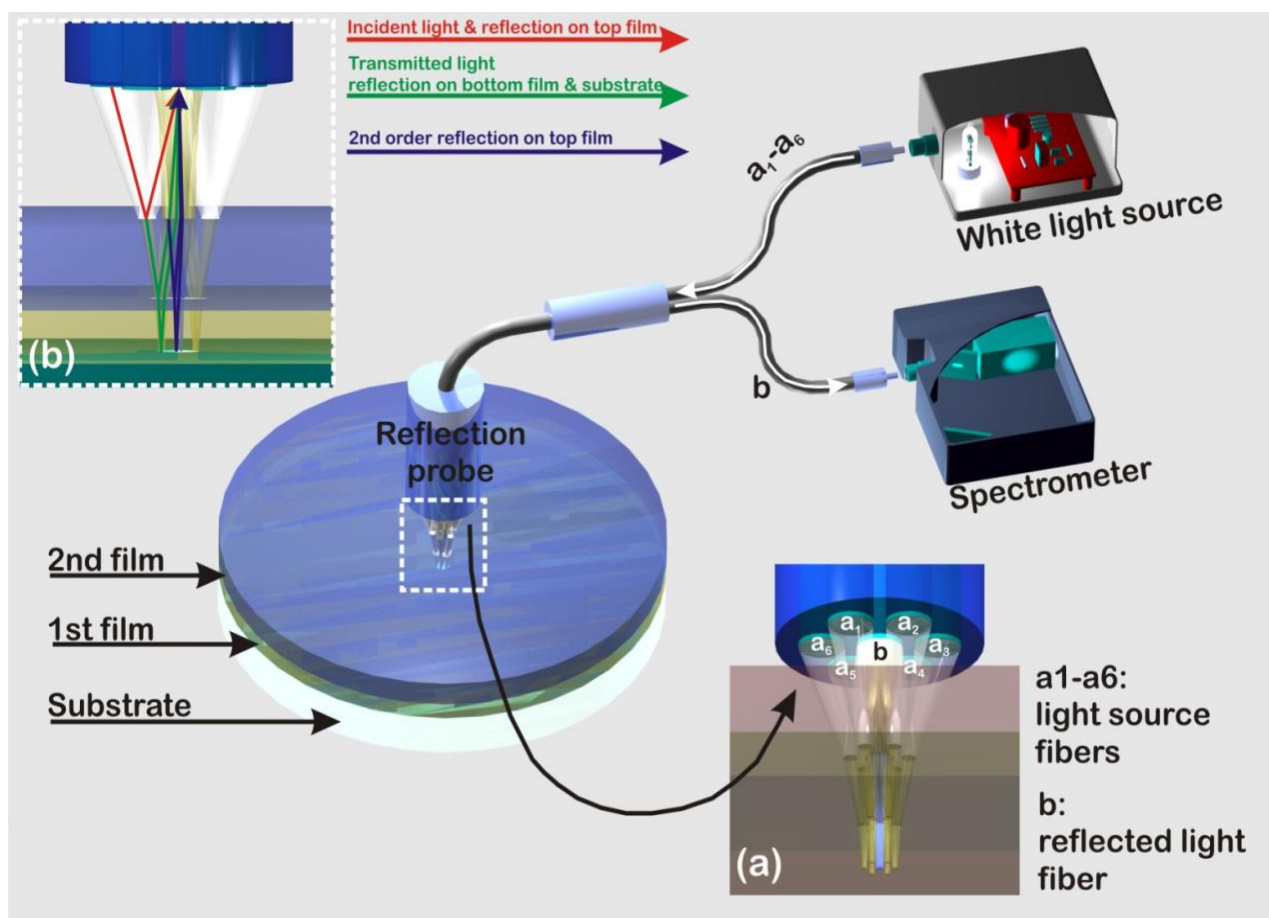
### 3.1 FR-BASIC

Το σύστημα FR-Basic είναι οπτικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την μέτρηση και τον χαρακτηρισμό υμενίων(films)/επένδυσης(coatings)και βασίζεται στην φασματοσκόπια λευκού φωτός προκειμένου να πραγματοποιήσει ακριβείς μετρήσεις.

Τα υμενία (films) μπορούν να είναι διαφανή, ημιδιαφανή για παράδειγμα: πολυμερή, ημιαγωγοί, υγροί κρυσταλλοί κ.α

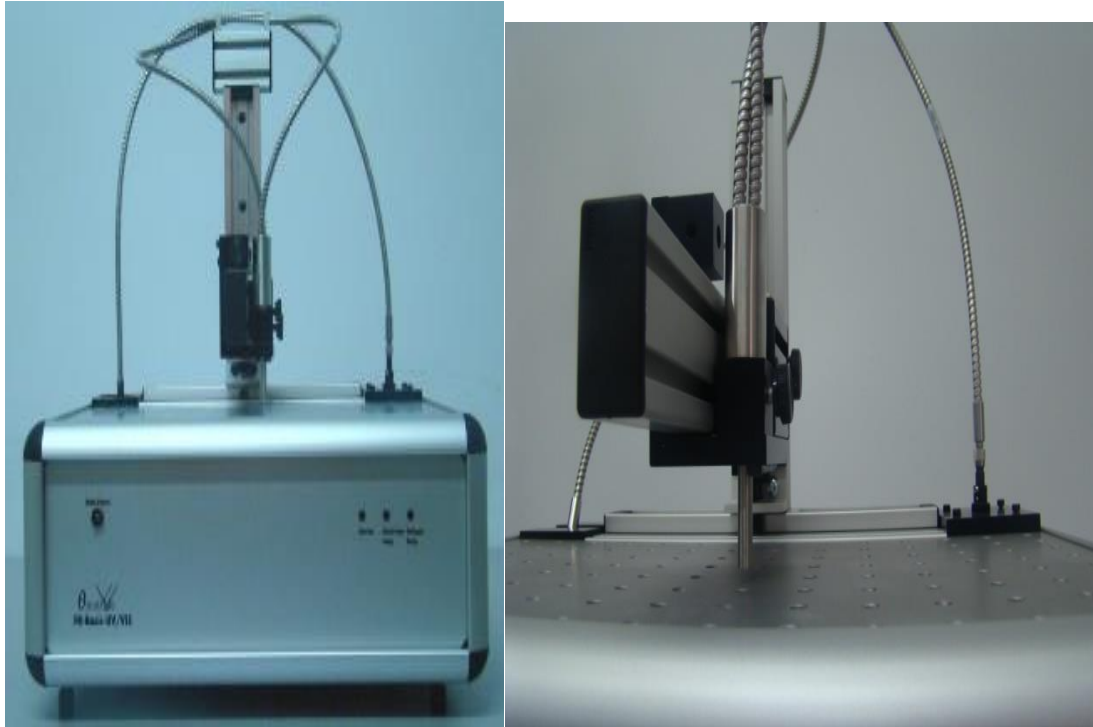
Η επένδυση μπορεί να είναι υμενίο(film) ενός επιπέδου ή πολλαπλών επιπέδων.

Το όργανο αποτελείται από μια πηγή φωτός που εκπέμπει στο ορατό φάσμα και στο υπέρυθρο, ένα φασματοφωτομετρο που κάνει την ανάλυση του φωτός που λαμβάνεται, καθώς και από ένα σύστημα οπτικών ινών που μεταφέρουν το φως προς το δείγμα. Παρακάτω έχουμε μια πιο αναλυτική εικόνα για τα μέρη του συστήματος μας.



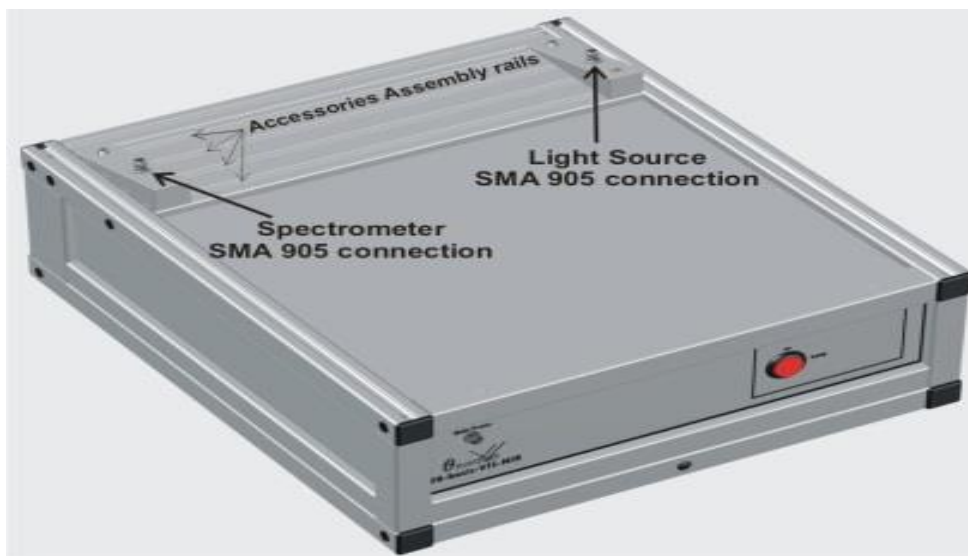


### 3.2 ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕΡΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ FR-BASIC

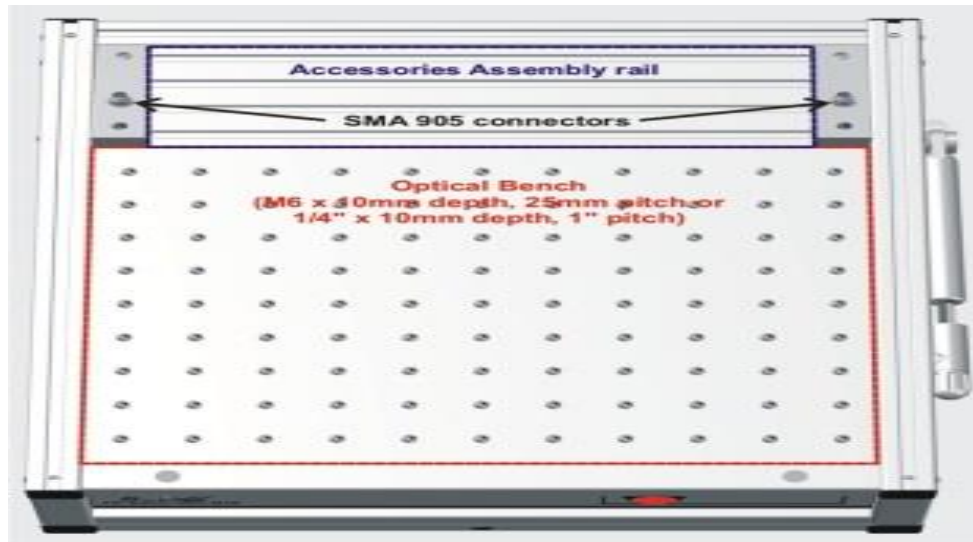


Παρουσιάζουμε παρακάτω μερικά από τα βασικά μέρη του συστήματος κάνοντας μια σύντομη περιγραφή για το καθένα. Έτσι λοιπόν έχουμε τα παρακάτω:

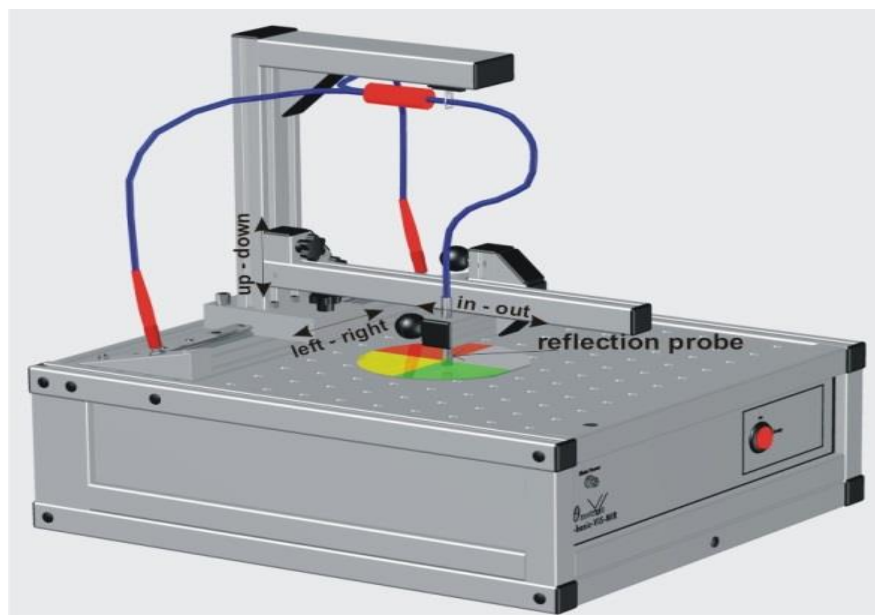
1. Την βάση του πάνω στην οποία συνδεουμε τα εξαρτήματα του συστήματος



