Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (ΠΑΔΑ)



Τμήμα: Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ ΝΑΝΟΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ, ΜΕ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ



Παρατζή Θεοπίστη Ιωάννα

Επιβλέπων Καθηγητής: Γκανέτσος Θεόδωρος

Αθήνα, Αιγάλεω 2021

## Τριμελής επιτροπή αξιολόγησης

1. ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ

2. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΥΡΟΜΑΛΗΣ

3. ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΡΟΣΟΣ

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Θεοπίστη Ιωάννα Παρατζή του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 71446172 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/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 πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Παρατζή Θεοπίστη Ιωάννα

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλους τον επιβλέπων Καθηγητή και Υπεύθυνο Καθηγητή του μαθήματος Νανοτεχνολογίας, Θεόδωρο Γκανέτσο, ο οποίος με καθοδήγησε καθ΄ όλη την περίοδο της διπλωματικής μου, που στάθηκε δίπλα μου σε κάθε απορία και μου παρείχε κατάλληλα εξαρτήματα για την επίτευξη των μετρήσεων στο εργαστηριακό κομμάτι και που μεσολάβησε για την συνάντηση με την εταιρία (Theta Metrisis), η οποία κατασκευάζει τα μηχανήματα στα οποία εργάστηκα.

Θα ήθελα επίσης, να ευχαριστήσω τον βοηθό και συνεργάτη του υπεύθυνου καθηγητή, που εργαζόταν μαζί του στο εργαστήριο, τον Νικόλαο Λάσκαρη, ο οποίος με βοήθησε στην κατανόηση εις βάθος στο εργαστηριακό κομμάτι.

Ευχαριστώ την ThetaMetrisis και ειδικότερα τον υπεύθυνο της εταιρίας τον κύριο Ράπτη Ιωάννη που δέχτηκε το αίτημα μου, για να με βοηθήσει στην διπλωματική μου εργασία. Υπήρχε εξαιρετικό καθοδηγητικό προσωπικό προκειμένου να λύσουμε απορίες.

Ευχαριστίες θα ήθελα να αποδώσω και στην τριμελή επιτροπή η οποία θα είναι παρούσα στην παρουσίαση για την διπλωματική μου εργασία.

Να ευχαριστήσω τον Βασίλειο Χριστιανίδη συμφοιτητή και συνεργάτη που συνεργαστήκαμε για να διεκπεραιώσουμε παρόμοιες μετρήσεις για διαφορετικό τύπου θεμάτων και την υλοποίηση κώδικα που αναφέρεται για τις καμπύλες κατανομής. Καθώς και τους συμφοιτητές μου Παύλο Τουμλελή και Αμπντελμασίχ Αμπανούμπ για τις παρατηρήσεις και ιδέες τους στη σχεδίαση κάποιων αντικειμένων της εργασίας αντίστοιχα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γεώργιος και Παναγιώτα που με στήριξαν και με εμψύχωσαν στην διεκπεραίωση της εργασίας μου αυτής.

## Περιεχόμενα

Τριμελής επιτροπή αξιολόγησης	2
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
Περιεχόμενα	5
Εισαγωγή	8
Πλάνο Εργασίας	9
Κεφάλαιο 1: Βασικοί όροι και ονομασίες	10
Κεφάλαιο 3: Περίληψη διάταξης πειράματος & λογισμικού	23
3.1 Περιγραφή δειγμάτων	25
Κεφάλαιο 4: Περιγραφή διαδικασίας μέτρησης	27
4.1: Προετοιμασία μέτρησης πάχους	27
4.2: Περιγραφή του wafer πριν τη μέτρηση	28
Layer stack	28
4.3: Μέτρηση του πάχους του δείγματος	30
Σημειώσεις κατά τη μέτρηση	30
Κεφάλαιο 5: Μέτρηση πάχους δειγμάτων	32
Περιοχή 2	33
Περιοχή 3	36
Περιοχή 4	39
Κεφάλαιο 6: Προσδιορισμός της τιμής ενεργειακού χάσματος	42
Όροι και ονομασίες	42
Εισαγωγή και περιγραφή διάταξης	42
Βήματα εύρεσης ενεργειακού χάσματος	44
Συνάρτηση Eg για το Si (πυρίτιο)	46
Υπολογισμός Ενεργειακού χάσματος Si	47
Συνάρτηση Eg για το Si-Poly (polycrystalline oxide)	48
Ο περιορισμός εύρεσης ενεργειακού χάσματος	50
Συνάρτηση Eg για το Si₃N₄ (Silicon Nitride):	50
Συμβατικές ονομασίες και λεξιλόγιο	55
Βιβλιογραφία	56

## Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται χρήση ενός δομοστοιχειωτού και επεκτάσιμου οργάνου, κατάλληλα σχεδιασμένο για τη μέτρηση πάχους νανοϋλικών, ονόματι FR-Basic, με τη συνοδεία του λογισμικού FR-Monitor, της εταιρίας Thetametrisis, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους για να λάβουν επιτυχώς τη μέτρηση πάχους ενός δείγματος (wafer), το οποίο σε αυτή τη πειραματική διάταξη είναι χωρισμένο σε 4 περιοχές, το κάθε ένα με μία επιπλέον επίστρωση μιας χημικής ένωσης. Στη σελίδα 44 δίνονται κάποιοι συμβατικοί όροι και ονομασίες οι οποίες χρησιμοποιούνται μέσα στο κείμενο.

Στο πρώτο κεφάλαιο επεξηγούνται βασικές έννοιες πάνω στο πεδίο της πτυχιακής και της ηλεκτρονικής γενικότερα, προκειμένου να γίνει πιο φιλικό το υπόλοιπο περιεχόμενο σε κάποιον πρωτόπειρο. Καθώς στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιούνται επιπλέον\* ονομασίες οι οποίες δεν εξηγούνται, ο αναγνώστης καλείται να μελετήσει ανεξάρτητα, σε εξωτερικές πηγές επιπλέον πληροφορίες για ό,τι δεν γίνεται κατανοητό πλήρως.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία περεταίρω ανάλυση των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις του υλικού εξοπλισμού (FR-Basic) και του λογισμικού (FR-Monitor) και στον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς και του δείγματος προς μέτρηση (wafer), παράλληλα με τους θεωρητικούς όρους που θα χρησιμοποιηθούν.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των επιπέδων του δείγματος, την χρήση του καθενός στη νανο ηλεκτρονική και μία περίληψη του τι μέθοδοι θα χρησιμοποιηθούν κατά την μελέτη των μετρήσεων πάχους των δειγμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μια σύντομη επίδειξη διάταξης και χρήσης των FR tools (Fr-Basic/ hardware και FR-Monitor/ software) για σκοπούς εύκολης και πλήρης κατανόησης της διαδικασίας μετρήσεων, έτσι ώστε στο επόμενο κεφάλαιο να μπορούν να παρουσιαστούν μόνο τα αποτελέσματα, όλων των επιπέδων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η σημασία των συντομογραφιών και τα αποτελέσματα μετρήσεων με σειρά: πρώτα ανάλογα τη περιοχή, ύστερα μόνο με τη μέθοδο Reflectance για το κάθε δείγμα προς ανάλυση. Ταυτόχρονα, παραδίδονται τα διαγράμματα κανονικής κατανομής (Gauss) για κάθε πακέτο μετρήσεων ίδιας περιοχής, για να χαρακτηριστούν με καλύτερο τρόπο η αξιοπιστία των μετρήσεων και να μπορέσουν να συγκριθούν. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τις καμπύλες κανονικής κατανομής, μπορεί να βρεθεί στο github [a].

Στο έκτο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται οι γραφικές παραστάσεις των δειγμάτων προκειμένου να κατασκευαστεί μία νέα καμπύλη με τη χρήση Kubelka Munk, κατάλληλη για την εύρεση της τιμής του band gap (ενεργειακού χάσματος) του κάθε δείγματος, όπου ύστερα συγκρίνονται με τις τιμές των ενεργειακών χασμάτων που βρέθηκαν σε βάσεις δεδομένων στο διαδίκτυο. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να βρεθεί στο github [b].

### Abstract

In this dissertation, a modular and scalable instrument, suitably designed for measuring the thickness of nanomaterials, called FR-Basic, is used, accompanied by FR-Monitor software from Thetametrisis, which communicate with each other, in order to successfully obtain the measurement. thickness of a sample (wafer), which in this experimental device is divided into 4 regions, each of them with an additional coating of a chemical compound. On page 44 are given some conventional terms and names that are used in the text are given.

In the first chapter basic concepts in the field of degree and electronics in general are explained, in order to make the rest of the content more friendly to a pioneer. Furthermore, as extra \* unexplained names are used in this chapter, the reader is invited to study independently, through external sources, additional information on what is not fully understood.

In the second chapter a further analysis of the tools used in the measurement of hardware (FR-Basic) and software (FR-Monitor) and their operation is provided, as well as the sample to be measured (wafer), in parallel with the theoretical terms to be used.

In the third chapter the levels of the sample are described, the use of each in nano electronics and a summary of what methods will be used when studying the thickness measurements of the samples.

In the fourth chapter a brief demonstration of the layout and use of FR tools (Fr-Basic / hardware and FR-Monitor / software) is made for the purpose of easy and complete understanding of the measurement process, so that in the next chapter only the results of all levels can be presented.

In the fifth chapter the meaning of the abbreviations and the results of measurements are presented in the following order: firstly depending on the area, then only with the Reflectance method for each sample to be analyzed. At the same time, the normal distribution diagrams (Gauss) are delivered for each package of measurements of the same area, in order to characterize in a better way the reliability of the measurements and to be able to compare. The code used for normal distribution curves can be found on github [a].

In the sixth chapter the graphs of the samples are used in order to construct a new curve using Kubelka Munk, suitable for finding the value of the band gap (energy gap) of each sample, where they are later compared with the values of the energy gaps found in internet databases. The code used can be found on github [b].

## Εισαγωγή

Κάθε μέρα, όπως όλοι παρατηρούμε γίνεται αισθητή ολοένα και περισσότερο η παρουσία της τεχνολογίας στη ζωή μας. Έχουν γίνει μελέτες και βρίσκονται σε εξέλιξη που αφορούν κάθε τεχνολογικό τομέα, με σκοπό την εύρεση και επίλυση των προβλημάτων που δημιουργούνται, καθώς και τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης. Με αυτόν τον τρόπο δίνει την δυνατότητα να εξελίσσεται η τεχνολογία και να έχει σπουδαίες αλλαγές στην βιομηχανία και στην επιστήμη.

Εξίσου σημαντική είναι η μελέτη του τρόπου χαρακτηρισμού των νανοϋλικών και για αυτό είναι υπεύθυνη, η επιστήμη της νανοτεχνολογίας. Οι εφαρμογές της είναι αναρίθμητες, ενώ οι επιπτώσεις των προϊόντων της γίνονται αντιληπτές σε πολλά επίπεδα κυρίως στον οικονομικό τομέα επηρεάζοντας παγκόσμιες βιομηχανίες αλλά και στο κοινωνικό σύνολο βελτιώνοντας το επίπεδο της ζωής και παράλληλα του περιβάλλοντος.

Η νανοτεχνολογία είναι ένας κλάδος της επιστήμης που ασχολείται με νανοϋλικά με κύρια προϊόντα τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (IC), δηλαδή επεξεργαστές κινητών και υπολογιστών. Τα νανοϋλικά έχουν την ιδιότητα να έχουν μικρό βάρος και κόστος και να καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια. Η χρησιμότητά τους φαίνεται στη χρήση των φωτοβολταϊκών, όπου κάθε χρόνο βελτιώνεται η αποδοτικότητά τους χάρη σε αυτή την επιστήμη. Σε έξυπνες συσκευές όπως συσκευές που βοηθούν τους αθλητές να δουν κάποια βιολογικά χαρακτηριστικά τους σε ζωντανό χρόνο όπως τους σφυγμούς, αλλά γίνονται χρήση και σε τρόφιμα μέσω εμφύτευσης ουσιών, καθώς και στον τομέα της κοσμητολογίας διαμέσου πολύ μικρών κοσμημάτων κι της αισθητικής που εμφανίζονται στα καλλυντικά.

Τα τελευταία χρόνια η Νανοτεχνολογία έχει εξελιχθεί κατά πολύ και ποτέ δεν παύει να αναπτύσσεται και να βελτιώνεται.

## Πλάνο Εργασίας

Αρχικά έγινε η επιλογή θέματος για τη συγκεκριμένη εργασία και έπειτα από συμφωνία με τον επιβλέπων καθηγητή, δόθηκε υλικό προς μελέτη το οποίο βασιζόταν πάνω στη θεωρία και στο πρακτικό κομμάτι του λογισμικού το οποίο χρησιμοποιήθηκε, για να παρθούν κάποιες μετρήσεις. Σκοπός ήταν η μέτρηση του πάχους πάνω σε πολύ λεπτά υμένια, αλλιώς νανοϋλικά, με τη χρήση της τεχνικής VIS-NIR.

Έπειτα από μελέτη, άρχισαν να γίνονται οι πρώτες μετρήσεις με βάση ένα μηχάνημα, το FR Basic και ταυτόχρονα με τη βοήθεια ενός λογισμικού προγράμματος, το FR Monitor. Οι πρώτες μετρήσεις είχαν αποκλίσεις σε σχέση με τις κατασκευαστικές τιμές του πάχους των δειγμάτων. Μετά από πολύωρη εξάσκηση λήψης μετρήσεων υπήρξε μείωση στις αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές τιμές.

Να σημειωθεί ότι η μετρήσεις πάρθηκαν με τη χρήση της μεθόδου αντανάκλασης σε διαφορετικά σημεία σε κάθε περιοχή του δείγματος. Αργότερα έγινε απόπειρα λήψης μετρήσεων σε διαφορετικά πάλι σημεία, σε κάθε περιοχή, με σκοπό τη μέτρηση του πάχους των υμένιων με τη μέθοδο της απορρόφησης και της μετάδοσης. Όμως διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις ήταν λάθος διότι χρειαζόταν ένα ειδικό εργαλείο, με χρήση άλλων οπτικών ινών ώστε να μπορέσουν να εκτελεστούν οι συγκεκριμένες μετρήσεις. Δεν υπήρχε δηλαδή η σωστή πειραματική διάταξη.