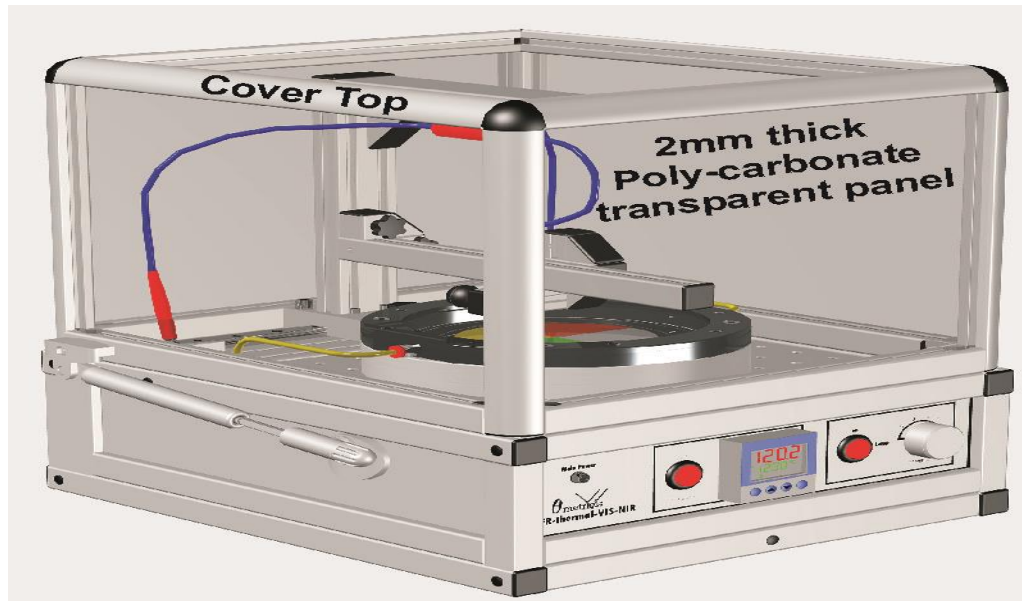
2. Πάνω στην βάση υπάρχει ένα διάτρητο αλουμινένιο τμήμα πάνω στο οποίο μπορούμε να συνδέσουμε διάφορα στοιχεία όπως αισθητήρες, φίλτρα κ.α



3. Την λάμπα εκπομπής διάμεσου της οποίας γίνεται η μέτρηση της αντανάκλασης και η μέτρηση του πάχους των δειγμάτων.



4. Το καλυμα που ασφαλιζει το συστημα από εξωτερικους παραγοντες όπως για παραδειγμα σκονη



### **3.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Το FR-Basic υπάρχει σε διαφορετικές εκδόσεις κάθε μια από αυτές έχει και διαφορετικές δυνατότητες μέτρησης μερικές από τις εκδόσεις είναι **FR-Basic UV/VIS ή VIS/NIR** ανάλογα με το φασματόμετρο που χρησιμοποιείται από το κάθε σύστημα έχουμε και διαφορετικό τύπο .Πιο αναλυτικά στην περίπτωση παρουσίας υψηλής ανάλυσης φασματόμετρου έχουμε το **FR-Basic UV/NIR-HR** στην περίπτωση ενός επιστημονικού(scientific grade) φασματόμετρου έχουμε το **FR-Basic UV/NIR-SG** τέλος όταν υπάρχει παρουσία δυο φασματόμετρων για συνδυαστικές μετρήσεις στο φάσμα VIS/NIR έχουμε **FR-Basic D VIS/NIR** . Οι διαφορές στα φασματόμετρα στην κάθε περίπτωση επηρεάζουν το αποτέλεσμα της μέτρησης καθώς υπάρχουν διαφορές στο εύρος μέτρησης για το κάθε ένα ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε στον παρακάτω πίνακα αυτές τις διαφορές.

<b>Τύπος</b>	<b>Εύρος Φάσματος</b>	<b>Εύρος μέτρησης Πάχους</b>
<b>FR-Basic UV/VIS</b>	<b>200-850nm</b>	<b>5nm - 100μm</b>
<b>FR-Basic VIS/NIR</b>	<b>350 - 1000nm</b>	<b>20nm - 100μm</b>
<b>FR-Basic UV/NIR-HR</b>	<b>200 - 1100nm</b>	<b>1nm - 100μm</b>
<b>FR-Basic UV/NIR-SG</b>	<b>200 - 950nm</b>	<b>5nm - 100μm</b>
<b>FR-Basic VIS/NIR-SG</b>	<b>350 - 1000nm</b>	<b>20nm - 90μm</b>
<b>FR-Basic NIR</b>	<b>900 - 1700nm</b>	<b>200nm - 150μm</b>
<b>FR-Basic D VIS/NIR</b>	<b>350 - 1700nm</b>	<b>20nm - 200μm</b>
<b>FR-Basic D UV/NIR</b>	<b>200 - 1700nm</b>	<b>5nm - 200μm</b>

\*\*\*\*\***ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Η μέτρηση πάχους εξαρτάται από το φάσμα και αφορά ένα επίπεδο υμένα με δείκτη διάθλασης περίπου 1.5 πάνω σε ένα αντανakλαστικό υπόστρωμα.



## ΕΝΟΤΗΤΑ 4

### 4.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Προκειμένου να εγκαταστήσουμε το σύστημα FR-Basic για να έχουμε ακριβείς μετρήσεις θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τις παρακάτω παραμέτρους

**A)** να χρησιμοποιήσουμε το σωστό Σκοτεινό φάσμα(Dark spectrum) και το σωστό φάσμα αναφοράς (reference spectrum)

**B)** Η εκπομπή φωτός από την πηγή να έχει σταθεροποιηθεί

#### **4.1.1 Το σκοτεινο φασμα (dark spectrum)**

Το σκοτεινό φάσμα (Dark spectrum) είναι η μέτρηση που παίρνει το φασματοφωτομετρο όταν δεν λαμβάνει καθόλου φως από την λαμπα του οργανου.Αυτη η μέτρηση κανονικα θα ηταν 0 αλλα εξαιτιας του θορύβου του φασματοφωτομετρου και του ατμοσφαιρικού φωτισμού αυτό είναι μεγαλύτερο του 0(>0).Οι τιμές οι οποίες παίρνει συνήθως είναι γυρο στα 1500 a.u.Συνεπώς παίρνοντας τη μέτρηση του σκοτεινού φασματος (dark spectrum) αφαιρούμε την επίδραση του θορύβου και του ατμοσφαιρικού φωτισμού.

#### **4.1.2 Φασμα αναφοράς (reference spectrum)**

Φάσμα αναφοράς (reference spectrum) είναι η μέτρηση που λαμβάνει το φασματοφωτομετρο όταν το φως αντανακλάται σε μια λεια και ομοιόμορφη επιφάνεια π.χ στο Si. Χρησιμοποιώντας την μέτρηση αυτή μπορούμε να αφαιρέσουμε την επίδραση των οπτικών ινων ,τις απώλειες του φωτός κατά την διάδοση του στον αέρα, τις μη γραμμικότητες των πηγών φωτός .



Όπως καταλαβαίνουμε από τα παραπάνω φάσματα παίζουν σημαντικό ρολό στην λήψη μετρήσεων καθώς είναι συνάρτηση των συνθηκων που παίρνουμε τις μετρησεις.Σε περίπτωση που αλλαξει κατι από τα

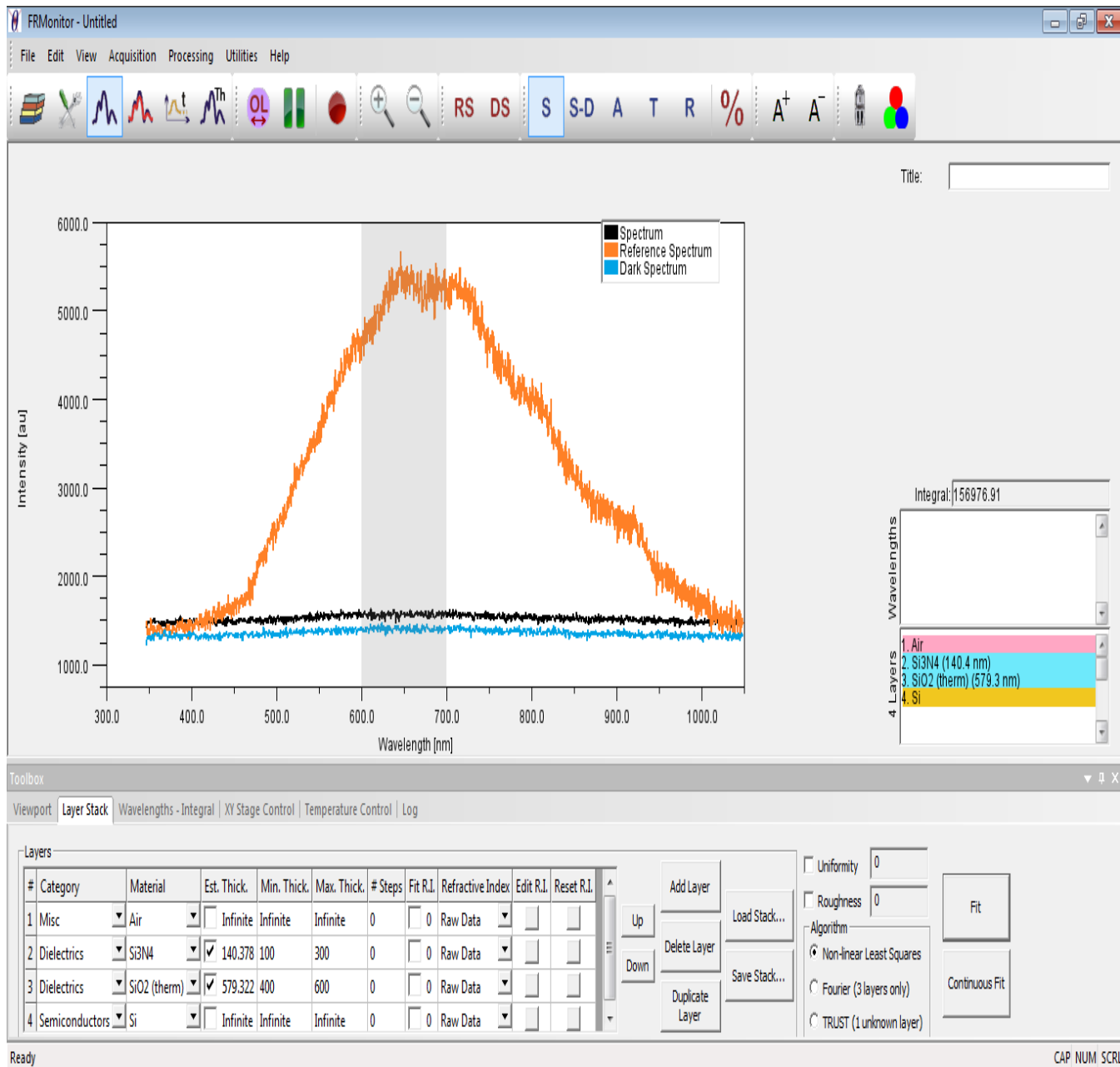
δου πρέπει να ξαναπάρουμε τις μετρήσεις μας διότι το αποτέλεσμα της τελικής μέτρησης θα είναι ανακριβές.