Αφού τελειοποιήθηκε το παραπάνω εργαστηριακό κομμάτι, δόθηκαν από τον επιβλέποντα καθηγητή, επιπλέον ύλη προς μελέτη, προκειμένου να υπολογιστεί το ενεργειακό χάσμα για κάθε υλικό.

Τέλος, αυτό ήταν και το τελευταίο πρακτικό-εργαστηριακό κομμάτι που έπρεπε να υλοποιηθεί. Καθώς ταυτόχρονα γινόταν η συγγραφή του θεωρητικού μέρους της εργασίας.

## Κεφάλαιο 1: Βασικοί όροι και ονομασίες

**Μονωτής:** Είναι το υλικό που δεν επιτρέπει να το διαπεράσει ηλεκτρικό φορτίο. Κάποια παραδείγματα μονωτών είναι το πλαστικό, το καουτσούκ, ακόμα κι ο ατμοσφαιρικός αέρας θεωρείται ένα είδος μονωτή, [1.1] τόσο αποτελεσματικός μάλιστα που χρησιμοποιείται και ως μονωτής στους πυλώνες υψηλών τάσεων. Ουσιαστικά, ανάμεσα στα χάλκινα καλώδια αυτά, υπάρχει αέρας. «The most important insulation material is air», αναφέρει στο βιβλίο του: *EMF Electrical Year Book, Volume 1, το 1921 η Electrical Trade Publishing Company [1.1.a]*. Στο κεφάλαιο 3.1, κατά την ανάλυση των δειγμάτων προς μελέτη θα δοθεί και μία επιπλέον επεξήγηση στην έννοια του μονωτή.

**Αγωγός** ονομάζεται το υλικό, το οποίο αντίθετα με τον μονωτή, επιτρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να το διαπεράσει εύκολα. Οι έννοιες αγωγός και μονωτής, στηρίζονται στη καθημερινή, εμπειρική γνώση για τον χαρακτηρισμό των υλικών. Άξιο απορίας είναι, ότι εφόσον το υλικό των παπουτσιών (πολυερεθάνη ή άλλα μονωτικά υλικά) σε περίπτωση επαφής του χρήστη τους με υψηλή τάση, το ρεύμα θα διαπεράσει το σώμα του χρήστη και θα κατευθυνθεί στο έδαφος. Όλα τα υλικά είναι αγωγοί, σε κάποιο 'επίπεδο'. Δηλαδή από κάποια τάση και άνω, οι μονωτές δρουν ως αγωγοί, με κάθε μονωτή να έχει μία διαφορετική τάση 'κατάρρευσης' ή breakdown voltage, η οποία καθορίζεται από το ενεργειακό χάσμα του κάθε μονωτή, κάτι το οποίο θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 6.

Οι δύο παραπάνω ιδιότητες, οδηγούν στον **ημιαγωγό.** Ημιαγώγιμα υλικά είναι αυτά, τα οποία ο χρήστης μπορεί να ελέγξει εάν θα άγουν ή όχι ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από το σώμα τους. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται στα MOSFET ή στα transistors (TRANSfer resISTOR) προκειμένου να ελέγχεται η ροή του ρεύματος μιας υψηλής τάσης με τη χρήση μιας μικρής τάσης ή λογικού 0 -5 volt.

Νάνο και η νανοτεχνολογία: Το νάνο χρησιμοποιείται για να περιγραφεί κάτι πολύ μικρό, και ο όρος χρησιμοποιείται στις μονάδες μέτρησης (νανόμετρα: 1 νανόμετρο = 10<sup>-9</sup>μέτρα). Η νανοτεχνολογία είναι το πεδίο εκείνο της επιστήμης που μελετάει τα αντικείμενα προς ανάλυση σε νανομετρική κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί ένα γενικό κλάδο, με μεγάλη ευρύτητα και αποτελεί την ικανότητα στο να περιγράψει οτιδήποτε συμβαίνει στις διαστάσεις του νανο-μέτρου [1.2]. Αυτό, σε συνδυασμό συχνά με τη κβαντοφυσική, επιστήμη φυσικής, η οποία βρίσκει εφαρμογή όταν μελετάται ένα σύστημα σε μικροσκοπικές κλίμακες –κοντά στα μεγέθη των ηλεκτρονίων και τον ατόμων- επηρεάζουν όλο και περισσότερο τα προϊόντα της νανοτεχνολογίας, καθώς τα τελευταία αποκτούν όλο και μικρότερες διαστάσεις, όπως τα transistor που χρησιμοποιούνται στους επεξεργαστές. **Wafer:** Προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα του μεγέθους των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (έστω transistor), τα οποία επιθυμεί από τον σχεδιαστή ενός προϊόντος μέχρι και τον καταναλωτή να μειωθούν σε μέγεθος, προκειμένου να χωράνε στις τσέπες μας (κινητά τηλέφωνα), να είναι φορητά (φορητοί υπολογιστές/ laptop) ή απλά να προσφέρουν μεγάλες επιδόσεις σε σχέση με την ενεργειακή τους κατανάλωση, η πρώτη εταιρία που κατάφερε να δημιουργήσει εμπορικά διαθέσιμα transistor μικρού μεγέθους είναι η Texas Instruments το 1954.



(Εικόνα 1.1) Σύγκριση μεγέθους. Αριστερά, Lucent Technologies/Bell Labs' junction transistor γερμανίου, το 1950. Δεξιά, Texas Instrument's εμπορικό transistor πυριτίου, 1954 [1.3]

Στα επόμενα χρόνια, ακολούθησαν βελτιστοποιήσεις και νέες μέθοδοι κατασκευής transistors και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μαζικά, με τη χρήση τεχνικών όπως doping, πάνω σε **wafers** προκειμένου να μειωθεί το κόστος και ο χρόνος παραγωγής.



(Εικόνα 1.2) Wafer, ήδη επεξεργασμένο έτσι ώστε κάθε επαναλαμβανόμενο μοτίβο να είναι το ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Συνήθως επεξεργαστής ή μικροελεγκτής. [1.4]



(Εικόνα 1.3) Wafer πυριτίου, χωρίς επεξεργασία (ακόμα) για τη κατασκευή ολοκληρωμένου κυκλώματος. *[1.5]* 

Η προσέγγιση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων από πάνω προς τα κάτω (top-down) κατά τον σχεδιασμό τους, επιτρέπει την μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Πρόκειται για προσέγγιση η οποία εμπεριέχει πολλές τεχνικές όπως οπτική λιθογραφία και εκτύπωση με ψεκασμό.



Εικόνα 1.4 [1.6]

Η οπτική λιθογραφία είναι παρόμοια με τη φωτογραφική εκτύπωση αλλιώς εκτύπωση με ψεκασμό. Έχει την ικανότητα να δημιουργεί μοτίβα σε ένα στρώμα «φωτοανθεκτικού» που επικαλύπτει μια έτοιμη επιφάνεια πυριτίου. Μόλις δημιουργηθούν τα σχέδια, τα στοιχεία του ολοκληρωμένου κυκλώματος συγκεκριμένα τα ηλεκτρόδια του τρανζίστορ και τα καλώδια - η σύνδεσή τους σχηματίζεται με χάραξη υλικού εναπόθεσης ή εμφύτευσης ιόντων.

Ακολουθούν τα βήματα συνοπτικά που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της οπτικής λιθογραφίας όπως απεικονίζονται και στην Εικόνα 1.4:

- Μια «γκοφρέτα» αλλιώς επιφάνεια πυριτίου προετοιμάζεται για φωτολιθογραφία που επικαλύπτεται από ένα στρώμα νιτριδίου του πυριτίου, ακολουθούμενο έπειτα από ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου και τέλος ένα στρώμα «φωτοανθεκτικού».
- 2. Το φως από ένα φωτιστικό προβάλλεται μέσω μάσκας, το οποίο περιέχει το μοτίβο που θα δημιουργηθεί στην πλακέτα της επιφάνειας του πυριτίου. Τα φωτεινά μοτίβα που διέρχονται από τη μάσκα, μειώνονται από έναν φακό εστίασης κατά ένα συντελεστή των τεσσάρων και προβάλλονται στη φωτοευαίσθητη «γκοφρέτα» πυριτίου. Αυτό το βήμα εκθέτει ένα τσιπ στο υμένιο αυτό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα τσιπ που βρίσκονται πάνω το υμένιο του πυριτίου.
- 3. Το «φωτοανθεκτικό» που εκτίθεται στο φως γίνεται διαλυτό και ξεπλένεται, αφήνοντας μια μικρογραφία της εικόνας του μοτίβου της μάσκας σε κάθε θέση των τσιπ.
- 4. Οι περιοχές που είναι μη προστατευμένες από το «φωτοανθεκτικό» είναι χαραγμένες. Αφαιρείται το διοξείδιο και το νιτρίδιο του πυριτίου στο οποίο εκτίθεται το πυρίτιο.
- 5. Οι ακαθαρσίες μπορούν να προστεθούν στις χαραγμένες περιοχές, αλλάζοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες του πυριτίου όπως απαιτείται για να σχηματιστεί το τρανζίστορ.
- 6. Τα βήματα 1-5 μπορούν να επαναληφθούν για πολλά στρώματα όπως απαιτείται για το σχηματισμό των τρανζίστορ. Οι μεταλλικές γραμμές που συνδέουν τα τρανζίστορ φτιάχνονται κι αυτές κάνοντας χρήση τη διαδικασία της φωτολιθογραφίας επίσης.

Αναλυτικά διακρίνεται η **λιθογραφία** ή **οπτική λιθογραφία** ή **λιθογραφία υπεριώδους ακτινοβολίας** που αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας της κατασκευής από πάνω προς τα κάτω (top-down). Είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί για να μικροκατασκευάσει και να σχεδιάσει τμήματα λεπτών υμενίων ή κάποιου όγκου ενός υποστρώματος σε μια συγκεκριμένη εστιασμένη περιοχή. Η οποία ακτινοβολούμενη από φως με σκοπό να μεταφερθεί ένα γεωμετρικό μοτίβο (pattern) από μία συσκευή φωτός σε ένα φωτοευαίσθητο χημικό «φωτοανθεκτικό», που αρκεί μονάχα για να αντιστέκεται στο υπόστρωμα. [1.7.2]

Ακολουθεί μια χημική διεργασία όπου οι χημικές μεμβράνες επηρεάζονται από την ακτινοβολούμενη ενέργεια, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ακριβή προσωρινά μοτίβα σε πλακίδια πυριτίου ή και σε άλλα υλικά. Στα προσωρινά σχέδια μπορούν να γίνουν κάποιες αλλαγές όπως η προσθήκη ή η αφαίρεση υλικού από μια δεδομένη περιοχή. Αλλά και ακόμη να μπορεί να χαραχθεί το σχέδιο που εκτίθεται από την ακτινοβολία του φωτός στο υλικό ή να μπορέσει να επιτρέψει την απόθεση νέου υλικού σε επιθυμητό σχέδιο πάνω στο υπάρχον υλικό υπό την αντίσταση του «φωτοανθεκτικού». Για να μπορέσει να αλλάξει τις χημικές ιδιότητες των λεπτών στρωμάτων των μεμβρανών χρησιμοποιείται η μέθοδος της λιθογραφίας το φως ή άλλες μορφές της ενεργειακής ακτινοβολίας όπου και έχουν επικαλυφθεί σε ένα υπόστρωμα. *[1.7]* 

Η ταινία παρέχει μια μεμβράνη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια στη διαδικασία για να καλύψει ορισμένες περιοχές του υποστρώματος από την έκθεση σε χημική ή φυσική εναπόθεση ή χάραξη όπου και εμφανίζεται στη διαδικασία της λιθογραφίας. Δεδομένου ότι η διαδικασία από πάνω προς τα κάτω ξεκινά με ένα "κομμάτι" υλικού και στη συνέχεια προσθέτει ή αφαιρεί άλλα υλικά από αυτό ώστε να δημιουργήσει το επιθυμητό αντικείμενο. Αυτό επιτυγχάνεται σε μικρά μεγέθη της κλίμακας των νανομέτρων, ορίζοντας με ακριβή έλεγχο του σχήματος και του μεγέθους των αντικειμένων που τίθενται σε δημιουργία μοτίβων σε όλη την επιφάνεια του υλικού.

Από την άλλη η φωτολιθογραφία είναι μια τυπική μέθοδος ή ένα οπτικό μέσο μεταφοράς ενός σχεδίου σε ένα υπόστρωμα, όπως για παράδειγμα η τύπωση ενός κυκλώματος (PCB) για την κατασκευή μικροεπεξεργαστών. Όλες οι μέθοδοι φωτολιθογραφίας ακολουθούν αυτήν την αρχή. Πρώτα, το «φωτοανθεκτικό» τοποθετείται στο υπόστρωμα. Στη συνέχεια, το υπόστρωμα εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία τροποποιεί τη μοριακή δομή ακολουθούμενη από αλλαγή στη διαλυτότητα του υλικού [15], ενώ τοποθετεί τη μάσκα του προτύπου, είτε ακόμη με τη χρήση μιας οπτικής μάσκας μέσω μιας προβαλλόμενης εικόνας, είτε απευθείας (χωρίς χρήση μάσκας). Μετά την έκθεση, πραγματοποιείται η χάραξη. Στη συνέχεια, συνήθως υδατικές και διαλύουν περιοχές του «φωτοανθεκτικού» που εκτίθενται στο φως. [1.7.1]

Ένα αποτέλεσμα και τελικό προϊόν, στην εικόνα 1.6. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, μέσα σε -AU packaging (ονομασία σασί του ολοκληρωμένου), το οποίο ο χρήστης έχει φθαρεί εσκεμμένα το περίβλημά του, έτσι ώστε να εκθέσει το ολοκληρωμένο εσωτερικά.