Ωστόσο δεν θα μπορούσαμε να αμελήσουμε εξωτερικούς παράγοντες όπως έντονο εξωτερικό φως, σκονη ,θορυβος. Λαμβανοντας τις μετρήσεις μας λογο των προαναφερόμενων παρατηρήθηκαν καποιες αποκλίσεις με τα πραγματικα αποτελεσματα που θεωρικα θα ειχαμε.Ετσι λοιπον αξιζε να τα αναφερουμε καθως επιρεασαν τις μετρησεις μας.

#### **4.2 ΠΡΟΕΤΙΜΑΖΟΝΤΑΣ ΤΟ FR-BASIC TOOL ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΧΟΥΣ**

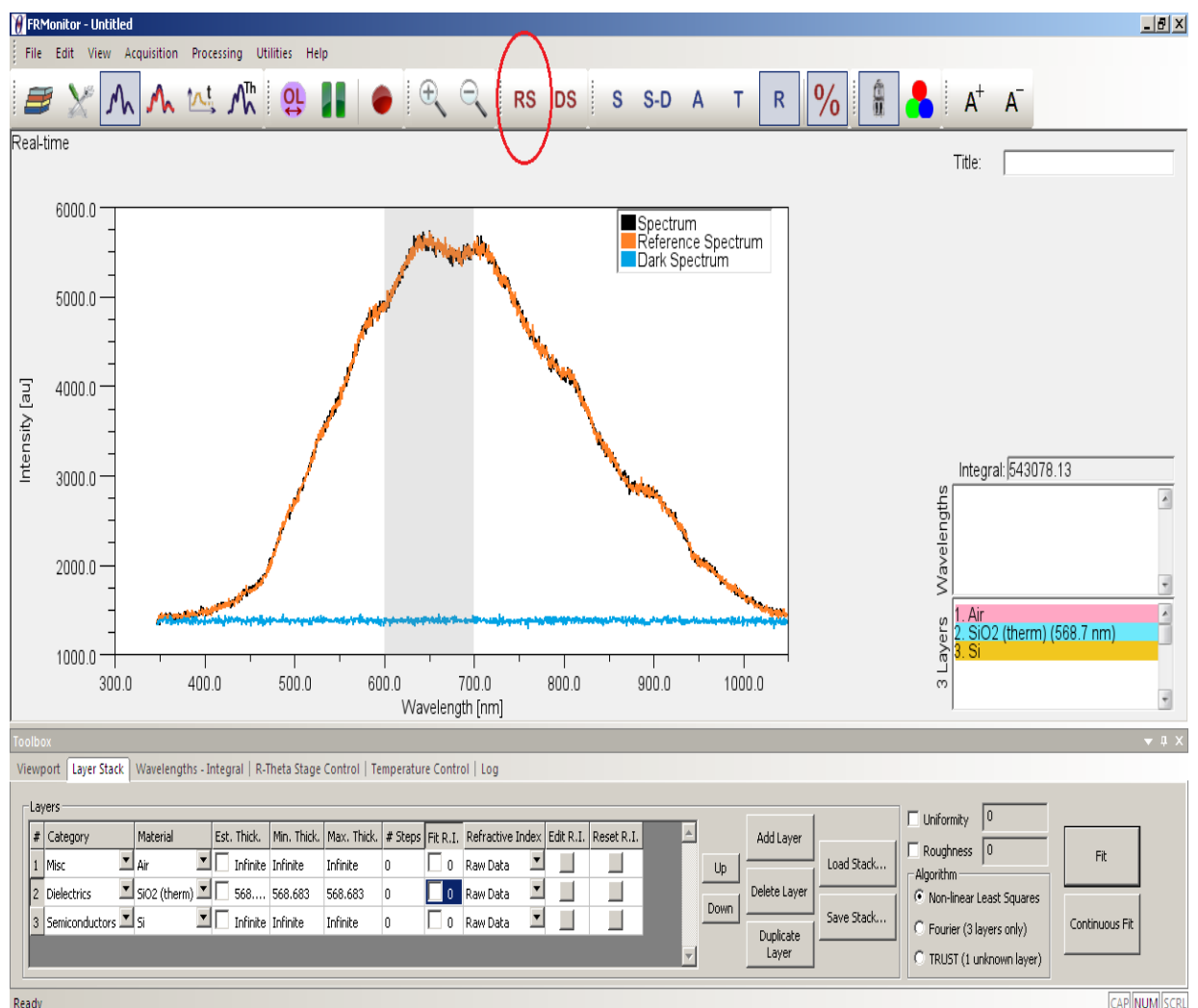
Ακλουθούμε τα παρακάτω βήματα για να την λήψη των μετρήσεων μας

1. Συνδεουμε το **FR-TOOL** σε μια ελευθερη θυρα USB του υπολογιστη μας
2. Εκκινούμε το πρόγραμμα **FR-MONITOR** πατωντας δυο φορες δεξι κλικ στο εικονοδιο 
3. Ανάβουμε την πηγή φωτός του **FR-BASIC** πατωντας πανω στο κουμπι . Το φως πρέπει να παραμείνει ανοιχτό περίπου 10 λεπτά πριν πάρουμε την μέτρηση.
4. Η πρώτη εικονα που θα δούμε ανοίγοντας το πρόγραμμα είναι η παρακάτω.





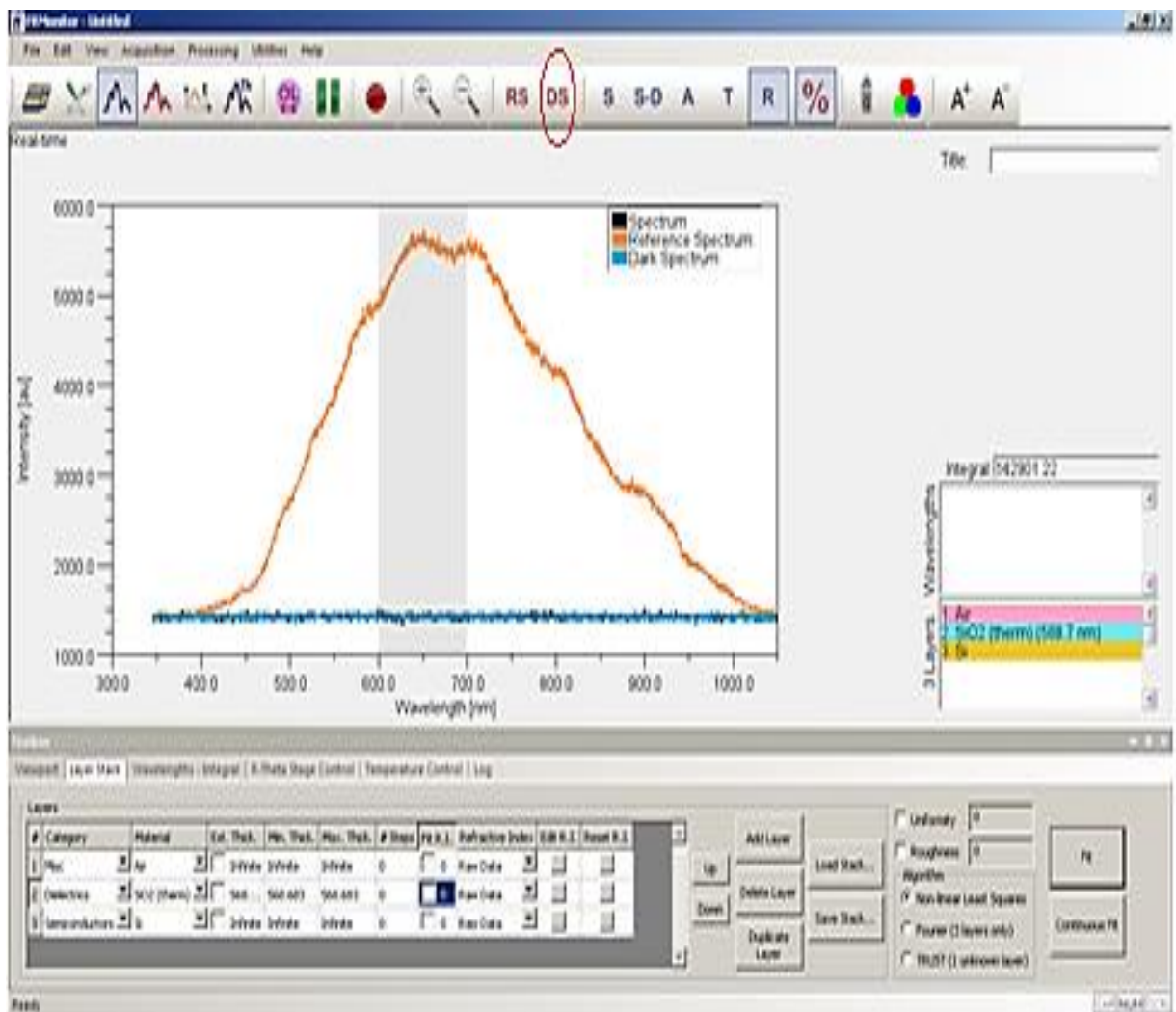
Παρατηρούμε η **πορτοκαλί** καμπύλη είναι το τρέχων φάσμα αναφοράς (reference spectrum) η **γαλάζια** ευθεια είναι το σκοτεινο φασμα(dark spectrum) και τέλος η **μαυρη** ευθεια είναι το τρέχων φασμα

5. **Μετράμε το φάσμα αναφοράς:** Τοποθετούμε το δείγμα που θα χρησιμοποιήσουμε σαν σημείο αναφοράς στην περίπτωση μας είναι το δείγμα **Si**. Τοποθετούμε λοιπόν το δείγμα κάτω από την λαμπα και πατάμε το πληκτρο **RS**. Το δείγμα αναφοράς είναι αναγκαίο να είναι ένα δείγμα από υλικό ικανό να είναι αρκετά ανακλαστικό προκειμένου να αντανακλά τις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν έτσι ώστε μετέπειτα να αφαιρέσουμε την επίδραση συχνοτήτων λόγω των τυχαίων αλλαγών του οπτικού μέσου. Το φάσμα αναφοράς μπορεί να διορθωθεί με το Calibration File σιλικονης, αλουμινίου που παρέχει το **FR-TOOL**. Τέλος αποθηκεύουμε ως προεπιλογή το φάσμα. Παρακάτω βλέπουμε το φάσμα αναφοράς



## 6. Μετράμε το σκοτεινό φάσμα : Σβήνουμε την πηγή φωτός πατώντας

το κουμπι  και υστερα πατώντας το πληκτρο . Προκειμένου να παρουμε σωστα την μετρηση του σκοτεινου φασματος πρεπει να τοποθετησουμε καποια επιφάνεια η οποια θα εχει μεγάλη απορροφητικότητα προκειμένου να απορροφάτε ολόκληρο το φάσμα του φωτος που εκπεμπεται από το μεσο. Τελος το αποθηκευουμε ως προεπιλογεγμενο φάσμα . Παρακατω βλεπουμε το Dark spectrum