(Εικόνα 1.6) εσωτερικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος, αφού αφαιρεθεί μέρος της συσκευασίας του με χημικό τρόπο [1.8]

Πρώτες επαφές με την επιστήμη της νανοτεχνολογίας:

Η νανοτεχνολογία, όπως πολλές άλλες σύγχρονες επιστημονικές επαναστάσεις ξεκίνησε σχετικά πολύ νωρίς, αλλά τεχνολογικά θεωρείται νέα επιστήμη. Συγκεκριμένα, η πρώτη αναφορά έγινε από τον Richard Feynman, σε μια ομιλία του, το 1959 και είχε τίτλο, «Υπάρχει Πολύς Χώρος στον Πάτο». Ο





Τόκιο Norio Taniguchi ήταν καθηγητής του Πανεπιστημίου Επιστημών και επινόησε τον όρο νανοτεχνολογία το 1974 σε μία διατριβή του, όπου περιγράφει την ακρίβεια κατασκευής υλικών με κλίμακα νανόμετρου (με ανοχές νανόμετρου). (τίτλος διατριβής του: «Σχετικά με τη βασική έννοια της Νανοτεχολογίας»). Η έννοια αυτή της νανοτεχνολογίας ξαναβγήκε στο παρασκήνιο στην δεκαετία του '80, όπου και διευρύνθηκε και ξανά εφευρέθηκε από τον Eric Drexler. Ο οποίος έγραψε βιβλίο «Μηχανές Δημιουργίας: Η επερχόμενη Εποχή της Νανοτεχνολογίας» και εκδόθηκε τη χρονολογία του 1986. [1.9]

**Οπτικές ίνες** είναι λεπτοί πλαστικοί ή γυάλινοι σωλήνες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν ψηφιακά δεδομένα, σε μορφή φωτός. Η διάμετρος των σωλήνων αυτών μπορεί να είναι μικρότερη και από 180 μm, μικρότερη δηλαδή από μια τρίχα. Οι οπτικές ίνες, θα χρησιμοποιηθούν στις πειραματικές διατάξεις, προκειμένου να μεταφερθεί το φως από μία λάμπα, στο δείγμα προς ανάλυση. Ως δείγμα, θα χρησιμοποιηθεί ένα wafer, με διαφορετικό υλικό σε κάθε επίπεδο.

**Φως** είναι η εκπομπή στον χώρο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή κυμάτων **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** [1.11]- που ανιχνεύεται από το ανθρώπινο μάτι και εκλαμβάνεται ως αντίληψη αυτής. Καλύπτει ένα εύρος μηκών κύματος που "μεταφράζονται" από το μάτι στα χρώματα μιας φωτεινής κατανομής ενός πληθυσμού στην ενέργεια -**φάσμα** [1.12]-. [1.13]

**Αντανακλαστικότητα ή αντανάκλαση (reflectance)** μιας επιφάνειας ενός υλικού είναι το αποτέλεσμα στην **ανάκλαση** της ενέργειας ακτινοβολίας. Ορίζεται ως το κλάσμα της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που αντανακλάται στα όρια.

Η **ανάκλαση** είναι η απόκριση της κατάστασης κίνησης των ηλεκτρονίων σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο που δημιουργείται από σταθερούς πυρήνες - ηλεκτρονικής δομής [1.15]του υλικού στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του φωτός, που αναπαριστά συνάρτηση της συχνότητας ή του μήκους κύματος του φωτός, της πόλωσής του και της γωνίας πρόσπτωσης. Η ανάκλαση εξαρτάται από το μήκος κύματος που αλλιώς ονομάζεται φάσμα ανακλαστικότητας ή καμπύλη φασματικής ανάκλασης. [1.14]

Στη περίπτωση της διπλωματικής εργασίας η λειτουργία ανάκλασης δηλαδή το σήμα από τον καθετήρα ανάκλασης συλλέγεται και αναλύεται από το φασματόμετρο ενσωματωμένο στο εργαλείο FR-tool και στη συνέχεια υποβάλλεται σε επεξεργασία από λογισμικό FR-Monitor. Το φάσμα ανάκλασης αντιπροσωπεύει την ανάκλαση φωτός από ένα στερεό δείγμα έναντι μήκους κύματος. Ο ορισμός της ανάκλασης (R (λ)) είναι: **R** (λ) =  $\frac{Is}{Io}$  x 100%, όπου I<sub>o</sub> είναι η ένταση του φωτός αναφοράς και I<sub>s</sub> είναι η ένταση του φωτός που αντανακλάται από το δείγμα ενδιαφέροντος.

Για ακριβείς μετρήσεις των χαρακτηριστικών ανάκλασης που υλοποιείται στο FR-Monitor, είναι ο ακόλουθος αλγόριθμος: **R** (λ) =  $\frac{Isam - Idark}{Iref - Idark} \times 100\%$ , όπου το I<sub>ref</sub>είναι η ένταση του φωτός αναφοράς, δηλαδή η ένταση φωτός της πηγής που χρησιμοποιείται καθώς καταγράφεται από το

φασματόμετρο όταν ανακλάται σε μια λαμπερή επιφάνεια υψηλής ανακλαστικότητας. Το I<sub>sam</sub> είναι η ένταση του φωτός που ανακλάται από το δείγμα, δηλαδή η ένταση του φωτός που καταγράφεται από το φασματόμετρο όταν το φως από την πηγή εμφανίζεται στο δείγμα ενδιαφέροντος. Και τέλος το I<sub>dark</sub> είναι η ένταση του σκοταδιού, δηλαδή η ένταση του φωτός που καταγράφεται από το φασματόμετρο με την πηγή του φωτός απενεργοποιημένη και χωρίς δείγμα. [1.16]

Απορρόφηση (absorbance) ή δεκαδική απορρόφηση είναι ο λογάριθμος της αναλογίας της προσπίπτουσας προς τη μεταδιδόμενη ενέργεια ακτινοβολίας μέσω ενός υλικού. Η απορρόφηση δεν έχει διάσταση και μήκος, καθώς είναι μια αυξανόμενη συνάρτηση του μήκους διαδρομής και πλησιάζει το μηδέν όταν το μήκος διαδρομής πλησιάζει κι αυτό την τιμή του μηδενός. Μέτρο της είναι η εξασθένηση της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας ισχύος και μπορεί να προκληθεί από την απορρόφηση, την ανάκλαση, τη σκέδαση και άλλες φυσικές διαδικασίες. [1.17]

Συγκεκριμένα στον τρόπο απορρόφησης το σήμα που συλλέγεται από μια οπτική ίνα αναλύεται από το φασματόμετρο ενσωματώνεται στο εργαλείο FR-tool και υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία από το λογισμικό FR-Monitor. Το φάσμα απορρόφησης δείχνει την απορρόφηση του φωτός ενός συγκεκριμένου δείγματος έναντι του μήκους κύματος. Το δείγμα που βρίσκεται υπό εξέταση μπορεί να είναι είτε στερεό είτε υγρό. Για την οπτική και μηχανική διαμόρφωση ρυθμίζεται μέσω του εργαλείου FR-tool που είναι ικανό να υποστηρίξει μετρήσεις απορρόφησης. Ο ορισμός της απορρόφησης (A(λ)) είναι:  $A(\lambda) = -log_{10} \left(\frac{ls}{lo}\right)$ , όπου  $l_o$  είναι η ένταση του φωτός αναφοράς και Is είναι η ένταση του φωτός μέσω του δείγματος. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις στα χαρακτηριστικά της απορρόφησης, ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται στο FR-Monitor είναι ο ακόλουθος:  $A(\lambda) = -log_{10} \left( \frac{Isam - Idark}{Iref - Idark} \right),$ όπου το I<sub>ref</sub> είναι η ένταση του φωτός αναφοράς, δηλαδή η ένταση του φωτός της πηγής που χρησιμοποιείται καθώς καταγράφεται από το φασματόμετρο χωρίς να περάσει από το δείγμα ενδιαφέροντος. Το Isam είναι η ένταση του φωτός μέσω του δείγματος, δηλαδή η ένταση του φωτός που καταγράφεται από το φασματόμετρο όταν το φως από την πηγή του φωτός περνά μέσα από το δείγμα ενδιαφέροντος. Και τέλος το Idark είναι η ένταση του σκοταδιού, δηλαδή η ένταση του φωτός που καταγράφεται από το φασματόμετρο με το φως της πηγή του φωτός απενεργοποιημένη ή μπλοκαρισμένη και χωρίς δείγμα. [1.16]

**Μετάδοση** (transmittance) μιας επιφάνειας ενός υλικού είναι το αποτέλεσμα της ακτινοβολημένης ενέργειας και ορίζεται ως το κλάσμα της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που μεταδίδεται μέσω ενός δείγματος. Ο συντελεστής μετάδοσης είναι ο λόγος του μεταδιδόμενου προς το προσπίπτοντα ηλεκτρικό πεδίο. [1.18]

Με τον τρόπο της μετάδοσης το σήμα που συλλέγεται από μια οπτική ίνα αναλύεται από το φασματόμετρο που έχει ενσωματωθεί στο εργαλείο FR-tool και υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία από το λογισμικό FR-Monitor. Το φάσμα της μετάδοσης δείχνει τη μετάδοση του φωτός (%) ενός συγκεκριμένου δείγματος έναντι του μήκος κύματος. Το δείγμα μπορεί να είναι είτε φιλμ είτε υγρό. Μέσω του εργαλείου FR-tool μπορούν να ληφθούν κατάλληλες οπτικές και μηχανικές διαμορφώσεις των μετρήσεων της απορρόφησης. Ο ορισμός της μετάδοσης (Τ (λ)) είναι: **T** (λ) =  $\frac{Is(\lambda)}{Io(\lambda)}$  x 100%, όπου  $I_{o(\lambda)}$  είναι η ένταση του φωτός αναφοράς και  $I_{s(\lambda)}$  είναι η ένταση του φωτός μέσω του δείγματος. Επομένως για να υπάρξουν ακριβείς μετρήσεις των χαρακτηριστικών μετάδοσης, υλοποιείται στο FR-Monitor ο αλγόριθμος όπου και είναι: **T** (λ) =

 $\frac{Is(\lambda) - Id(\lambda)}{Io(\lambda) - Id(\lambda)} \times 100\%$ , όπου  $I_{o(\lambda)}$  είναι η ένταση του φωτός αναφοράς, δηλαδή η ένταση φωτός της πηγής του φωτός που χρησιμοποιείται καθώς καταγράφεται από το φασματόμετρο χωρίς να περάσει από το δείγμα ενδιαφέροντος. Το  $I_{s(\lambda)}$  είναι η ένταση του φωτός μέσω του δείγματος, δηλαδή η ένταση του φωτός που καταγράφεται από το φασματόμετρο όταν το φως από την πηγή του φωτός διέρχεται από το δείγμα ενδιαφέροντος. Και τέλος το  $I_{d(\lambda)}$  είναι η ένταση του σκοταδιού, δηλαδή η ένταση φωτός που καταγράφεται από το φασματόμετρο με την πηγή του φωτός απενεργοποιημένη ή μπλοκαρισμένη και χωρίς το δείγμα. [1.16]

# Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στην εργαστηριακή προσέγγιση

Στη παρούσα εργασία, γίνεται χρήση ενός δομοστοιχειωτού και επεκτάσιμου οργάνου μέτρησης πάχους ονόματι FR-Basic, - το οποίο θα αναφέρεται και ως 'όργανο μέτρησης' ή 'εργαλείο' - κατάλληλα σχεδιασμένο για τη μέτρηση νανοϋλικών. Το FR-Basic, το οποίο αποτελεί το υλικό/hardware μέρος της διάταξης των μετρήσεων, αποτελείται από μία πηγή φωτός, η οποία θα αναφέρεται και ως 'λάμπα'. Αυτή η λάμπα βρίσκεται εσωτερικά του Fr-Basic και κατά τη λειτουργία του οργάνου μέτρησης εκπέμπει φως με μήκη κύματος από 350 έως 1000nm, συνεχόμενα και ταυτόχρονα. Πρόκειται για μήκη κύματος τα οποία συγκαταλέγονται (με βάση το μήκος κύματός τους) στο φάσμα των VIS-NIR, δηλαδή στο εύρος των Visible και Near Infrared μηκών φωτός.



Εικόνα 2.1 [2.1.1]

Μέσω οπτικής ίνας, το φως αυτό, οδηγείται και προσπίπτει στο δείγμα, του οποίου το πάχος επιθυμεί ο χρήστης να μετρήσει. Το δείγμα βρίσκεται εξωτερικά του FR-Basic, τοποθετημένο σε μια ειδική βάση.



Εξεταστής Λέιζερ (Laser probe)

Λεπτό υμένιο/ wafer, χωρισμένο σε 4 περιοχές προς ανάλυση

(Εικόνα 2.2) Ο εξεταστής λέιζερ βρίσκεται πάνω από τη περιοχή Α (πρώτο region, κάτω δεξιά του wafer), το οποίο αποτελείται από στρώση Si, τέλεια αντανακλαστική. Σε αυτό το σημείο, μετράται το Reference spectrum, το οποίο θα εξηγηθεί αργότερα. [2.1.2]



Ελαφρά θωρακισμένη οπτική ίνα, μεταφέρει το φως από τη λάμπα στον εξεταστή λέιζερ και ύστερα στο δείγμα προς ανάλυση

Εξεταστής λέιζερ

Τέλεια μαύρη επιφάνεια

(Εικόνα 2.3) Ο εξεταστής βρίσκεται πάνω από ειδικό μαύρο ύφασμα, από τον κατασκευαστή του εργαλείου, το οποίο απορροφάει όλο το προσπίπτων σε αυτό φως και χρησιμοποιείται για να μετρηθεί το Dark spectrum, το οποίο θα εξηγηθεί αργότερα. [2.1.3]



(Εικόνα 2.4) δίνονται στο εγχειρίδιο του δείγματος από τον κατασκευαστή, με την ονομασία των περιοχών. Είναι τα επίπεδα των υλικών που έχει η κάθε περιοχή (από κάτω προς τα πάνω) [2.1.4]

Η μεθοδολογία μέτρησης με τη τεχνική VIS-NIR, ορίζει ότι κάθε υλικό, ανάλογα τη δομή και το πάχος του συμπεριφέρεται διαφορετικά σε επίπεδο αντανάκλασης, μετάδοσης και απορρόφησης για κάθε μήκος κύματος του φωτός που προσπίπτει σε αυτό. Προκειμένου να εκμεταλλευτεί τις ιδιότητες αυτές, το FR-Basic χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς τρόπους στη μέτρηση του πάχους, την **αντανάκλαση** την **απορρόφηση** και την **μετάδοση**.

Στην διάταξη μέτρησης του πάχους με τη μέθοδο της μετάδοσης, το FR-Basic διαθέτει γύρω από τον εκπομπό λέιζερ, οπτικές ίνες, (Εικόνα 2.5) έτοιμες να περιλάβουν το ανακλώμενο φως και να το οδηγήσουν σε έναν φασματογράφο (spectrometer), ο οποίος βρίσκεται εσωτερικά του FR-Basic, για να εξάγει σε κάθε μέτρηση, για κάθε μήκος κύματος, το μήκος κύματος [nm], τη ένταση του φωτός Intensity [au] που δέχεται μέσω αυτών των οπτικών ινών.