## ΕΝΟΤΗΤΑ 5

### ΞΕΚΙΝΩΝΤΑΣ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΣ

#### 5.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΙΟΥ ΕΝΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

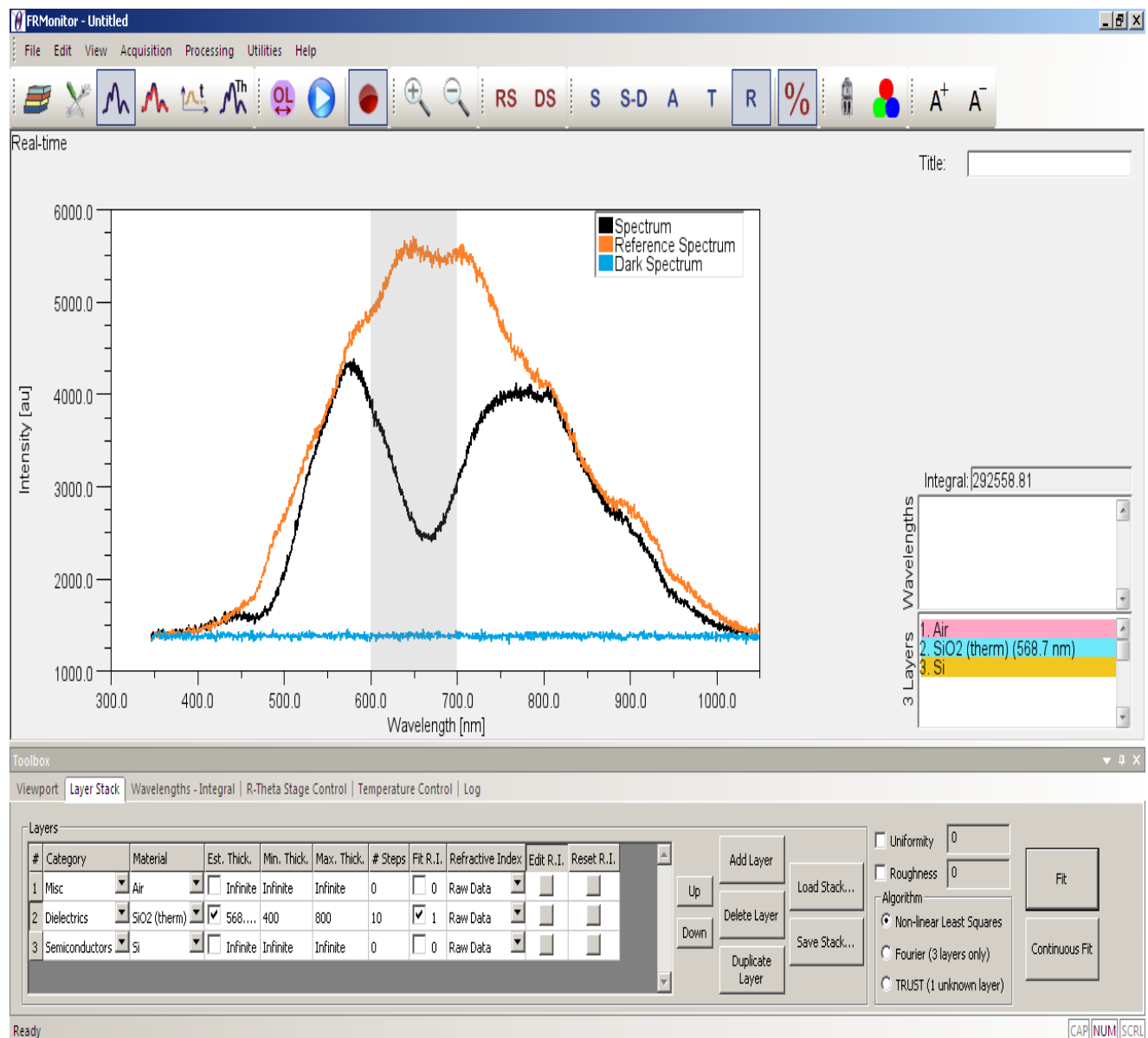
##### 5.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

2. SiO<sub>2</sub> (therm)  
3. Si

Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) είναι ένωση του πυριτίου με οξυγόνο (οξείδιο) πολύ διαδεδομένη στη φύση σε κρυσταλλική ή άμορφη κατάσταση. Η κοινή θαλάσσια άμμος αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου. Η κρυσταλλική μορφή αναφέρεται σαν "χαλαζιάς", ενώ η άμορφη σαν άμμος. Υπάρχει και η παρασκευασμένη τεχνητά μορφή "πηκτή πυριτίου" (silica gel): πρόκειται για διοξείδιο πυριτίου σε μικροσπογγώδη μορφή, το οποίο λόγω της δομής του, έχει την ιδιότητα να απορροφά - προσροφά διάφορες ουσίες. Το **πυρίτιο** είναι το όγδοο (8<sup>ο</sup>) κατά μάζα σε αφθονία χημικό στοιχείο στο σύμπαν, αλλά σπανίως βρίσκεται σε χημικά καθαρή στοιχειακή μορφή στη φύση. Η πιο συνηθισμένη μορφή του, τόσο στη διαστρική σκόνη, όσο και σε αστεροειδείς, δορυφόρους και πλανήτες είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) και διάφορες άλλες πυριτικές ενώσεις<sup>[1]</sup>. Πάνω από το 90% του φλοιού της Γης αποτελείται από πυριτιούχα ορυκτά, γεγονός που το καθιστά το δεύτερο (2<sup>ο</sup>) κατά μάζα σε αφθονία χημικό στοιχείο στον πλανήτη μας (περίπου 28%, πάντα κατά μάζα), μετά από το οξυγόνο (O)<sup>[2]</sup>. Το **πυρίτιο** και οι ενώσεις του έχουν πολλές βιομηχανικές χρήσεις. Το περισσότερο πυρίτιο χρησιμοποιείται εμπορικά χωρίς να διαχωριστεί και συχνά με λίγη επεξεργασία των ενώσεών του που λαμβάνονται από τη φύση. Το **πυρίτιο** είναι κύριο συστατικό των περισσότερων ημιαγωγικών συστημάτων. Οι ημιαγωγικές ιδιότητες των ημιαγωγών πυριτίου παραμένουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με των αντίστοιχων του γερμανίου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε ένα δείγμα που απαρτίζεται από SiO<sub>2</sub>/Si. Το Si είναι καλός ανακλαστής (ανακλά ~30%) ενώ το SiO<sub>2</sub> είναι μερικώς διάφανο, πράγμα το οποίο επιτρέπει την ακριβή μέτρηση με τη μέθοδό μας.

## 5.1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ

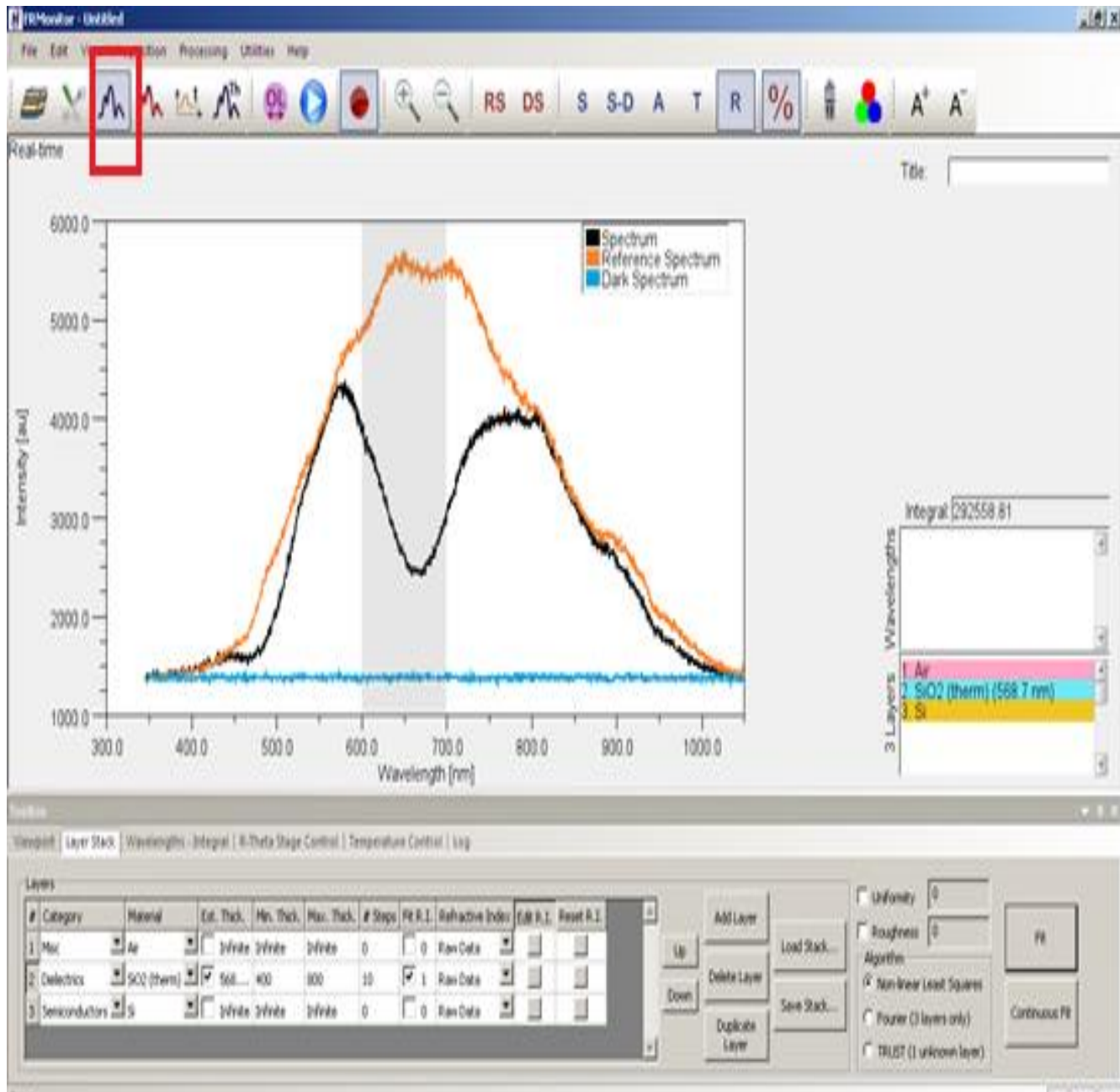
Αφου εισάγουμε το δείγμα μας κατω από την λάμπα του οργάνου παίρνουμε την παρακάτω εικόνα στο πρόγραμμα



Σε αυτό το σημείο πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί έτσι ώστε να σιγουρευτούμε ότι έχουμε επιλέξει τα σωστά layers προκειμένου να ολοκληρώσουμε την μετρησή μας.