(Εικόνα 2.5) μία προσομοίωση της λειτουργίας του FR-Basic σε λειτουργία αντανάκλασης, επικεντρώνοντας στον εξεταστή [2.1.5]

Προκειμένου να μετρηθεί το πάχος με τη μέθοδο της απορρόφησης και της μετάδοσης, χρησιμοποιείται μία διαφορετική πειραματική διάταξη. Στην Εικόνα 2.6 επιδεικνύεται η διάταξη, με τη χρήση μιας κυψελίδας γεμάτης υγρό, αντί ενός δείγματος wafer. Εδώ, οι οπτικές ίνες είναι στοιχισμένες έτσι ώστε να είναι ακριβώς στην ευθεία και απέναντι, με σκοπό το φως που εκπέμπεται από την μία οπτική ίνα, αφού διαπεράσει το -προς μελέτη- δείγμα, να ληφθεί από την άλλη οπτική ίνα και να οδηγηθεί στον φασματογράφο.



(Εικόνα 2.6) Διάταξη για την μέτρηση πάχους με τις μεθόδους απορρόφησης ή μετάδοσης [2.1.6]

Η μετρούμενη ένταση ύστερα, ανεξάρτητα την μέθοδο λήψης της, ακολουθεί την ίδια διαδικασία επεξεργασίας. Μέσω usb serial επικοινωνία μεταφέρεται στον υπολογιστή, και χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα FR-Monitor για να απεικονιστεί σε μία γραφική f(intensity)= wavelength. Η συνάρτηση αυτή στο πρόγραμμα δείχνει την ένταση της φωτεινότητας ανάλογα με το -και για κάθε- μήκος κύματος που δέχονται οι οπτικές ίνες από το λήπτη έντασης φωτός (εξεταστή).



(Εικόνα 2.7) Προβολή 'Fit view'. Με μαύρο, φαίνονται τα δεδομένα από το Real time view, σε κατάλληλη μορφή, για να ταιριάξει με το κόκκινο (βιβλιοθήκη του λογισμικού) για να βρεθεί το πάχος [2.1.7]



(Εικόνα 2.8) Με μαύρο, όπως φαίνεται στη γραφική (spectrum). Screen shot από λογισμικό: FRmetrisis, στο οποίο αυτή η προβολή ονομάζεται 'Real Time'. [2.1.8]

Σύμφωνα με τη θεωρία, για κάθε δείγμα, και για κάθε πάχος των υλικών που το απαρτίζουν, αλλάζει η καμπύλη της γραφικής. Τέλος, για τον υπολογισμό του πάχους του δείγματος, χρησιμοποιείται η μέθοδος της σύγκρισης, αυτόματα από το πρόγραμμα μέσω των κατάλληλων συναρτήσεών του. Κωδικοποιεί τη καμπύλη της γραφικής παράστασης, έτσι ώστε να έρθει σε μία μορφή πιο προσιτή, διακριτή και εύκολη να γίνουν υπολογισμοί σύγκρισης. Ύστερα, χρησιμοποιεί τις πρότυπες/ καθιερωμένες μετρήσεις που διαθέτει αποθηκευμένα στη βιβλιοθήκη του το πρόγραμμα (ξεχωριστές για κάθε δείγμα), και συγκρίνει τη μέτρηση που πάρθηκε από το δείγμα, με τις πρότυπες αποθηκευμένες μετρήσεις την απορροφητικότητα, τη μεταδοτικότητα και τη αντανακλαστικότητα σε κάθε υλικό, για μία μεγάλη γκάμα υλικών.

## Κεφάλαιο 3: Περίληψη διάταξης πειράματος & λογισμικού

Το πείραμα επικεντρώνονται στην μέτρηση του πάχους των δειγμάτων. Παρόλα αυτά, επιπλέον μελέτες γίνονται όπως η χρήση κανονικής κατανομής στις μετρήσεις για να υπάρχει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα της εγκυρότητας των μετρήσεων. Τέλος, θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα που εξάγονται από το λογισμικό του FR-monitor και θα χρησιμοποιηθούν για να βρεθεί το ενεργειακό χάσμα (Band gap) των υλικών που εξετάζονται.

Όλα τα πειράματα και οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε ένα εργαστήριο, με τη χρήση λαμπών φθορισμού και όσο το δυνατό καλύτερη απομόνωση από το φως του ήλιου, δηλαδή με κλειστές τις κουρτίνες και διεξαγωγή μετρήσεων απογευματινές ώρες προκειμένου να αποφευχθούν οι θόρυβοι περιβάλλοντος. Σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης βρίσκεται σε περιβάλλον όπου ο φωτισμός αλλάζει συχνά, απαιτούνται νέες μετρήσεις των φασμάτων αναφοράς και σκοτεινού φάσματος.



(Εικόνα 3.1) FR-Basic, της εταιρείας ThetaMetrisis. Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η νεότερη έκδοσή του, η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο. Η διαφορά με τη δική μας έκδοση είναι η σταθερότητα της βάσης του εξεταστή κυρίως. [3.1]

Το ειδικό εργαλείο το οποίο επιτρέπει τις μετρήσεις με τις μεθόδους απορρόφησης και μετάδοσης (Εικόνα 2.6) δεν ήταν διαθέσιμο. Ως αποτέλεσμα, όλες οι μετρήσεις επιτεύχθηκαν με τη μέθοδο της αντανάκλασης. Οι ίδιες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν στο τελευταίο κεφάλαιο για την εύρεση του Band gap.

Το δείγμα συνοδευόταν μαζί με το FR-Basic κατά τη παραλαβή του από την εταιρεία, μαζί με μία σελίδα η οποία περιγράφει τις περιοχές του wafer και το υλικό που έχει εναποτεθεί σε κάθε επίπεδο, μαζί με το πάχος τους (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2 [3.2]

## 3.1 Περιγραφή δειγμάτων

#### Si: Silicon – Πυρίτιο

Το πυρίτιο είναι ένα χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 14 στο περιοδικό πίνακα. Είναι σκληρό και εύθραυστο κρυσταλλικό στερεό με μία μπλε- γκρι κρυσταλλική λάμψη, καθώς και ημιαγωγός. [3.1.2] Στα κοινά ολοκληρωμένα κυκλώματα, το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (monocrystalline silicon) χρησιμοποιείται ως μηχανική υποστήριξη (βάση) για τα κυκλώματα που δημιουργούνται με τεχνικές όπως doping, και μονώνοντας τα μεταξύ τους (τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται πάνω στη βάση) με χρήση λεπτών στρωμάτων silicon oxide (οξείδιο του πυριτίου), έναν μονωτή εύκολος στη παραγωγή πάνω σε επιφάνειες πυριτίου με διαδικασίες θερμικής οξείδωσης ή τοπικής οξείδωσης. Το πυρίτιο έχει γίνει το πιο γνωστό μέταλλο για ημιαγωγούς υψηλών τάσεων και ολοκληρωμένα κυκλώματα λόγω της αντοχής του στις υψηλές θερμοκρασίες και τις υψηλές ηλεκτρικές δραστηριότητες χωρίς να υποφέρει από το φαινόμενο του avalanche breakdown (φαινόμενο χιονοστιβάδας), το οποίο φαινόμενο επιτρέπει περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια να διαπεράσουν τη μόνωση του υλικού -πυριτίου-, αφήνοντας έτσι περισσότερο ρεύμα να περάσει, δημιουργώντας περισσότερη θερμότητα. Επίσης, το πυρίτιο δεν είναι διαλυτό στο νερό\* χαρακτηριστικό που του προσδίδει αβαντάζ έναντι του γερμανίου (χημικό στοιχείο παρόμοιων ιδιοτήτων). [3.1.3] Εδώ, σημειώνεται πως προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το πυρίτιο σαν βάση σε wafers, πρέπει να περάσει ένα είδος επεξεργασίας, τη λεγόμενη Czochralski process, μέσω της οποίας καταλήγει το κρυσταλλικό του πλέγμα να είναι συνεχές, αδιάσπαστο στις άκρες του και δίχως grain boundaries. [3.1.4]

#### SiO<sub>2</sub>: Silicon dioxide - διοξείδιο του πυριτίου

Το διοξείδιο του πυριτίου ανήκει στις ενώσεις των οξειδίων του πυριτίου. [3.1.5][3.1.6] Το SiO<sub>2</sub> είναι μονωτής και χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό στη μικροηλεκτρονική. Για να παραχθεί, χρησιμοποιούνται ειδικές τεχνικές όπως ξηρή ή υγρή οξείδωση με O<sub>2</sub>, αν και επικρατούσα τεχνολογία είναι η θερμική οξείδωση λόγω της αποτελεσματικότητάς της στα gate oxides (Figure 7). Προφανώς, αναφέρθηκε ότι το SiO<sub>2</sub> είναι μονωτής, αλλά χρησιμοποιείται σαν gate oxide, όπου χρειάζεται μία ένωση η οποία να δρα σαν ημιαγωγός. Έτσι, εδώ αξίζει να τονισθεί το γεγονός του ότι το SiO<sub>2</sub> σε κλίμακα νανομέτρων, δρα σαν ημιαγωγός. Φυσικά, όταν μιλάει κανείς για ημιαγωγούς πρέπει να προσδιορίσει την **διηλεκτρική σταθερά (ή Relative permittivity)** του υλικού, όπου για το SiO<sub>2</sub> είναι 3.9, σε θερμοκρασία δωματίου. [3.1.7]



Εικόνα 3.3 -FET transistor- [3.3]

#### Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: Silicon nitride – Νιτρίδιο του πυριτίου

Αποτελεί τη πιο θερμοδυναμική σταθερή ένωση των silicon nitrides. [3.1.8] Δηλαδή δεν καταναλώνει, ούτε απελευθερώνει θερμότητα στο περιβάλλον. [3.1.9] Είναι ένα λευκό-γκρίζο στερεό με υψηλό σημείο τήξης και σκληρότητας 8.5 στη κλίμακα Mohs. [3.1.10] Στην ηλεκτρονική, χρησιμοποιείται συχνά ως μονωτής, ως chemical barrier (barrier layer) δηλαδή μονωτής ανάμεσα στα interconnections ενός ολοκληρωμένου chip ή, γενικά, μονωτής ανάμεσα σε traces σε κλίμακα vανομέτρων, προκειμένου να αποτραπεί το diffusion [3.1.11] μεταξύ των αγώγιμων υλικών που μονώνονται. Μεταξύ άλλων, χρησιμοποιείται και ως διηλεκτρικό ανάμεσα σε στρώματα polysilicon στους πυκνωτές στα αναλογικά κυκλώματα. [3.1.12]

#### Poly-si: Polycrystalline silicon - Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Το Poly-si επίσης ονομάζεται και polysilicon, είναι ένα υψηλής καθαρότητας, **κρυσταλλικής** μορφής πυριτίου, το οποίο χρησιμοποιείται ως 'ωμό' υλικό για τους ηλιακούς συλλέκτες. [3.1.13] Αποτελείται από μικρούς κρυστάλλους, γνωστοί και ως κρυσταλλίτες, οι οποίοι δίνουν στο υλικό το τυπικό 'metal flake effect (βλ. εικόνες 3.4, 3.5, 3.6). Αν και πολλές φορές οι όροι polysilicon και multisilicon χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα, η multicrystalline (a) συνήθως αναφέρεται σε κρυστάλλους μεγαλύτερους από 1mm, ενώ το polycrystalline (b) το αντίθετο. Οι (a) αποτελούν τον πιο κοινό τύπο ηλιακών συλλεκτών στην εκτενώς αυξανόμενη αγορά των φωτοβολταϊκών και καταναλώνουν το περισσότερο από το παγκόσμιο παραγόμενο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. [3.1.14]



(Εικόνα 3.4) Σχηματική αναπαράσταση πολυκρυσταλλικού υλικού, αποτελούμενο από κρυσταλλίτες, με διαφορετικό προσανατολισμό. [3.4]



(Εικόνα 3.5) Μικρογραφία πολυκρυσταλλικού μετάλλου. Όρια κόκκων', απόδειξη χρήσης τεχνικής acid etching. [3.5]



(Εικόνα 3.6) Σύγκριση πολυκρυσταλλικό (αριστερά) με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (δεξιά) - ηλιακοί συλλέκτες. [3.6]

## Κεφάλαιο 4: Περιγραφή διαδικασίας μέτρησης

## 4.1: Προετοιμασία μέτρησης πάχους

Κατά την εγκατάσταση, για τη πρώτη χρήση του λογισμικού FR-Monitor, συστήνεται πρωτίστως η σύνδεση του FR-Basic με τον υπολογιστή και ύστερα η εκκίνηση του προγράμματος (λογισμικού) FR-Monitor.

Για να αρχικοποιηθεί το FR-Basic κατάλληλα έτσι ώστε να μετρηθεί σωστά το πάχος των υμενίων, εκπληρώνονται οι δύο παρακάτω αρχικές απαιτήσεις οι οποίες συνιστούν τη μέτρηση των δύο φασματικών περιοχών. Για βέλτιστα αποτελέσματα, κατά τη διάρκεια μετρήσεως των spectra regions, η απόσταση του εξεταστή λέιζερ και του δείγματος θα πρέπει να είναι ίδια κατά τη διάρκεια λήψης των μετρήσεων:

- Μέτρηση του σκοτεινού φάσματος (Dark spectra) και χρήση της μέτρησης ως αναφορά για τη βαθμονόμηση των επόμενων μετρήσεων (για τη μέτρηση του πάχους δηλαδή).
- 2) Μέτρηση της έντασης της φωτεινότητας που εκπέμπεται από τη πηγή φωτός. (εξεταστή λέιζερ).

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η μέτρηση του σκοτεινού φάσματος, χρησιμοποιείται ένα ειδικό κομμάτι υλικού, σε μορφή 'υφάσματος', το οποίο παρέχει ο κατασκευαστής του FR-Basic και τοποθετείται κάτω από του αυσθατόρα αυταγάκλασης (reflection probe) του FR-Basic, εγώ

από τον αισθητήρα αντανάκλασης (reflection probe) του FR-Basic, ενώ



Εικόνα 4.1 [4]

η εσωτερική του λάμπα είναι σβηστή. Ύστερα, μέσω του λογισμικού χρησιμοποιείται το κουμπί DS (γραμμή εργαλείων) και η μέτρηση του σκοτεινού φάσματος γίνεται αυτόματα.



Ομοίως, για τη μέτρηση της μέγιστης έντασης της φωτεινότητας, (reference spectra), χρησιμοποιείται το πυρίτιο ως τέλεια αντανακλαστική επιφάνεια, παρεχόμενο από τον κατασκευαστή, το οποίο τοποθετείται κάτω από το εξεταστή. Με τη διαφορά από το

σκοτεινό φάσμα, ότι πλέον χρειάζεται να ενεργοποιηθεί η εσωτερική λάμπα για τουλάχιστον 10 λεπτά πριν ληφθεί η μέτρηση επιτυχώς. Για να παρθεί η μέτρηση, χρησιμοποιείται η λειτουργία RS, πατώντας το κουμπί RS στη μπάρα εργαλείων.

## 4.2: Περιγραφή του wafer πριν τη μέτρηση

Μετά την επιτυχή μέτρηση των δύο αρχικών φασμάτων και η χρήση τους για τις επόμενες μετρήσεις, μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε για να μειώσουμε το θόρυβο των μετρήσεων του υμενίου. Στα επόμενα βήματα θα περιγραφεί η διαδικασία μέτρησης του πάχους του δείγματος του διοξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub> therm). Η διαδικασία μέτρησης πάχους θα είναι ίδια για όλα τα δείγματα (για όλους τους τύπους των δειγμάτων), εκτός και αν αναφερθεί διαφορετικά σε κάποια βήματα.

### Layer stack

Θεωρούμε γνωστά (και επιλέγουμε) το υλικό στο οποίο θα διεξάγουμε τη μέτρηση από τη μπάρα εργαλείων, στη καρτέλα Layer Stack.

	Toolbox													
ſ	Layer Stack Viewport   Wavelengths - Integral   Log													
	⊢Lā	vers-												
	#	Type	Category		Material	Est.	Thick. (nm)	Min, Thick, (nm)	Max. Thick. (nm)	# Steps	Fit R.I.	Refractive Index	Edit R.I.	Reset R.I.
	1	G 💌	Misc	•	Air		Infinite	Infinite	Infinite	0	Г o	Raw Data 💌		
	2	G 💌	Dielectrics	•	SiO2 (therm)	<b>v</b>	500	0	1000	10	<u>г</u> о	Raw Data 💌		
	3	G 💌	Semiconductors	•	Si		Infinite	Infinite	Infinite	0	<b>□</b> 0	Raw Data 💌		



Το layer (#1) δείχνει τι βρίσκεται ανάμεσα στο reflecting probe και το δείγμα, όπου συνήθως (και στη περίπτωση του πειράματος), ο αέρας. Το δεύτερο layer (#2) είναι το δείγμα (wafer) το οποίο και επιθυμεί ο χρήστης να υπολογίσει. Το τρίτο layer (#3), δείχνει τι βρίσκεται στη βάση του wafer, δηλαδή το υλικό που χρησιμοποιήθηκε σαν βάση (substrate) για να τοποθετηθεί αργότερα το SiO<sub>2</sub>.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διαφορετικό wafer, ίσως τα προκαθορισμένα στρώματα είναι λίγα, πολλά ή και σε διαφορετική σειρά. Νέα επίπεδα μπορούν να προστεθούν, ή να διαγραφούν ήδη υπάρχοντα επίπεδα, με τις εύκολες και παρεχόμενες εκτελέσιμες συναρτήσεις (Up, Down, Delete Layer, Add Layer), πατώντας τα αντίστοιχα κουμπιά στα δεξιά του λογισμικού, αφού πρώτα επιλεχθεί το στρώμα (πατώντας το αντίστοιχο #) που επιθυμεί ο χρήστης να πραγματοποιήσει αλλαγές.

La	yer S	Stack	Viewport   Wav	eleng	gths - Integral	Log													
	Lay	ers																	
	#	Type	Category		Material		Est. Thick	. (	Min. Thick. (	Max. Thick. (	# Ste	Fit R	Refractive I	Edit	Reset	^		Add Layer	
	1	G 🔳	Misc	•	Air	•	Infin	te	Infinite	Infinite	0	0	Raw Data 💌				Up		Load Stack
	2	G 🗖	Dielectrics	•	SiO2 (therm)	•	500		0	1000	10	🗌 о	Raw Data 💌			Down	Down Layer	Delete Layer	Save
	3	G 🔳	Semiconduct	•	Si	•	🗌 Infin	te	Infinite	Infinite	0	0 🗌	Raw Data 💌					Duplicate	Stack
																~		Layer	

Εικόνα 4.4 [4]

### Εκτιμήσεις

Αφού τοποθετηθούν τα επίπεδα και επιλεγεί το σωστό υλικό του κάθε ένα από αυτά (από τη λίστα Category και την υποκατηγορία Materials), χρησιμοποιείται προσεγγιστικά ένα μέγεθος (Estimated Thickness σε nm) από τον χρήστη το οποίο αφορά το δείγμα (Wafer) που μελετάται, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η ακρίβεια του FR-Basic. Η αρχική εκτιμώμενη τιμή προφανώς δεν θα είναι η σωστή ή και μπορεί να αποκλείει κατά πολύ, με αποτέλεσμα να υπάρξει μεγαλύτερη απόκλιση από ότι θα υπήρχε εάν χρησιμοποιούνταν η σωστή τιμή του πάχους του wafer.

Σκοπός είναι, μετά από κάθε 'ανακριβής' μέτρηση, με ένα estimated thickness, στην επόμενη μέτρηση του ίδιου δείγματος, με την ίδια κατάταξη, να χρησιμοποιήσουμε μια πιο ακριβής εκτιμώμενη τιμή του πάχους. Έτσι, επαναλαμβάνοντας τις μετρήσεις αρκετές φορές, θα προσεγγίζεται όλο και περισσότερο η ακριβής τιμή του πάχους του δείγματος.

Με τα παραπάνω βήματα, χρησιμοποιούνται και οι μεταβλητές: Minimum Thickness (nm) και Maximum Thickness (nm), κατά προσέγγιση. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά ανάμεσα στα Min. Thick και Max. Thick, τόσα περισσότερα και τα βήματα (steps) του FR\_Basic θα διεξάγονται. Όσα περισσότερα βήματα χρησιμοποιούνται, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια της μέτρησης του πάχους, αλλά αυξάνεται και ο χρόνος επεξεργασίας. Οι προκαθορισμένες τιμές βημάτων είναι 10 βήματα ανά (Maximum Thickness - Min. Thick.) = 1000 [nm].

## 4.3: Μέτρηση του πάχους του δείγματος

Τοποθετείται το δείγμα κάτω από τον εξεταστή. Η εσωτερική λάμπα, απαιτεί να είναι αναμμένη για 10 λεπτά προτού παρθούν οι μετρήσεις. Επιλέγουμε από τη μπάρα εργαλείων, την επιλογή Real-time view. Εδώ, βλέπουμε ζωντανά τις μετρήσεις που λαμβάνονται από το FR-Basic, σε μαύρο χρώμα. Το μαύρο φάσμα φαίνεται

Real-time view Switch to Real-time view

Εικόνα 4.5 [4]

σε μπλε και η ένταση της φωτεινότητας, προερχόμενη από τα δεδομένα που λαμβάνει ο εξεταστής λέιζερ, με πορτοκαλί. Αφού περάσουν 10 λεπτά από την έναυση της λάμπας και ενώ το δείγμα είναι κάτω από τον αισθητήρα αντανάκλασης, η μαύρη συνάρτηση/καμπύλη θα πρέπει να είναι κατά το μεγαλύτερό της μέρος ανάμεσα στο 20.000 και 65.0000 Intensity (au) στη γραφική, στην οθόνη που εμφανίζει το real-time view, ενώ το μήκος κύματος (οριζόντιος άξονας) επιλέγεται αυτόματα. Είναι επίσης σημαντικό η μαύρη καμπύλη να μην ξεπερνάει το φάσμα αναφοράς σε ύψος, διότι αυτό είναι η μέγιστη φωτεινότητα που περιμένει να λάβει το λογισμικό. Προκειμένου να αλλάξουμε τη μαύρη καμπύλη που φαίνεται στο Real-time view για να είναι πιο κοντά στο εύρος 20.000-65.000 [au], τότε αρκεί να κινηθεί ο εξεταστής πιο ψηλά ή πιο χαμηλά (πιο κοντά) στο δείγμα. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι η έξοδος που δίνει το ολοκληρωμένο κύκλωμα του FR-basic, είναι 16bit, δηλαδή μπορεί να εξάγει τα αποτελέσματα σε 2<sup>16</sup> =65.536 τιμές, περιορίζοντας τα δεκαδικά, ή το εύρος διαθέσιμης φωτεινότητας.

Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται η κατανομή της καμπύλης στο επιθυμητό εύρος (20.000-

On-line Data Acquis	sition	
Integration Time:	10	msec

65.000), υπάρχει δυνατότητα μείωσης ή αύξησης του ύψους της καμπύλης. Με περιήγηση στο Edit/Configuration και με τη αλλαγή της μεταβλητής Integration Time, όσο

Εικόνα 4.6 [4]

μεγαλύτερη η τιμή της μεταβλητής, τόσο αυξάνεται το ύψος της μαύρης καμπύλης.

### Σημειώσεις κατά τη μέτρηση

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρήστης του FR-Basic, κατά τη τοποθέτηση του δείγματος κάτω από τον αισθητήρα αντανάκλασης (reflection probe), επιβεβαιώνει οπτικά, ότι η δέσμη λέιζερ (μια μικρή τελεία πάνω στο δείγμα), προσπίπτει πάνω στο σημείο που επιθυμεί ο χρήστης να ληφθεί η μέτρηση καθώς και ότι εκείνο το σημείο είναι όσο το δυνατό καθαρό από σκόνη ή άλλα μικρά σωματίδια τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα μέτρησης.

Οι διαδοχικές μετρήσεις δεν συνδέονται με κανένα τρόπο μεταξύ τους. Ο χρήστης καθορίζει ποιες τιμές είναι έμπιστες και θα χρησιμοποιηθούν στην επόμενη μέτρηση του δείγματος για να βελτιστοποιηθεί η ακρίβεια και το αποτέλεσμα του πάχους.

Επίσης χρήζει σημαντικότητας η γωνία που θα προσπίπτει η δέσμη λέιζερ πάνω στο δείγμα, καθώς η μέτρηση γίνεται πιο ακριβής εάν η γωνία πρόσπτωσης είναι κάθετη στο υμένιο. Τέλος, για το βέλτιστο αποτέλεσμα μετρήσεων καθώς και την καλύτερη μέθοδο αποφυγής θορύβων, συνιστά οι μετρήσεις να διεξαχθούν σε σκοτεινό περιβάλλον/χώρο, τόσο σε ένταση φωτεινότητας ορατού φωτός όσο και σε φως το οποίο δεν μπορεί να διακρίνει το γυμνό μάτι (πχ υπέρυθρο φως). Αυτή η διαφορά μπορεί να φανεί πειραματικά, κατά τη προετοιμασία της μέτρησης, κατά τη διαδικασία δηλαδή μέτρησης του μαύρου και φάσματος αναφοράς, όπου στα δεδομένα τους, οι καμπύλες θα είναι πιο ήπιες -θα έχουν μικρότερες τελικές τιμές-.

## Κεφάλαιο 5: Μέτρηση πάχους δειγμάτων

Όλες οι μετρήσεις των διαφόρων υλικών πάνω στο δείγμα, εκτελέστηκαν με βάση τις οδηγίες του κεφαλαίου 3.

- Στη στήλη Layer, φαίνεται το στρώμα στο οποίο μετράται το πάχος.
- Στη στήλη Min. Thick. φαίνεται η ελάχιστη τιμή πάχους που έχει θέσει ο χρήστης. Αυτό, είναι το πάχος που θα ξεκινήσει να μετράει το FR-Basic, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης της μέτρησης. Υπενθυμίζεται ότι σαν χρήστες, γνωρίζουμε ήδη την επιθυμητή τιμή του πάχους του υλικού που μετράμε.
- Στη στήλη Est. Thick. φαίνεται η επιθυμητή τιμή πάχους -η τιμή πάχους που ο χρήστης σκόπιμα κατασκεύασε το wafer-.
- Στη στήλη **Max. Thick**. φαίνεται η μέγιστη τιμή πάχους -προς αναζήτηση από το FR-Basicπου έχει θέσει ο χρήστης. Το Max. Thick. Και το Min. Thick. θα αναφέρονται ως 'όρια'.
- Στη στήλη Meas. Thick. φαίνεται η Measured Thickness, η τιμή πάχους που μετρήθηκε τελικά από το FR-Basic.
- Στις στήλες x,y φαίνεται το σημείο πάνω στο wafer στο οποίο έγινε η μέτρηση.
   Χρησιμοποιήθηκε χάρακας για τη μέτρηση αυτών των τιμών, οπότε αναμένεται απόκλιση τουλάχιστον 0.5mm. Ο λόγος σημείωσης των σημείων έγινε προκειμένου να μην γίνονται επανειλημμένες μετρήσεις στο ίδιο σημείο αλλά και με σκοπό να σημειώνεται η περίσταση όπου δύο ή περισσότερες μετρήσεις έγιναν στο ίδιο σημείο. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται κάτω αριστερά του wafer.
- Στη στήλη steps, φαίνονται βήματα. Όσα περισσότερα βήματα χρησιμοποιούνται για κάθε μέτρηση, τόσο καλύτερο θα είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης. Στο εγχειρίδιο που δόθηκε μαζί με το FR-Basic, αναφέρει ότι 10 βήματα ανά (Max.Thick Min.Thick. = 1000) είναι αρκετά.
- Τα μέγιστα και ελάχιστα πάχη σε κάθε πίνακα είναι υπογραμμισμένα.
- Το πάχος κάθε επίπεδο, σε κάθε περιοχή όπου μετρήθηκε από τη ThetaMetrisis (τους κατασκευαστές), δίνεται στο τέλος κάθε πίνακα, ως υπενθύμιση και αναφέρονται ως "Δεδομένο \$Είδος\_layer [nm]".
- Κάποιες αναλύσεις έγιναν πάνω στο ίδιο σημείο (x,y) του wafer, με διαφορετικές ρυθμίσεις του FR-Basic, και είναι υπογραμμισμένες για να ξεχωρίζουν.