### 5.1.3 FITTING ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ

Πηγαίνουμε στην επιλογή “Fit Mode” και το πατάμε με το ποντίκι

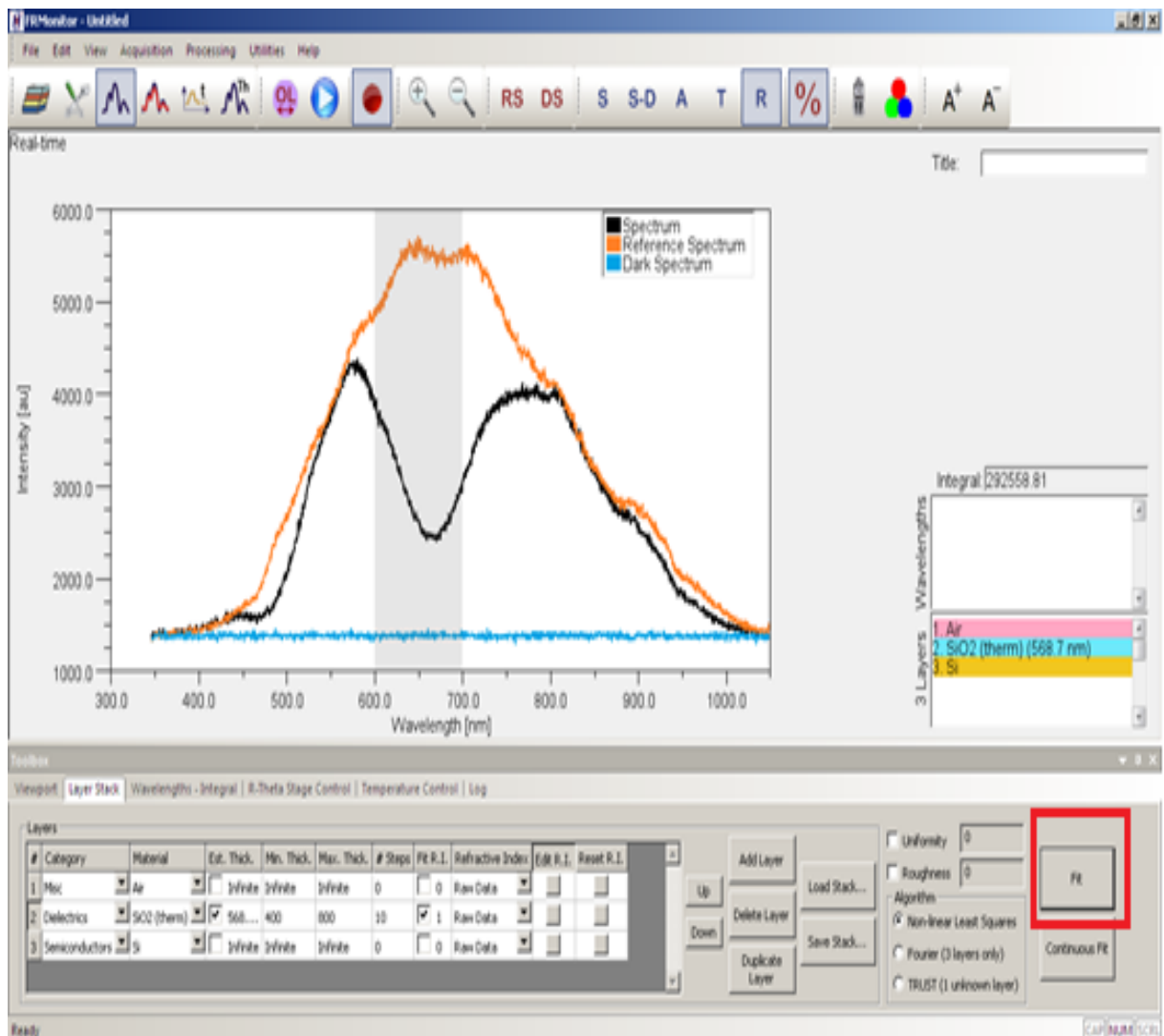




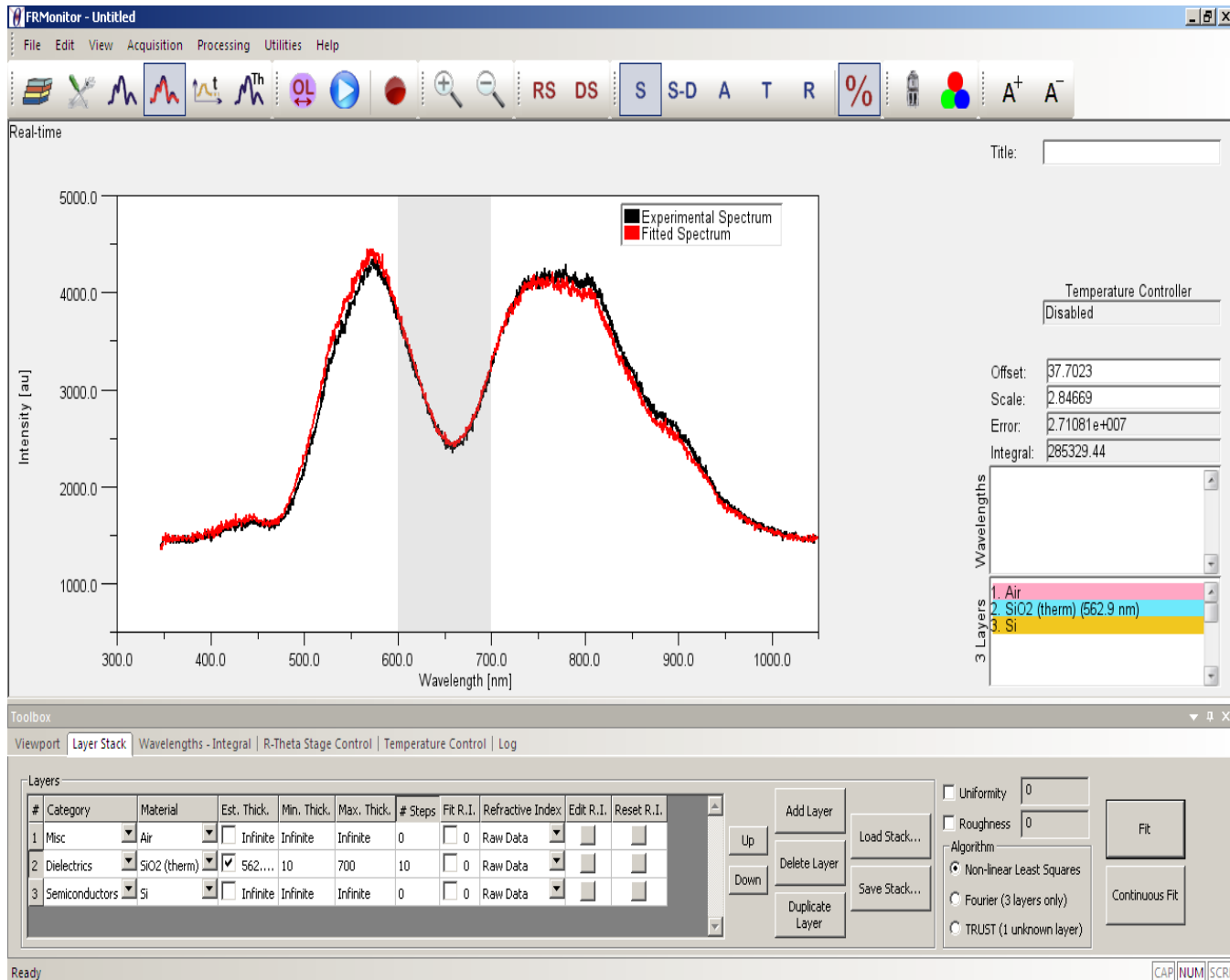
Για να δηλώσουμε το στρώμα του οποίου το πάχος θέλουμε να βρούμε, κάνουμε κλικ στο checkbox του Est. Thick.. Ακολούθως ορίζουμε τα Min. Thick., Max. Thick. και Est. Thick. Η επιλογή αυτών των τιμών γίνεται με κριτήριο την εκτίμησή μας για το πάχος του υλικού. Επίσης είναι απαραίτητο να ορίσουμε και τον αριθμό των βημάτων του επαναληπτικού αλγορίθμου που θα εκτελεστούν. Αυτό το ρυθμίζουμε από τη στήλη «# steps». Μία καλή προσέγγιση είναι να βάζουμε τουλάχιστον 1 με 2 βήματα για κάθε 100 nm που είναι το Max. Thick. – Min. Thick. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι όσα περισσότερα βήματα βάζουμε τόσο περισσότερο αργεί να εκτελεστεί ο αλγόριθμος. Εμεις έχουμε επιλεξει για **est.thick.=562nm**

**Min.thick.=10** και **max.thick=700** και **step=10**

Επειτα παταμε το κουμπι “FIT”



Ετσι λοιπόν παίρνουμε την παρακάτω εικόνα

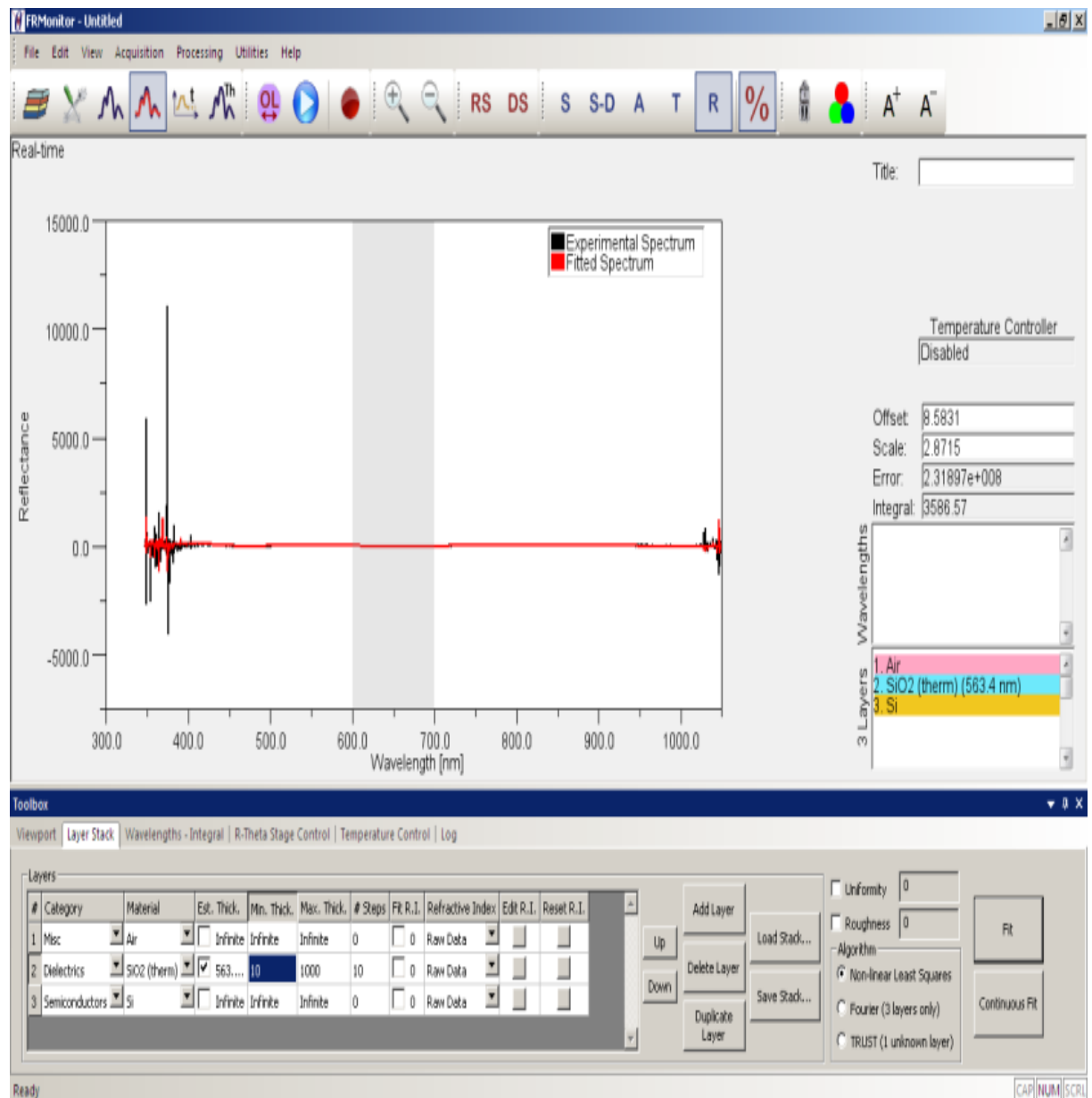


Να σημειωθεί ότι η μαύρη γραμμή είναι η γραμμή της μέτρησης ενώ η κοκκινή είναι η κυματομορφή της θεωρητικής πρόβλεψης του συγκεκριμένου στρώματος.

**Παρατηρούμε** σχεδόν τέλειο ταίριασμα των δυο καμπύλων η απόκλιση μεταξύ των δυο είναι σχεδόν αμελητέα τις τάξεις των **2,4nm** σύμφωνα με τα στάνταρ της εταιρείας και από το σχετικό έντυπο στο οποίο η μέτρηση του επιπέδου του **sio2** είναι **565,3nm**. Η συγκεκριμένη απόκλιση οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως για παραδειγμα εξωτερικός φωτισμος, σκονη , αλλοίωση του υμενιου με τον καιρο, καθαρότητα υμενιου.

\*Να σημειωθεί ότι οι τιμές που βάλουμε στα **est.thick. min.thick. max.thick. steps** μπήκαν επειτα από αρκετές μετρήσεις προκειμένου να «πλησιασούμε» στο επιθυμητό. Αυτό σημαίνει ότι αναγκαστήκαμε να μειώσουμε το **Max.thick.** διότι όταν ήταν υψηλό (1000) η καμπύλη της μετρήσης ήταν παραμορφωμένη και ουδεμία σχέση είχε με την θεωρητική προβλεψη. Αυτό συνέβη λόγω της μεγάλης τιμής **max.thick.** αυξανόταν και ο θόρυβος που περναγε μέσα στην καμπύλη της μετρήσης. Έτσι λοιπόν αυτό διορθώθηκε μειώνοντας την τιμή **max. thick.** σταδιακά έως που βρούμε πια είναι η καταλληλή τιμή που θα μας φέρει πιο κοντά στο επιθυμητό θεωρητικό στην περίπτωση αυτή ήταν το (700)

Παρακατω φενεται ένα παράδειγμα που υποστηρίζει οσα ειπαμε.