Παράλληλα με τα αποτελέσματα μετρήσεων παραδίδονται οι καμπύλες κανονικής κατανομής για κάθε δείγμα ξεχωριστά, προκειμένου να υπάρχει ένα μέτρο σύγκρισης και βαθμονόμησης των τιμών σε σχέση με τη μέση τιμή. Έτσι, αποφεύγονται αυθαίρετοι και ανακριβής όροι όπως «μεγάλη ή μικρή απόκλιση» ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν -οι όροι- με ασφάλεια για να εκφράσουν την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων στο πλαίσιο της εργαστηριακής μελέτης και να εκφράσουν την ικανοποίηση του ερευνητή με το αποτέλεσμα, μιας και που δεν υπάρχουν περιορισμοί στην ακρίβεια (όπως θα γινόταν σε μία παραγωγική/ βιομηχανική μονάδα).

Οι γραφικές κανονικής κατανομής προγραμματίστηκαν με τη χρήση γλώσσας προγραμματισμού python 3, τη βιβλιοθήκη matplotlib σε περιβάλλον Unix και είναι διαθέσιμα στο github. [5]

## 5.1: Μετρήσεις

Ακολουθούν οι μετρήσεις με σειρά εκτέλεσης. Να σημειωθεί ότι η βέλτιστη προσέγγιση του πάχους ήταν γνωστή κατά τη διεκπεραίωση των μετρήσεων, από το εγχειρίδιο του δείγματος κατά τη λήψη του από την εταιρία.

Η απόσταση του reflection probe από το wafer δεν μετρήθηκε καθώς δεν υπήρχαν τα αντίστοιχα εργαλεία για την μέτρησή της. Οι αποστάσεις ήταν σε κάθε περίπτωση μικρότερες των 5 εκατοστών, και όσο το δυνατότερο κοντά στο wafer. Η εταιρία ThetaMetrisis δεν προσέθεσε μηχανισμό για τον υπολογισμό ή τον ακριβή καθορισμό του ύψους, αλλά αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να προστεθεί εάν ζητηθεί από τον πελάτη σε κάθε περίπτωση. Παρόλη την απουσία του δεδομένου απόστασης, το FR-basic λειτουργεί με την ίδια επιτυχία λόγω του ότι ακολουθούνται τα βήματα απόκτησης του σκοτεινού και φάσματος αναφοράς.

αντανάκλασης.								
Μέτρηση	Layer	Min.Thick.	Est.Thick.	Max.Thick.	Meas.Thick.	х	У	steps
		[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[cm]	[cm]	
1	SiO <sub>2</sub>	0	500	1000	563.782	4.5	4.1	10
2	SiO <sub>2</sub>	200	563.782	1000	565.943	3.3	4.6	8
3	SiO <sub>2</sub>	200	565	800	<u>563.576</u>	2.3	4.6	20
4	SiO <sub>2</sub>	300	563.576	600	<u>567.426</u>	1.6	3.9	8
5	SiO <sub>2</sub>	500	567.426	600	567.108	1.5	3.1	20
6	SiO <sub>2</sub>	100	567.108	800	565.103	2.8	2.5	7
7	SiO <sub>2</sub>	100	565.103	800	564.052	4.3	2.6	14
8	SiO <sub>2</sub>	200	564.052	900	564.912	4.4	3.4	30
9	SiO <sub>2</sub>	500	564.912	600	564.285	3.1	2.4	30
Μέσος όρος					565.132			
Δεδομένο SiO <sub>2</sub>			5	65.3[nm]				

### Περιοχή 2

Παρακάτω, φαίνονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν για το SiO<sub>2</sub> (Region 2), με τη μέθοδο της

Σχόλια:

Καθώς είναι γνωστή η επιθυμητή τιμή του πάχους, κατά τη παραγωγή του δείγματος, κινείται η μέτρηση με την εκτιμώμενη – επιθυμητή τιμή πάχους για το SiO<sub>2</sub>. Στα πλαίσια των εργαστηριακών μετρήσεων, είναι γνωστό το πάχος του στρώματος του διοξειδίου του πυριτίου, από την ThetaMetrisis, εκτιμάται μετά από δική τους μελέτη, στα 565.3[nm], η οποία θα αποκαλείται 'δεδομένη τιμή'.

Τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης στις παραμέτρους αναζήτησης υποβοηθούν το FRbasic στην αναζήτηση του πάχους μέσα στα σωστά όρια. Η πρώτη εκτιμώμενη τιμή πάχους (Est.Thick.) που δίνεται στο FR-Basic, είναι τα 500[nm], η επόμενη μικρότερη εκατοντάδα από την δεδομένη τιμή. Τα Min.Thick. και Max.Thick παίρνουν τις τιμές (0 και 1000)[nm] αντίστοιχα, προκειμένου να καλυφθεί ένα μεγαλύτερο εύρος παχών. Αυτή η τεχνική είναι συνήθως πιο ασφαλής από το να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν οι κοντινότερες τιμές στη δεδομένη τιμή, για να προσομοιωθούν συνθήκες πραγματικών μετρήσεων (χωρίς τη γνώση του ακριβούς πάχους). Στη πρώτη μέτρηση δεν απασχολείται ο χρήστης για το ακριβές αποτέλεσμα της μέτρησης, αλλά για την εύρεση της προσεγγιστικής τιμής του πάχους, χωρίς ταυτόχρονα να χρειαστεί να σπαταληθεί περεταίρω χρόνος για μια δεύτερη μέτρηση, εάν η πρώτη αποτύχει λόγω ευρών μικρά ορισμένων.

Οι μετρήσεις ύστερα (από 2<sup>η</sup> – 9<sup>η</sup> μέτρηση), συνεχίζονται με την εξής μεθοδολογία: -Μειώνεται η μέγιστη τιμή πάχους και αυξάνεται η ελάχιστη τιμή πάχους, περίπου ανά 100[nm], μειώνοντας έτσι τα όρια αναζήτησης του πάχους, προς την πραγματική τιμή.

-Χρησιμοποιείται το προηγούμενο μετρούμενο αποτέλεσμα (Est.Thick.), για σκοπούς μεγαλύτερης ακρίβειας, καθώς προτείνεται και από την ThetaMetrisis το συγκεκριμένο βήμα.

-Αυξάνονται σταδιακά ο αριθμός των βημάτων, για να μειωθεί η αβεβαιότητα. Σε αρκετές μετρήσεις έχει μειωθεί ο αριθμός των βημάτων, προκειμένου να φανεί η σημαντικότητα της συνεισφοράς τους.

Η κάθε μέτρηση παίρνει μέρος σε διαφορετικό σημείο του wafer (x,y). Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός του ότι το δείγμα δεν είναι λείο, οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα μετρήσεων. Επιπλέον μεταβλητές που αλλοιώνουν το αποτέλεσμα είναι τα μικροσωματίδια ή η σκόνη που μπορεί να περιέχει το σημείο υπό ανάλυση και το φως ή η ακτινοβολία που δεν προέρχεται από το δείγμα/ εξεταστή λέιζερ.

#### Παρατηρήσεις:

Η πρώτη (και πιο σημαντική) μέτρηση, δείχνει ένα πάχος που προσεγγίζει τη δεδομένη τιμή, με απόκλιση [563.7-565.3][nm] = 1.6[nm]. Η μείωση της διαφοράς των ορίων δεν είχε μεγάλη διαφορά στο μετρούμενο πάχος και η αυξομείωση των βημάτων δεν είχε μεγάλη διαφορά στο μετρούμενο πάχος.

#### Συμπεράσματα:

Η πρώτη μέτρηση με τη χρήση του FR-basic δείχνει να είναι η πιο σημαντική, καθώς πλησιάζει τη δεδομένη τιμή, αλλά και τον μέσο όρο όλων των παραπάνω μετρήσεων. Βέβαια, στα πλαίσια του εργαστηρίου δεν απαιτείται ένα ελάχιστο σφάλμα ή μία μέγιστη ταχύτητα μέτρησης, οπότε δεν μπορεί να είναι σίγουρο εάν σε μια μονάδα παραγωγής, θα κάλυπτε αυτές τις ανάγκες.

Το FR-Basic σε συνδυασμό με το FR-basic είναι βελτιστοποιημένα εργαλεία, έτσι ώστε οι μετρήσεις ενός (τουλάχιστον) στρώματος να μπορούν να βρεθούν χωρίς τη παρέμβαση ενός έμπειρου χρήστη, δηλαδή χωρίς τον ορισμό των ορίων με μικρή διαφορά ή τη χρήση πολλών βημάτων, ή την προσεγγιστική πραγματική τιμή πάχους. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια του δείγματος δεν είναι λεία ή τελείως καθαρή από μικροσωματίδια και σκόνη. Θα μπορούσε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι ελάχιστα διαφορετικά, προσεγγίζοντας τη πραγματική τιμή πάχους (δηλαδή μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση), ή να υπάρχει πραγματικά απόκλιση στο πάχος, όπως φαίνεται στις μετρήσεις.

#### Gauss:

Προκειμένου να υπάρχει ένα συγκριτικό μέτρο μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων όσο αναφορά την αξιοπιστία της μέτρησης, δημιουργήθηκαν διαγράμματα Gauss για κάθε σετ μετρήσεων.



(Εικόνα 5.1) Διακρίνεται το σ=1.41[nm] [5.1.1]

### Σχόλια Gauss:

Με μικρές αποκλίσεις στα πλαίσια του εργαστηρίου παραδίνονται τα αποτελέσματα μετρήσεων, καθώς η κανονική κατανομή δείχνει ότι το 99.73% των μετρήσεων κινούνται στις τιμές ±4.23[nm] γύρω από την μέση τιμή.

### Περιοχή 3

Παρακάτω, φαίνονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν για το  $Si_3N_4$  και  $SiO_2$ . (Region 3) με τη μέθοδο της αντανάκλασης.

• • • •	• •							
Μέτορσρ	Lavor	Min.Thick.	Est.Thick.	Max.Thick.	Meas.Thick.	х	У	ctops
νιετρηση	Layer	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[cm]	[cm]	steps
1	$Si_3N_4$	0	100	400	<u>297.831</u>	7.6	3.9	20
	SiO <sub>2</sub>	0	500	1000	<u>355.001</u>			20
<u>2</u>	$Si_3N_4$	200	297.831	400	253.503	<u>7.6</u>	<u>3.7</u>	20
	SiO <sub>2</sub>	300	355.001	1000	416.023			20
<u>3</u>	$Si_3N_4$	50	100	400	253.476	<u>7.6</u>	<u>3.7</u>	4
	SiO <sub>2</sub>	300	550	700	416.051			4
<u>4</u>	$Si_3N_4$	50	50	400	132.848	<u>7.6</u>	<u>3.7</u>	4
	SiO <sub>2</sub>	300	550	700	584.134			4
<u>5</u>	$Si_3N_4$	100	132.848	200	133.154	<u>7.6</u>	<u>3.7</u>	4
	SiO <sub>2</sub>	550	584.134	600	583.514			4
6	$Si_3N_4$	100	130	200	<u>131.868</u>	7.6	4.35	6
	SiO <sub>2</sub>	550	580	650	583.922			6
7	$Si_3N_4$	110	131.868	150	133.987	5.55	4.20	12
	SiO <sub>2</sub>	570	583.902	600	583.87			12
8	$Si_3N_4$	130	140	150	132.668	6.8	1.45	10
	SiO <sub>2</sub>	560	578.6	580	<u>584.081</u>			10
Μέσος όρος Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>					183.667			
Μέσος όρος SiO <sub>2</sub>					513.325			
Δεδομένο Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>				140.0 [nm]				
Δεδομένο SiO <sub>2</sub>				578.6 [nm]				

#### Σχόλια:

Τα στρώματα βρίσκονται: το SiO<sub>2</sub> είναι το κάτω επίπεδο, και το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> το ανώτερο (το κοντινότερο στον εξεταστή). Οι δεδομένες τιμές πάχους, μετά από μέτρηση του κατασκευαστή είναι για το κάτω επίπεδο (SiO<sub>2</sub>): 578.6[nm] ενώ για το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>: 140.0[nm].

Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε με περισσότερα βήματα από όσα προτείνονται για ένα εύρος 400[nm] και 1000[nm] για το  $Si_3N_4$  και το  $SiO_2$  αντίστοιχα, διότι το αποτέλεσμα με λιγότερα steps δεν φαινόταν να πλησιάζει τη δεδομένη τιμή του κατασκευαστή.

Μετά τη δεύτερη μέτρηση και σε σύγκριση με τη δεδομένη τιμή πάχους του Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> καθώς και του SiO<sub>2</sub>, παρατηρήθηκε αρκετά μεγάλη απόκλιση όπως και μεταξύ των υπόλοιπων μετρήσεων. Αυτές οι αποκλίσεις φαίνονται και στο διάγραμμα Gauss, το οποίο δείχνει και την μικρή αξιοπιστία των μετρήσεων αυτών.

#### Παρατηρήσεις:

Υπάρχει μια πιθανότητα, ο υπερβολικός αριθμός των βημάτων να επηρεάζει τη ακρίβεια μέτρησης, αναγκάζοντας τη πρώτη μέτρηση να αποδίδει μεγαλύτερο αποτέλεσμα πάχους στο

πρώτο στρώμα και μικρότερη μέτρηση στο ανώτερο. Εν τέλη, αυτή η θεώρηση δεν είναι σωστή, καθώς επιβεβαιώθηκε από του τεχνικούς της ThetaMetrisis ότι όσα περισσότερα βήματα χρησιμοποιηθούν, τόσες περισσότερες επαληθεύσεις γίνονται και η βεβαιότητα του αποτελέσματος αυξάνεται. Βέβαια, ένας ακόμα παράγοντας μειωμένης ακρίβειας μπορεί να είναι το εμβαδό που 'βλέπει' ο εξεταστής. Όσο πιο ψηλά είναι η άκρη του εκπομπού λέιζερ από το δείγμα υπό ανάλυση, τόσο μεγαλύτερη επιφάνεια 'βλέπει' το FR-basic. Ως αποτέλεσμα, αυτό μπορεί να έχει:

α) Να αποδίδει έναν μέσο όρο πάχους για όλο το εμβαδό που ανακλάται από την επιφάνειά του.

β) Την ενίσχυση της επίδρασης των εξωτερικών παραγόντων (φως ήλιου ή λάμπας)

γ) Αύξηση της πιθανότητας να προσπέσει το laser σε μικροσωματίδια, επηρεάζοντας τη μέτρηση.

Επιπλέον αποκλίσεις μπορεί να προκληθούν από τη φυσική κλίση του σασί του εξεταστή (μακρόστενος μεταλλικός σωλήνας) προς τη βάση του δείγματος. Στο σετ που μας παρέδωσε η ThetaMetrisis, ο μόνος τρόπος ευθυγράμμισης του εξεταστή είναι η χειροκίνητη τοποθέτησή του και το βίδωμα στη θέση του. Πολλές φορές αυτό δεν αρκεί, οδηγώντας σε οπτικά, στραβή τοποθέτηση του.

#### Συμπεράσματα:

Φαίνεται, ότι με την εμφάνιση των πρώτων μετρήσεων με αρκετά μεγάλη απόκλιση από τις δεδομένες τιμές, είναι ευκολότερο να ανιχνευτούν νέες αιτίες σφαλμάτων στις μετρήσεις. Παρόλα αυτά η απομόνωσή τους δεν είναι το ίδιο εύκολη για όλες τις παραμέτρους, όπως η εξασφάλιση της καθαρότητας της επιφάνειας του wafer.



#### Gauss:

(Εικόνα 5.2) Το σ πλησιάζει τα 100[nm], καθιστώντας τις μετρήσεις λιγότερο αξιόπιστες, καθώς είναι ξεκάθαρη η αλλοίωση του ύψους της γραφικής από τις διάσπαρτες μετρήσεις. [5.1.1]

#### Si3N4



(Εικόνα 5.3) Ο οριζόντιος άξονας δείχνει ότι το 95.45% των τιμών βρίσκεται σε ένα εύρος  $2^*\sigma$  =142.76[nm] πάχους. [5.1.1]

#### Σχόλια Gauss:

Η συνάρτηση κανονικής κατανομής έχει υποστεί πτώση του ολικού του μέγιστου σε σχέση με τις προηγούμενες γραφικές Gauss, αλλά και σε σχέση με τις επόμενες καμπύλες, όπως θα αποδειχθεί. Επίσης εκθέτει την μεγάλη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων, δίνοντας την ικανότητα στον μελετητή να εντοπίσει εύκολα και γρήγορα την ποιότητα του αποτελέσματος.

### Περιοχή 4

Παρακάτω, φαίνονται οι μετρήσεις που λήφθηκαν για το Si-poly, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> και SiO<sub>2</sub>. (Region 4) με τη μέθοδο της αντανάκλασης.

1 11 17		- 1)						
Μέτοηση	laver	Min.Thick.	Est.Thick.	Max.Thick.	Meas.Thick.	х	У	stens
	Layer	[nm]	[nm]	[nm]	[nm]	[cm]	[cm]	steps
1	Si-poly	0	100	300	<u>110.979</u>	8.2	6.2	7
	$Si_3N_4$	0	150	300	147.968			7
	SiO <sub>2</sub>	300	570	1000	575.949			7
2	Si-poly	50	110.979	250	112.443	5.6	6.1	2
	$Si_3N_4$	50	147.268	200	147.672			2
	SiO <sub>2</sub>	500	575.949	650	576.045			5
3	Si-poly	50	110.979	250	<u>113.799</u>	5.6	7.4	5
	$Si_3N_4$	50	147.268	200	<u>149.595</u>			5
	SiO <sub>2</sub>	500	575.949	650	<u>575.114</u>			5
4	Si-poly	0	113.799	400	113.467	5.75	8.9	4
	$Si_3N_4$	0	149.595	400	149.441			4
	SiO <sub>2</sub>	100	575.114	1000	576.276			9
5	Si-poly	100	113.467	300	111.775	7.3	8.9	2
	$Si_3N_4$	100	140.441	200	<u>146.968</u>			1
	SiO <sub>2</sub>	500	576.276	1000	<u>578.219</u>			5
6	Si-poly	100	111.775	150	111.23	7.6	8.1	1
	$Si_3N_4$	100	146.968	180	147.112			1
	SiO <sub>2</sub>	500	578.219	800	576.417			3
7	Si-poly	105	111.23	120	112.659	6.7	8.25	6
	$Si_3N_4$	140	147.112	150	148.206			6
	SiO <sub>2</sub>	560	576.417	600	576.414			6
<u>8</u>	Si-poly	105	112.659	120	112.458	<u>6.8</u>	<u>5.85</u>	3
	$Si_3N_4$	140	148.206	150	147.666			3
	SiO <sub>2</sub>	560	576.414	600	575.977			3
<u>9</u>	Si-poly	100	112.458	130	112.398	<u>6.8</u>	<u>5.85</u>	8
	$Si_3N_4$	130	147.666	160	148.054			8
	SiO <sub>2</sub>	550	575.977	600	575.56			8
Μέσος όρος Si-poly					112.356			
Μέσος όρος Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>					148.076			
Μέσος όρος SiO <sub>2</sub>					576.219			
Δεδομένο Si-poly				112.4[nm]				
Δεδομένο Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>				146.3[nm]				
Δεδομένο SiO <sub>2</sub>				578.5[nm]				

#### Σχόλια:

Η βασική αλλαγή στις μετρήσεις τριών στρωμάτων, είναι η μείωση των βημάτων, διότι κάθε μέτρηση μπορεί να πάρει αρκετά δευτερόλεπτα (έως ένα λεπτό) χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο αριθμό των steps.

Οι δύο τελευταίες μετρήσεις εκτελέστηκαν στο ίδιο σημείο, με διαφορετικό αριθμό βημάτων, για να εξακριβωθεί η συμμετοχή των βημάτων σε ανάλυση τριών επιπέδων. Να επαναληφθεί, ότι μετά από συνάντηση με τους κατασκευαστές των FR-Tools, ενημερωθήκαμε πως τα steps, όσο περισσότερα χρησιμοποιηθούν, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια μέτρησης, δεν προκαλούν κάποιου είδους overshoot (απόκλιση πάχους) όπως είχε τοποθετηθεί. Τα βήματα εξυπηρετούν τον αριθμό των επαληθεύσεων που εκτελεί τα Fr-Tools.

Σε μια μονάδα παραγωγής, προκειμένου η ThetaMetrisis να καλύψει τις ανάγκες των συνεχόμενων μετρήσεων, παράγει ένα διαφορετικό προϊόν, ειδικό για τη κάθε διαδικασία μέτρησης, το οποίο υποθέτεται ότι λαμβάνει μία μέτρηση, με τα λιγότερα βήματα (συνήθως 5), υπολογίζοντας με επιτυχία το πάχος του υλικού που προσμετρείται.

#### Παρατηρήσεις:

Η μείωση των βημάτων δεν μοιάζει να επηρέασε τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Μάλιστα οι μέσοι όροι, είναι πολύ κοντά στις δεδομένες τιμές, όπως και διαφορά υπήρξε ελάχιστη στις τελευταίες δύο μετρήσεις, όπου μεταβλήθηκε κυρίως μόνο των βημάτων. Τα FR-Tools επιτελούν πολύ καλή επεξεργασία και με λίγα βήματα προκειμένου να δώσουν το σωστό αποτέλεσμα.

Gauss:



Εικόνα 5.4 *[5.1.1]* 

#### Si-poly



Εικόνα 5.5 [5.1.1]

Si3N4



Εικόνα 5.6 [5.1.1]

#### Σχόλια Gauss:

Τα αποτελέσματα είναι μικρότερων αποκλίσεων από όλα τα προηγούμενα, με το σ=0.86[nm] στο πυρίτιο. Το πρόγραμμα το οποίο επέτρεψε τις γραφικές αυτές να υλοποιηθούν εύκολα και γρήγορα, ευελπιστεί ότι θα χρησιμοποιηθεί και από τους συναδέλφους της σχολής, προκειμένου τα σχόλια των μετρήσεών τους να βασίζονται σε όσο το δυνατόν καλύτερα έμπιστη, κατανοητή και επιστημονική επεξεργασία.

## Κεφάλαιο 6: Προσδιορισμός της τιμής ενεργειακού χάσματος

### <u>Όροι και ονομασίες</u>

Οι λέξεις λίστα και πίνακας θα έχουν την ίδια σημασία, καθώς πρόκειται για λίστες μόνο, καθ' όλη τη διάρκεια επεξεργασίας τους.

Η γραφική από την οποία θα βρίσκεται το ενεργειακό χάσμα, μπορεί να αναφερθεί και ως γραφική του band gap'.

### Εισαγωγή και περιγραφή διάταξης

To band gap, energy gap ή τιμή Eg είναι η ενέργεια που χρειάζεται για ένα ηλεκτρόνιο για να μεταβεί από τη ζώνη σθένους (valence band) στη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band), δίνοντας έτσι την ικανότητα στο σώμα στο οποίο ανήκουν να δρα σαν μονωτής (όταν δεν μεταφέρονται τα ηλεκτρόνια) ή αγωγός (όταν κινούνται τα ηλεκτρόνια).

Μέσα στα πλαίσια της διπλωματικής, ήταν πρόταση του υπεύθυνου καθηγητή Θεόδωρου Γκανέτσου, να γίνει χρήση των ωμών δεδομένων που προσφέρει το FR-Basic προκειμένου να βρεθεί το ενεργειακό χάσμα των δειγμάτων που μελετώνται. Προτού αναλυθεί η μεθοδολογία εύρεσης του ενεργειακού χάσματος, θα προηγηθεί μία σύνοψη των δεδομένων που εξάγει το λογισμικό FR-Monitor:

Μετά την επιτυχή μέτρηση του πάχους ενός δείγματος, ο χρήστης μπορεί να αποσπάσει τις πληροφορίες της γραφικής real time, στη πιο 'αγνή' μορφή τους, η οποία μοιάζει έτσι ακριβώς (αριστερή φωτογραφία):

1/****	***************************************	*****
2 *	Graph Data file - Generated by FR-Monitor	*
3 *	(c) Theta Metrisis - 2013	*
4 ******	***************************************	*****/
5		
6345.949	1066.99	
7346.164	1066.99	
8346.38	1064.26	
9346.595	1066.99	
10346.811	1105.9	
11347.026	1155.74	
12 347.241	1174.85	
13 347 . 457	1181	
14 347 . 672	1172.12	
15 347.887	1198.74	
16348.103	1181.68	
17348.318	1192.6	
18348.533	1156.42	
19348.749	1166.66	
20348.964	1139.35	
21349.179	11/9.63	
22 349.395	11/8.95	
23 349.61	1213.76	
24 349.825	1225.3/	
25 350.04	1257.45	
26 350.256	1253.36	
27350.471	1247.21	
28 350.686	1239./	

<b>1</b> 345.949	1066.99
2346.164	1066.99
3346.38	1064.26
4346.595	1066.99
5346.811	1105.9
6347.026	1155.74
7347.241	1174.85
8347.457	1181
9347.672	1172.12
10347.887	1198.74
11348.103	1181.68
12348.318	1192.6
13348.533	1156.42
14348.749	1166.66
15348.964	1139.35
16349.179	1179.63
17349.395	1178.95
18349.61	1213.76
19349.825	1225.37
20350.04	1257.45
21350.256	1253.36
22350.471	1247.21
23 350.686	1239.7
24350.901	1258.82
25351.116	1263.6
26351.332	1255.4
27351.547	1269.06
28351.762	1275.2

Από την αριστερή φωτογραφία αφαιρείται ο τίτλος (γραμμές 1 έως 5), καταλήγοντας στη δεξιά φωτογραφία, έτοιμη προς εύκολη επεξεργασία των δεδομένων της. Από εδώ και στο εξής θα γίνεται επικέντρωση στο περιεχόμενο και τη δομή της δεξιάς εικόνας των 'ωμών' δεδομένων, όπως και κατά την διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας.

Τα ωμά δεδομένα περιέχουν το κάθε σημείο που διαγράφει η γραφική που φαίνεται στο παράθυρο real time του FR-Monitor. Η αριστερή στήλη είναι το μήκος κύματος σε [nm], δηλαδή το 'λ' του φωτός που εκπέμπεται από το FR-basic, ενώ η δεξιά στήλη δίνει την αντίστοιχη ένταση του φωτός που προσμετρήθηκε (από το FR-basic) μετά την αντανάκλασή του από το δείγμα (ή οποιοδήποτε άλλο τρόπο/mode). Έτσι, είναι προφανές ότι η αριστερή στήλη συνεχώς αυξάνει τη τιμή της, ενώ της δεξιάς στήλης αυξομειώνεται, ανάλογα με το τρόπο αντίδρασης του δείγματος στο προσπίπτων μήκος κύματος φωτός.

Τα παραπάνω ωμά δεδομένα, εάν εξισωθούν οι δύο στήλες, μας δίνουν τη γραφική παράσταση (Εικόνα 6.1), όπως φαίνεται στο FR-Monitor. Εδώ, για την επεξεργασία των δεδομένων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν οι βιβλιοθήκες της matplotlib, [6.2] σε γλώσσα python 3.

Δεξιά, φαίνεται το αποτέλεσμα της εξίσωσης των δύο στηλών, με τα ωμά δεδομένα της μεθόδου αντανάκλασης. Η γραφική είναι ίδια με αυτή που δείχνει το FR-Monitor στο παράθυρο real time.

Τα ωμά δεδομένα με τη τεχνική αντανάκλασης είναι το μόνο δεδομένο που χρειάζεται προκειμένου να βρεθεί η τιμή του Eg (ενεργειακό χάσμα). Θα χρειαστούν τα ωμά δεδομένα για κάθε δείγμα/ επίπεδο.

Σκοπός των βημάτων για να βρεθεί το ενεργειακό χάσμα είναι να δημιουργηθεί μία νέα γραφική με χρήση των

δεδομένων της γραφικής, η οποία δεν έχει καμία σχέση με τα δεδομένα των raw data και είναι της σχέσης  $F(\sqrt{k*h*f}) = h*f$ . Όπου F() δηλώνει συνάρτηση, όχι παράγουσα.  $k = \frac{[(1-R)^2]}{2*R} R =$  ποσοστό αντανάκλασης (%). h = η σταθερά του Planck και f = η συχνότητα του φωτός που εκπέμπεται από το FR-basic.

Στη νέα γραφική, θα σχεδιαστούν δύο εφαπτόμενες ευθείες στο **ολικό ελάχιστό** της, και στο σημείο που τέμνουν, έστω συντεταγμένες A(x1,y1), το σημείο που εκφράζει τον άξονα h\*f [eV] δείχνει τη τιμή του Eg.