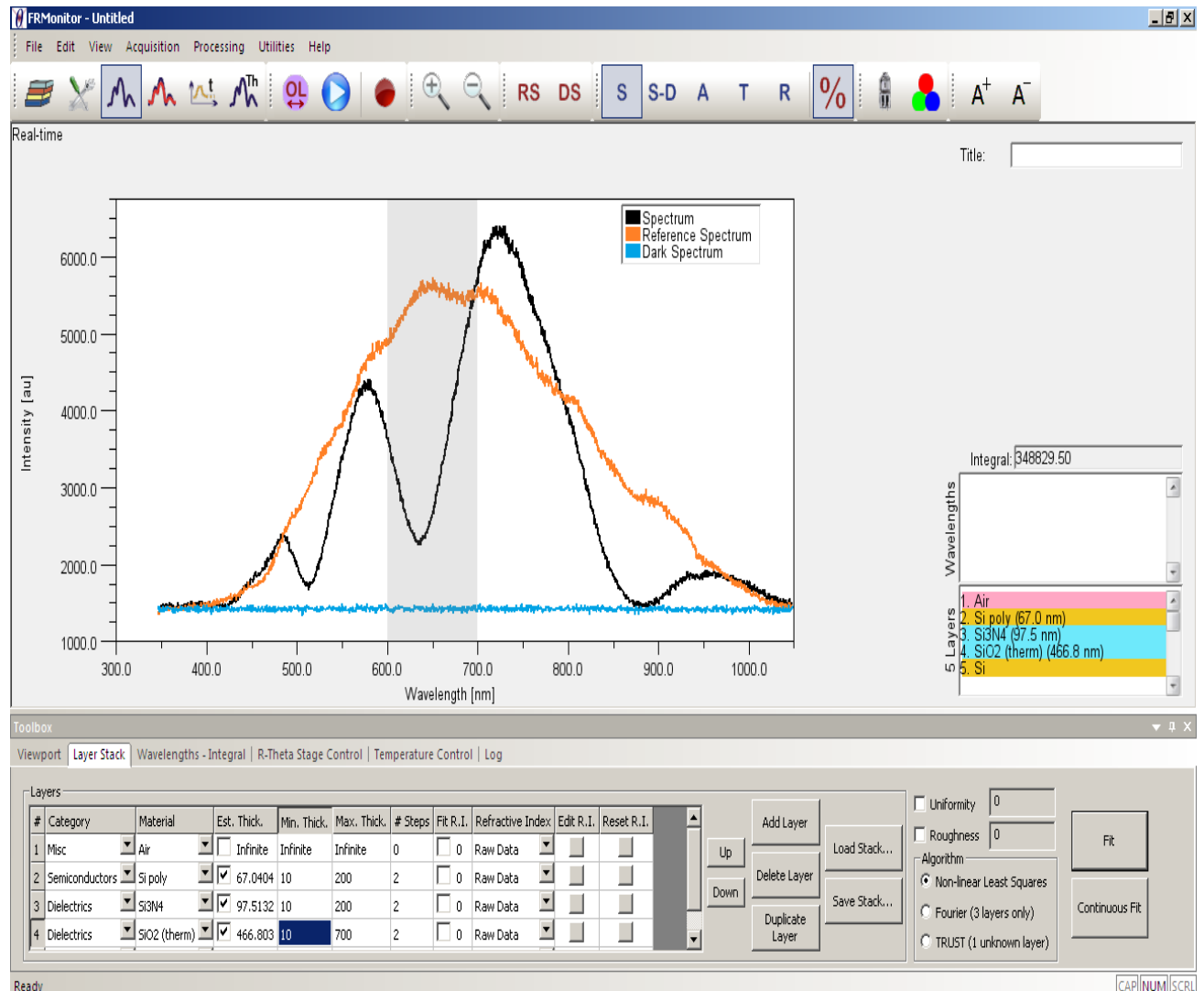
## 5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΙΟΥ 2 ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ Si3N4/SiO2/Si

### 5.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ Si3N4

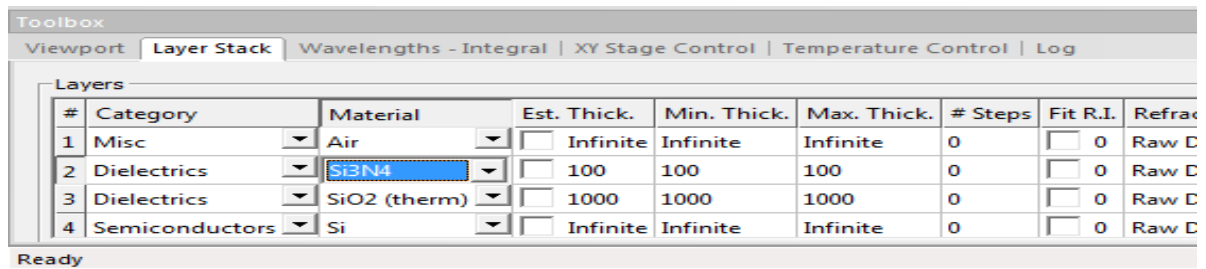
Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: Είναι είναι μια χημική ένωση των στοιχείων της σιλκόνης και νιτρίδιου. Έχει την υψηλότερη θερμοδυναμική σταθερότητα. Έχει υψηλό σημείο τήξης και χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην ιατρική κ.α καθώς έχει επίσης εφαρμογές στα ηλεκτρονικά συστήματα.

### 5.2.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ

Αφού εισάγουμε το δείγμα μας κατω από την λάμπα του οργάνου παίρνουμε την παρακάτω εικόνα στο πρόγραμμα

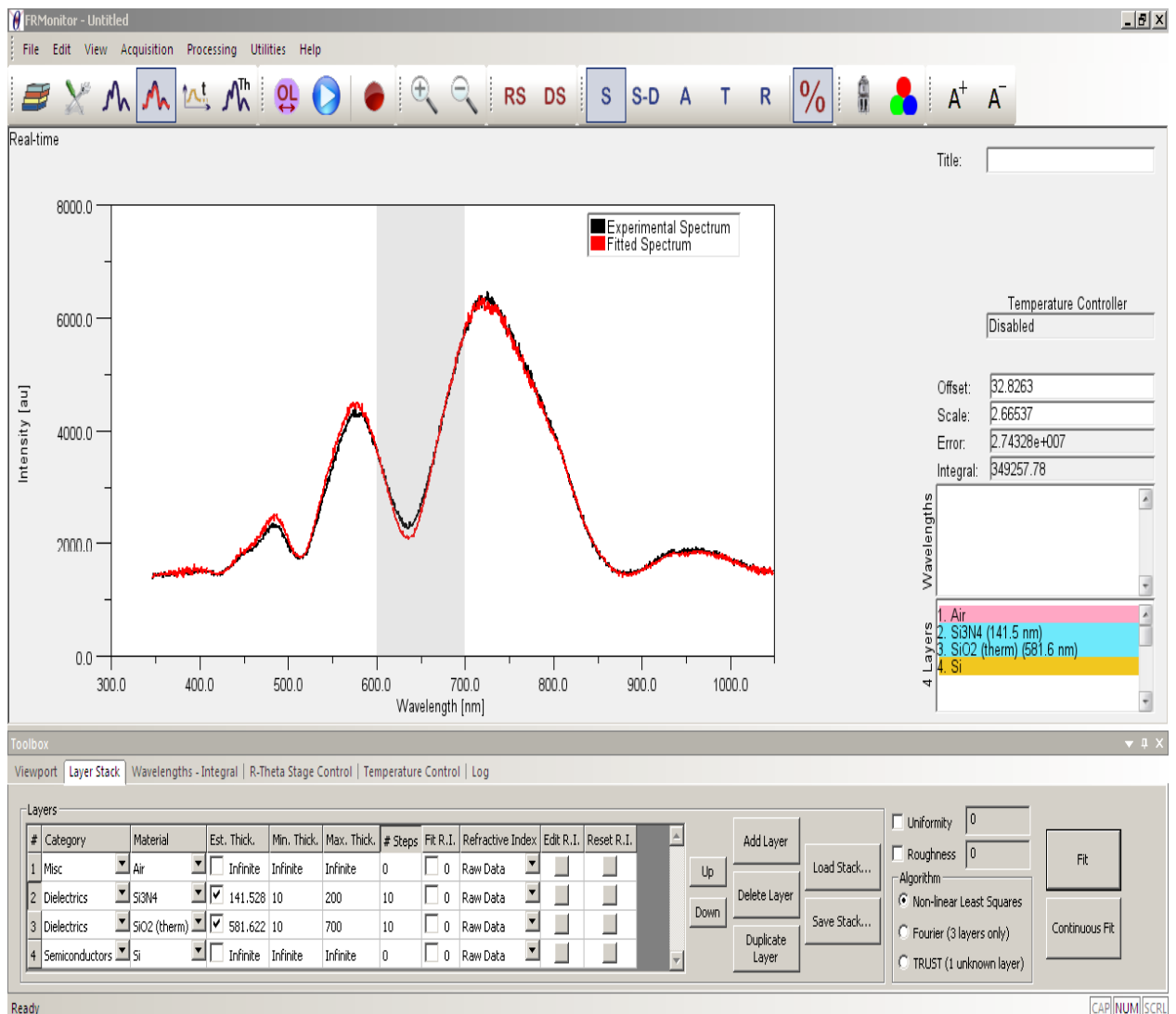


Όπως τονίσαμε στην πρώτη μας μέτρηση ,πρέπει να σιγουρευτούμε ότι έχουμε τα κατάλληλα στρώματα. Ετσι λοιπόν και εδώ επιλέγουμε **μονό** τα στρώματα που μας ενδιαφέρουν.



### 5.2.3 FITTING ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ

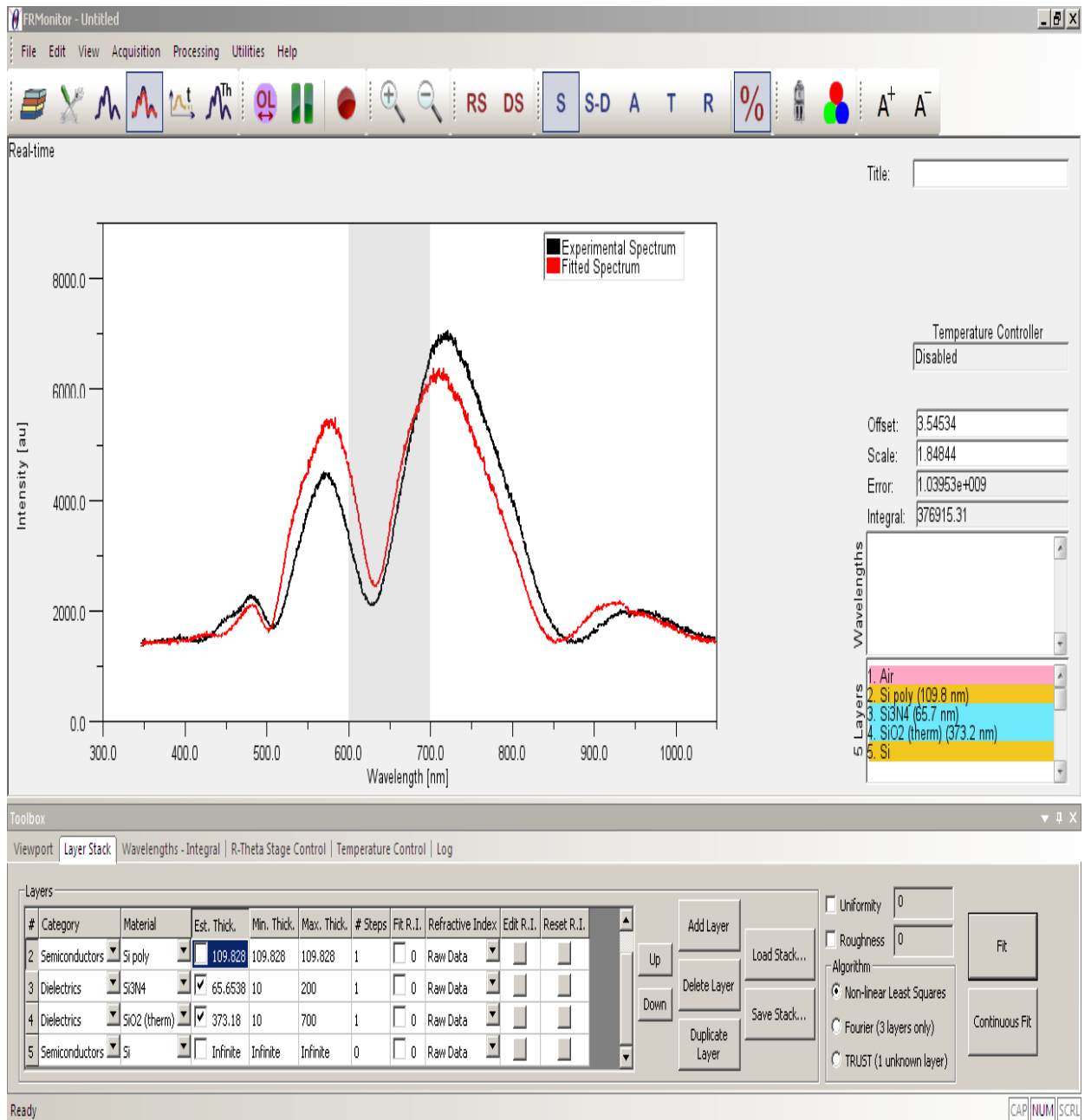
Αφου λοιπον εχουμε επιλεξει τα καταλληλα στρωματα ξεκινουμε να παρουμε τις μετρήσεις μας .Πατώντας λοιπόν το πληκτρο “**fitting mode**” .Στο σημειο αυτό εφόσον γνωρίζουμε καποια στοιχεια από την προηγούμενη μετρηση για το στρωμα **sio2** βάζουμε το **est.thick** οσο το βρήκαμε και πιο πανω. Ακομα στις επιλογες **min.thick.** και **max.thick.** προκειμενου να παρουμε μια πολύ καλη κυματομορφη καναμε καποιες δοκιμες ετσι λοιπον καταλήξαμε ότι οι πιο καταλληλες τιμες είναι **min.thick=10** και **max.thick.=200** και τελος **step=10**. Βαζοντας λοιπον τις παραπάνω τιμες στις επιλογές μας και πατωντας το κουμπί “**FIT**” λαμβάνουμε με επιτυχία την παρακάτω εικονα



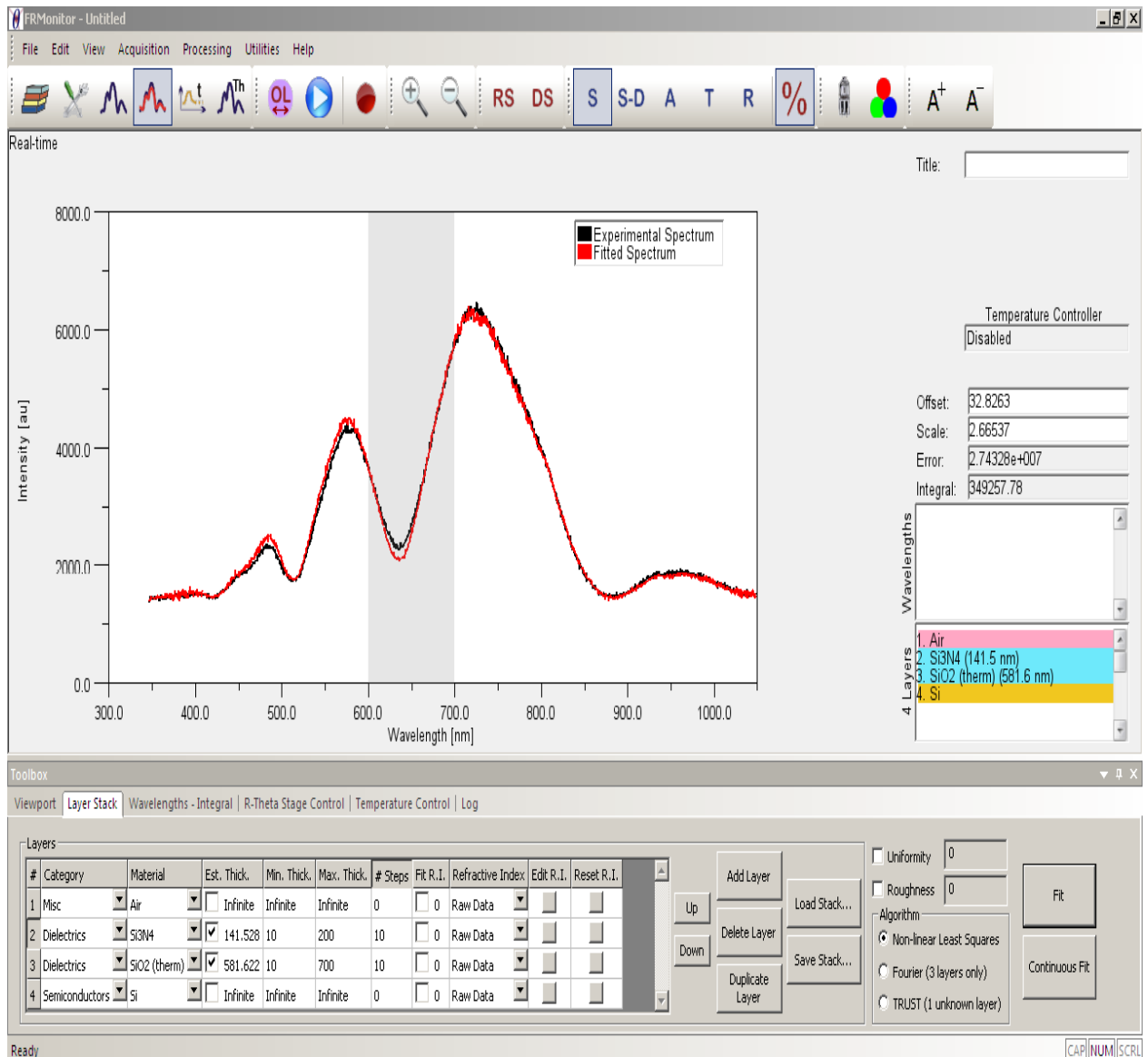
**Παρατηρούμε** σχεδόν τελείο ταίριασμα των δυο καμπυλων η απόκλιση μεταξύ των δυο είναι σχεδόν αμελητέα. Συμφωνά με τα στανταρ της εταιρείας και από το σχετικό εντυπο στο οποίο η μέτρηση του επιπέδου του **siO2 είναι 578.6** και του **si3n4 είναι 140.0nm** εδώ εμεις περνουμε μετρηση για το **siO2 είναι 581.6nm** και για το **si3n4 είναι 141.5nm**.

Είναι ευδιάκριτο ότι έχουμε κάποιες μικρές αλλά παρατηρήσαμε αποκλίσεις αυτό λοιπόν ωφειλεται σε διαφορους παράγοντες όπως για παράδειγμα εξωτερικός φωτισμος, σκονη, αλλειωση του υμενιου με τον καιρο, καθαρότητα υμενιου.

Ακομα: παρακάτω βλέπουμε πως επηρεάζεται η ακρίβεια της μετρησης μας αλλάζοντας τα **steps**



Βέβαια με μικρότερα **steps** παίρνουμε μια πιο γρήγορη μετρηση αλλα όχι και τόσο ακριβή .Αυτο φαίνεται από την παρακάτω φωτογραφία με περισσότερα **steps**.



Εδώ αργήσαμε αρκετα μεχρι να παρουμε την μετρηση μας διοτι βαλαμε περισσότερα **steps**. Όμως τελικα το «**ταιριασμα**» μεταξυ της κοκκινης(θεωρητικης) κυματομορφης και της μαυρης(πειραματικης) όπως ειπαμε και προηγουμενος είναι σχεδον τελειο.



## 5.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΥΜΕΝΙΟΥ 3 ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ POLY-SI/SI3N4/SIO2

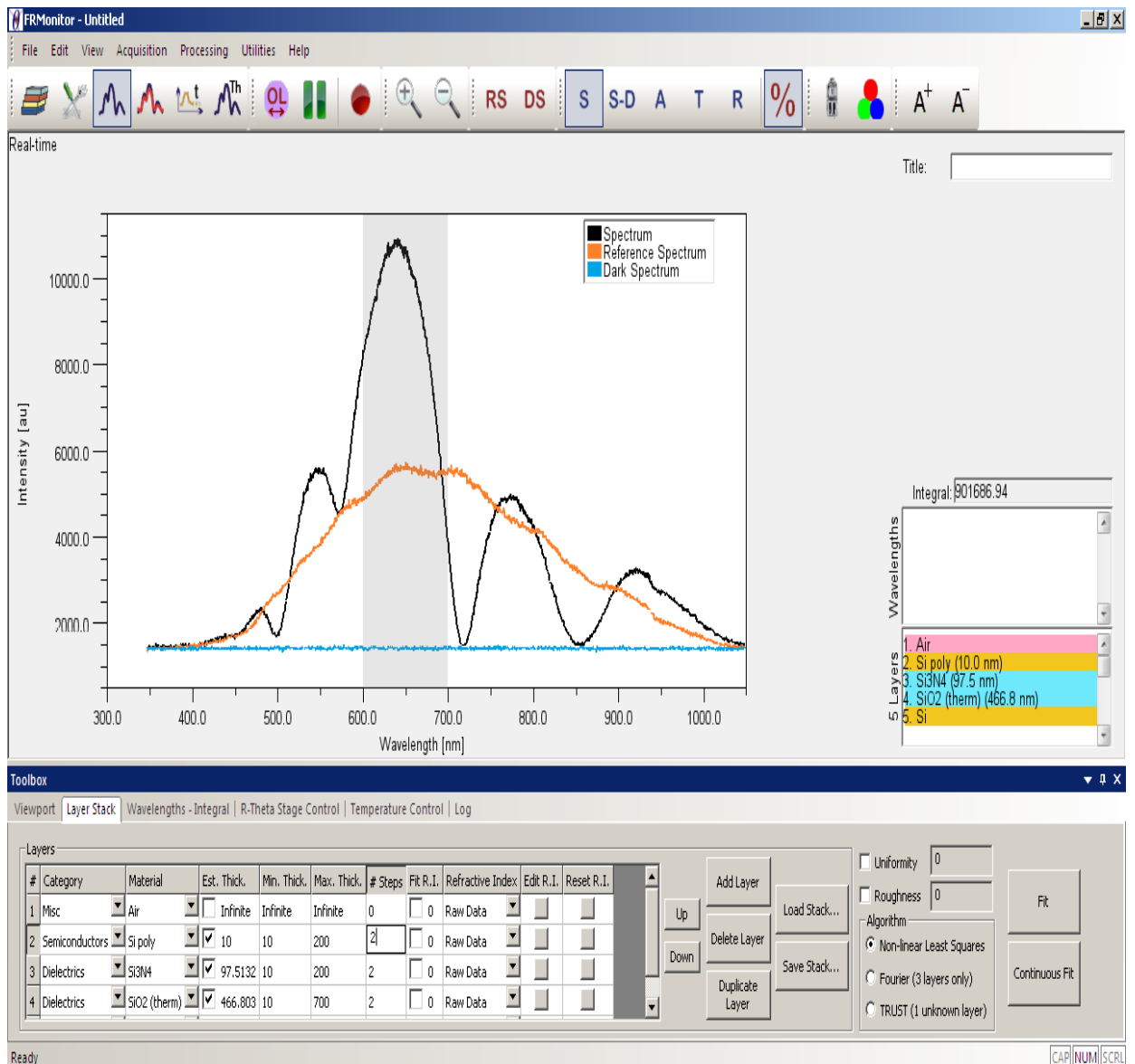
### 5.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ POLY-SI

Η πολυκρυσταλλική σιλικονή περιέχει μικρούς κρυσταλλούς οι οποίοι δίνουν στο στοιχείο μια χαρακτηριστική οψη. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών λόγω των ιδιοτήτων της.

### 5.3.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗ

Εισαγούμε το δείγμα μας κάτω από την λάμπα του συστήματος. Εφόσον σιγουρευτούμε ότι έχουμε κλείσει καλά το καπάκι, για να μειώσουμε όσο μπορούμε τους εξωτερικούς παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την μέτρηση μας.

Μόλις τοποθετήσουμε το δείγμα στο σύστημα εμφανίζεται αυτή η εικόνα στο πρόγραμμά μας

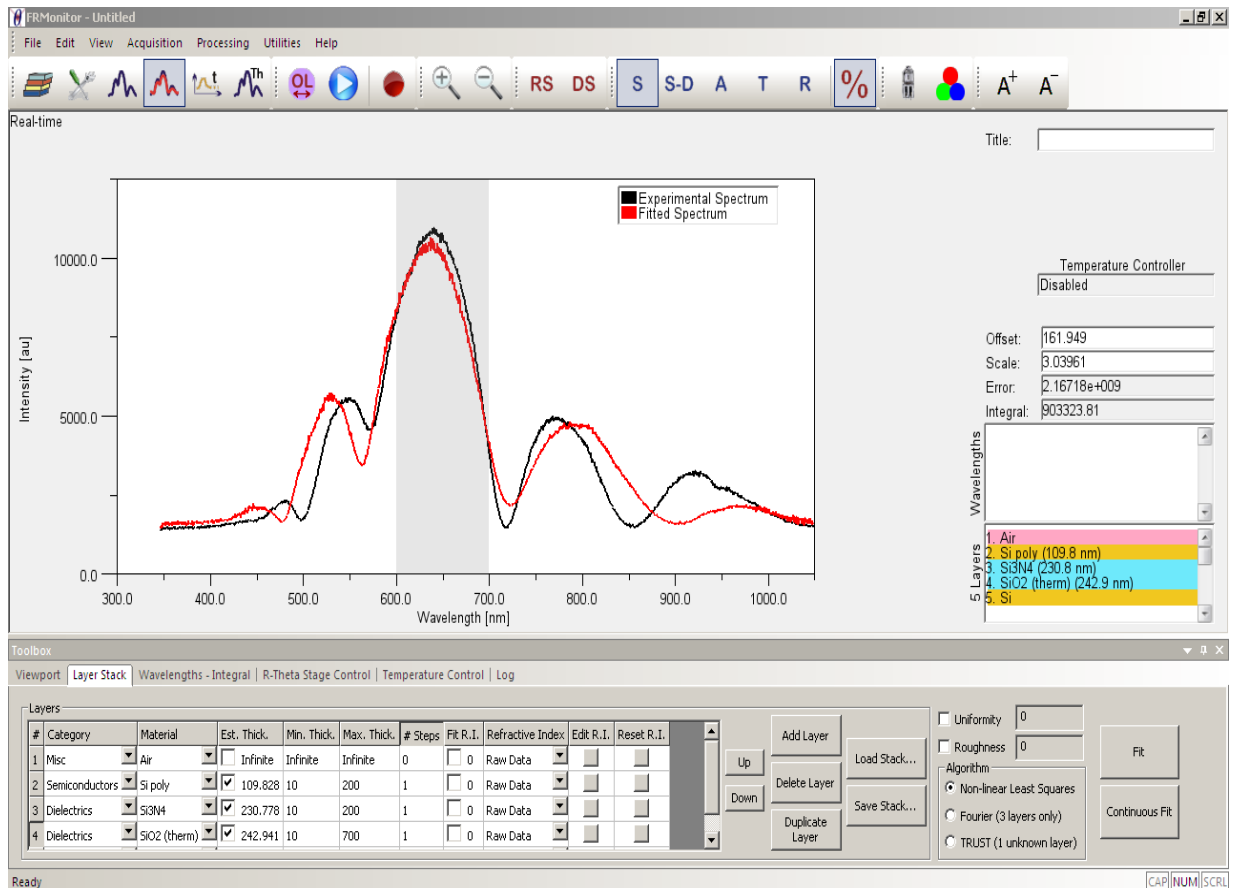


Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις μας επιλεγουμε μόνο τα στρώματα που μας ενδιαφέρουν και σε αυτήν την περίπτωση είναι τα **si-poly, si3n4,sio2,si**.

#	Category	Material	Est. Thick.	Min. Thick.	Max. Thick.	# Steps	Fit R.I.	Refractive Index	Edit R.I.	Reset R.I.
1	Misc	Air	<input type="checkbox"/> Infinite	Infinite	Infinite	0	<input type="checkbox"/> 0	Raw Data	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Semiconductors	Si poly	<input type="checkbox"/> 100	100	100	0	<input type="checkbox"/> 0	Raw Data	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Dielectrics	Si3N4	<input checked="" type="checkbox"/> 139.004	100	1000	0	<input type="checkbox"/> 0	Raw Data	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Dielectrics	SiO2 (therm)	<input checked="" type="checkbox"/> 577.545	100	1000	0	<input type="checkbox"/> 0	Raw Data	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

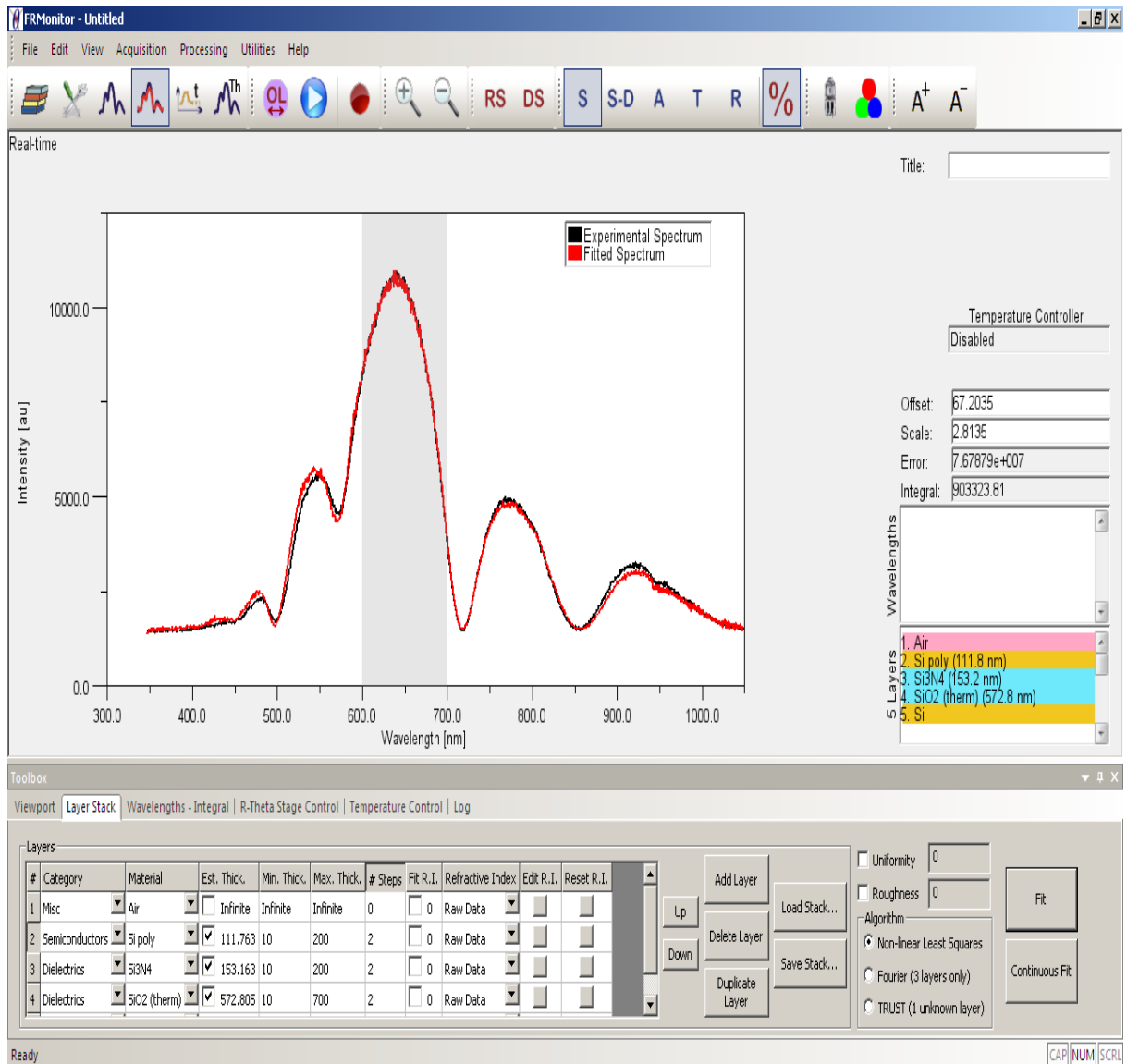
### 5.3.3 FITTING ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΥΜΕΝΙΟΥ

Αφου λοιπον εχουμε επιλέξει τα καταλληλα στρώματα ξεκινουμε να παρουμε τις μετρήσεις μας. Πατώντας λοιπόν το πληκτρο **“fitting mode”**.Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις βαζουμε τους κατάλληλους αριθμούς στα πεδία **est.thick** για το κάθε στρώμα (τις ελαχιστες τιμες τις γνωρίζουμε πλεον για τα στρώματα **si3n4** **sio2** ).Επίσης βάζουμε τις κατάλληλες τιμες στα πεδία **min.thick.** **max.thick** στην περίπτωση μας **min.thick.=10** και **max.thick.=200**.



Όπως φαίνεται παραπάνω η κόκκινη καμπυλη (θεωρητικη) δεν συμπίπτει απόλυτα με την μαύρη (πειραματικη) αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πεδίο **step =1** . Ύστερα από αρκετές μετρήσεις παρατηρήσαμε ότι αν βάζαμε **step** ίδια με τις προηγούμενες μετρήσεις η διαδικασία αργούσε υπερβολικά πολύ. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση αυτή έχουμε περισσότερα στρώματα, δηλαδή είναι λογικό να αργει η διαδικασία διότι το σύστημα έχει να κάνει περισσότερες διεργασίες (περισσότερα στρώματα).

Το καλύτερο που μπορούσαμε να κάνουμε προκειμένου να υπάρξει μεγαλύτερη ταύτιση των κυματομορφων ηταν να αυξήσουμε το **step** κατά 1 δηλαδή **step=2** . Οντως η μέτρηση μας έγινε η καλύτερη δυνατή, φαίνεται έξαλλου και στην επόμενη εικόνα.



Συγκρινοντας λοιπον τις δυο εικονες φενεται οτι μεγαλυτερη ακριβεια μας παραχωρει η δευτερη εικονα. Αυτό επαληθευεται εξαλου από τα στανταρ της εταιρειας και από το σχετικο εντυπο στο οποιο η μέτρηση του επιπεδου του **sio2** είναι **578.5** και του **si3n4** είναι **146.3nm** και του **poly-si** είναι **112.4nm** εδω εμεις παίρνουμε μετρηση για το **sio2** είναι **572.8nm** και για το **si3n4** είναι **153.2nm** και του **poly-si** είναι **111.8nm**.

Ειναι ευδιάκριτο οτι εχουμε κάποιες μικρες αλλα παρατηρησιμες αποκλίσεις αυτό λοιπόν οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως για παράδειγμα εξωτερικός φωτισμος, σκονη, αλλοίωση του υμενιου με τον καιρο, καθαρότητα υμενιου.

## 6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Χρήσιμοι σύνδεσμοι

Σχετικά με το FR-Basic ότι πληροφορία χρειάστηκε τόσο για την λειτουργία του όσο και για την διαδικασία των μετρήσεων την βρήκαμε στον σύνδεσμο <https://www.thetametrisis.com/>

Πληροφορίες για το πυρίτιο/σιλικονη/poly-si βρήκαμε στους συνδέσμους

<https://el.wikipedia.org/wiki/Πυρίτιο>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline\\_silicon](https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline_silicon)

### Εικόνες

Όλες οι εικόνες προέρχονται από το πρόγραμμα **FR-Basic** στον Η/Υ. Στις εικόνες όπου απεικονίζουν τα μέρη του συστήματος έχουμε μια πλήρη εικόνα στο πως μοιάζει το σύστημα μας.