(Εικόνα 6.1) SiO<sub>2</sub>, reflectance με τη χρήση ωμών δεδομένα [6.1.1]





Παρατήρηση γραφικής, (Εικόνα 6.2) Ο οριζόντιος άξονας είναι ανεστραμμένος. Η αναστροφή του βοηθά στη σύγκρισή του με τη γραφική της Εικόνας 6.1, όπου εάν δεν ήταν ανεστραμμένη, τα ίδια και αντίστοιχα' σημεία θα ήταν απέναντι. Ένα παράδειγμα θα δοθεί αργότερα.

Καθώς οι γραφικές σχηματίστηκαν με τη βοήθεια βιβλιοθήκης και με το σχεδιασμό προγράμματος σε γλώσσα python, δε θα γίνει περιγραφή της λογικής του προγράμματος, αλλά η μαθηματική προσέγγιση της λύσης.

### Βήματα εύρεσης ενεργειακού χάσματος

Ακολουθούν τα βήματα για να βρεθεί το ενεργειακό χάσμα: [6.1.2]

1) Μετατροπή των μετρούμενων τιμών σε ποσοστά %.

α) Από τα ωμά δεδομένα, βρίσκεται η μεγαλύτερη τιμή μετρούμενης τιμής της έντασης του φωτός. Αυτή η τιμή θα χρησιμοποιηθεί ως το 100% (ολικό μέγιστο) της τελικής συνάρτησης.

β) Κατασκευάζεται μια νέα στήλη τιμών με τα ποσοστά τις %, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση για κάθε μετρούμενη τιμή: αποτέλεσμα = (μετρούμενη τιμή)/(μέγιστη τιμή). Ως αποτέλεσμα, η νέα λίστα θα περιέχει αριθμούς από το 0 έως το 1. Αν είναι επιθυμητή η χρήση τιμών από 0 έως το 100, θα πρέπει επίσης να αλλαχθεί η εξίσωση  $k = \frac{[(1-R)^2]}{2*R}$ , σε  $k = \frac{[(100-R)^2]}{2*R}$  προκειμένου να συμβαδίζει ποσοτικά και να συμφωνεί με την εξίσωση του k.

2) Μετατροπή της λίστας των μηκών κύματος [nm] σε συχνότητα.

Κάθε εκπεμπόμενο μήκος κύματος φωτός, έχει διαφορετική συχνότητα η οποία βρίσκεται μέσω της εξίσωσης  $\lambda = \frac{u}{f} => f = \frac{u}{\lambda}$ , με  $u = c = ταχύτητα φωτός και <math>\lambda = κάθε$  διαφορετικό εκπεμπόμενο μήκος κύματος.

3) Εκτέλεση μετασχηματισμού Kubelka-Munk

Δημιουργία ενός νέου πίνακα k, με  $k = \frac{[(1-R)^2]}{2*R}$ , όπου R είναι οι τιμές της λίστας 1α) σε ποσοστό.

4) Κατασκευή της σχέσης h\*f

Υπολογισμό νέας λίστας, h \* f, με h= σταθερά του plank σε eV και fi= τιμές λίστας συχνοτήτων από βήμα 2.

### 5) Κατασκευή της σχέσης $\sqrt{k*h*f}$

Κατασκευή νέας λίστας  $\sqrt{k * h * f}$ , με ki= τιμές λίστας k, h= σταθερά του Planck σε eV και fi= τιμές λίστας συχνοτήτων από το βήμα 2.

6) Πλοκή των  $F(\sqrt{\mathbf{k} * \mathbf{h} * \mathbf{f}}) = h * f$ 

Εφόσον τα βήματα 4 και 5 διαμορφώσουν δύο λίστες ίσου μεγέθους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν τη τελική συνάρτηση.

Σε αυτό τη σημείο είναι πολύ σημαντικό να ειπωθεί ότι οι μονάδες που χρησιμοποιούνται, σε όλο τον αλγόριθμο πρέπει να είναι προσεγμένες και να δημιουργούν το επιθυμητό αποτέλεσμα, και κυρίως να μην εμπλέκονται μεταξύ τους (πράξεις με διαφορετικά μεγέθη). Για παράδειγμα η σταθερά του Planck, να χρησιμοποιηθεί η τιμή της σε [eV] και όχι σε [Joule], καθώς αυτό επιδιώκεται από τη διαδικασία. Φυσικά, ίσως να επιτυγχάνεται το σωστό αποτέλεσμα με διαφορετικές τελικές μονάδες, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των πράξεων αποτελείται από πολλαπλασιασμούς ή διαιρέσεις, εκτός από μία αφαίρεση στο τύπο του k.

### Αποτελέσματα:

Προτού γίνει προβολή των αποτελεσμάτων, προηγείται μία αναζήτηση για το τι αποτελέσματα αναμένονται, για σκοπούς σύγκρισης, αλλά και για ένα σημαντικό συμπέρασμα.

Δείγματα	Ενεργειακό χάσμα [eV]
Si	1.14
Si-poly	1.7
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	5
SiO <sub>2</sub>	9

Πίνακας 1

Τα παραπάνω βρέθηκαν στα «List of band gaps» [6.3] και «Deposition methods» [6.4].

Να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια προγραμματισμού του αλγόριθμου για την εύρεση του ενεργειακού κενού, υπήρξαν πολλές συγκρίσεις με τα αναμενόμενα αποτελέσματα προκειμένου να εξακριβωθεί η εγκυρότητα του αλγόριθμου.

### Συνάρτηση Eg για το Si (πυρίτιο)



Si - Δεξιά: Raw data graph/ reflectance. Αριστερά: Τελική γραφική για τον προσδιορισμό του Eg value [6.1.1]

#### Σχόλια:

Έχει τοποθετηθεί στην δεξιά καμπύλη, στις κατακόρυφες μονάδες, η μέγιστη τιμή της έντασης του φωτός των ωμών δεδομένων προκειμένου να διευκολυνθεί ο αναγνώστης στην κατανόηση της γραφικής, της λειτουργίας της ή εν τέλη, να διευκολυνθεί στη χρήση της, καθώς στο FR-Monitor, δείχνει την ένταση του φωτός με βάση τη μέγιστη δυνατότητα (περιορισμό) του FR-Basic (περιορισμός των 16-bits).

#### Παρατηρήσεις:

Στις ακραίες τιμές της (αριστερά) γραφικής, οι ταλαντώσεις των τιμών αυξάνονται στη γραφική του Eg. Προφανώς, είτε μειώνεται η ανάλυση του φασματογράφου στις έσχατες τιμές του, είτε μετά τη χρήση συντελεστή στις τιμές της δεξιά καμπύλης, οι μικρές ατέλειές της γίνονται διακριτές.

Η δεξιά γραφική είναι μία τελείως διαφορετική καμπύλη με εκείνης του Eg.

#### Συμπεράσματα:

Πιθανόν, μία δυνατότητα η οποία θα έπρεπε να προσφέρει το FR-Monitor, είναι η δυνατότητα προβολής της γραφικής παράστασης (δεξιά εικόνα) που βρίσκεται παραπάνω, σε ποσοστό [%] με σκοπό τη χρήση μιας πιο γενικής μορφής.



Κοντινότερη ματιά στην αριστερή φωτογραφία και σχηματισμός των εφαπτόμενων στο ολικό ελάχιστο – Si [6.1.1]

### Υπολογισμός Ενεργειακού χάσματος Si

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο της ¨Ζωγραφικής¨ για τη σχεδίαση των γραμμών, η πράσινη γραμμή, στον οριζόντιο άξονα, δείχνει ένα ενεργειακό χάσμα Ε = 1.02 [eV].

```
Υπολογισμός: στο 1.5 της γραφικής => εικονοστοιχείο 129.
στο 0 της γραφικής => εικονοστοιχείο 38.
Διαφορά: 129-38 = 91 εικονοστοιχεία ανάμεσα στο 1.5 και το 0 της γραφικής.
Κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνει 1.5/91 = 0.016483516 eV.
Η πράσινη γραμμή βρίσκεται στο εικονοστοιχείο 100. 100 – 38 = 62 εικονοστοιχεία από το 0.
```

**Ενεργειακό χάσμα Si** = 62 \* 0.016483516 = 1.021977992 [eV], διαφοράς μόλις 0.12 [eV] από την τιμή που βρέθηκε στη διαδικτυακή πηγή.

#### Σχόλια:

Με τον υπολογισμό του ενεργειακού χάσματος του Si, διασφαλίστηκε ότι από τις μετρήσεις του πυριτίου, μέχρι και τον προγραμματισμό του κώδικα έχουνε επιτύχει.

Σχετικά με τον σχεδιασμό των εφαπτόμενων ευθειών, θα μπορούσε να αποτελεί κομμάτι του κώδικα, έτσι ώστε να γίνονται αυτόματα και οι εφαπτόμενες και ο υπολογισμός της τιμής του Eg (ιδέα α). Με την παρούσα τεχνική, όπου οι ευθείες εκτελούνται στη "Ζωγραφική", υπάρχουν πιθανότητες σφάλματος, λόγω των αστοχιών του χρήστη στη απεικόνιση των ευθειών. Πέρα από το σφάλμα του παρατηρητή, σημαντικό παράγοντα στην ανακρίβεια καθορίζει το σφάλμα κβάντισης. Από τη συλλογή των δεδομένων έως την απεικόνιση τους στη γραφική του Eg, τα δεδομένα διακρίνονται δύο φορές. Η πρώτη κατά την απόκτηση των δεδομένων (Raw data) της γραφικής (με τον περιορισμό των 16-bit στοιχείων) και η δεύτερη η κβάντιση των εικονοστοιχείων της γραφικής σε σχέση με τα δεδομένα της γραφικής του Eg value. Με την 'ιδέα α', η δεύτερη κβαντοποίηση δεν θα υπήρχε, και το σφάλμα θα ήταν σταθερό, επειδή θα βασιζόταν σε αλγόριθμο.



Συνάρτηση Eg για το Si-Poly (polycrystalline oxide)

Si-poly - Δεξιά: Raw data graph/ reflectance. Αριστερά: Τελική γραφική για τον προσδιορισμό του Eg value [6.1.1]



Κοντινότερη ματιά στην αριστερή φωτογραφία, σχηματισμός των εφαπτόμενων στο ολικό ελάχιστο - Si-poly [6.1.1]

Με την ίδια τεχνική, βρέθηκε ότι το **ενεργειακό χάσμα του Si-poly** είναι 1.775 [eV], μόλις 0.075 [eV] διαφοράς από αυτό που βρέθηκε στις διαδικτυακές πηγές.

(Τα 2.0[eV] στα 238 εικονοστοιχεία, η πράσινη γραμμή στα 189 εικονστοιχεία, τα 1.5[eV] στα 129 pixels και το 0 στα 34 pixels).

Αναλυτικά υπολογίζεται:

στο 1.5 της γραφικής => εικονοστοιχείο 129.

στο 0 της γραφικής => εικονοστοιχείο 34.

Διαφορά απόστασης μεταξύ του 0 και του 1.5 είναι: 129-34 = 95 εικονοστοιχεία

στο 2.0 της γραφικής => εικονοστοιχείο 238.

στο 0 της γραφικής => εικονοστοιχείο 34. Διαφορά απόστασης μεταξύ του 0 και του 2.0 είναι: 238-34 = 204 εικονοστοιχεία

Η απόσταση μεταξύ του 1.5 και του 2.0 είναι: 204-95 = 109 εικονοστοιχεία Σε 0.5 απόσταση, κάθε εικονοστοιχείο λαμβάνει 0.5/109 = 0.0045871559 eV.

Η πράσινη γραμμή βρίσκεται στο εικονοστοιχείο 189. 189 – 34 = 155 εικονοστοιχεία από το 0. Όμως η απόσταση μεταξύ του 1.5 και της πράσινης γραμμής είναι: 155-95 = 60 εικονοστοιχεία

**Ενεργειακό χάσμα Si-poly** = 1.5 + (60 \* 0.0045871559) = 1.5 + 0.275229 = 1.775 [eV]

#### Σχόλια:

Στις ιστοσελίδες που βρέθηκαν τα ενεργειακά χάσματα, στον **πίνακα 1**, υπάρχει η πιθανότητα να είναι κατά προσέγγιση οι τιμές, ειδικότερα εφόσον έτσι αναφέρει τουλάχιστον για το Si-poly. Η θερμοκρασία του δωματίου δεν σχετίζεται με την τιμή του ενεργειακού χάσματος. Η μικρή διαφορά/σφάλμα του αποτελέσματος σε σχέση με την τιμή του πίνακα οφείλεται σε κβαντοποίηση των δεδομένων και στην ανακρίβεια του παρατηρητή/ σχεδιαστή των εφαπτόμενων.

## Ο περιορισμός εύρεσης ενεργειακού χάσματος

Συνάρτηση Eg για το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Silicon Nitride):



Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - Δεξιά: Raw data graph/ reflectance. Αριστερά: Τελική γραφική για τον προσδιορισμό του Eg value *[6.1.1]* 



Κοντινότερη ματιά στην αριστερή φωτογραφία, και σχηματισμός των εφαπτόμενων στο ολικό ελάχιστο -  $Si_3N_4$  [6.1.1]

Με τη χρήση της "Ζωγραφικής", παρατηρείται ένα χάσμα στη τιμή 1.5 [eV], το οποίο αποκλείει κατά πολύ από τη τιμή 5 [eV], η οποία βρέθηκε στις πηγές. Κατά τη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος αυτού, βρέθηκε ο λόγος που προκαλεί αυτή την μεγάλη απόκλιση, η οποία συμβαίνει και στη γραφική του SiO<sub>2</sub>, η οποία παρατίθεται ως παράδειγμα, προτού προβληθεί η αιτία του προβλήματος:



SiO<sub>2</sub> - Δεξιά: Raw data graph/ reflectance. Αριστερά: Τελική γραφική για τον προσδιορισμό του Eg value [6.1.1]



Κοντινότερη ματιά στην αριστερή φωτογραφία, και σχηματισμός των εφαπτόμενων στο ολικό ελάχιστο -SiO<sub>2</sub> *[6.1.1]* 

Η τελευταία γραφική, δίνει ένα χάσμα ανάμεσα στο 2 και 2.5 [eV]. Επίσης λανθάνουσα, σύμφωνα με τις πηγές του διαδικτύου, οι οποίες συμφωνούν σε μία τιμή 9 [eV].

Αν είναι κανείς αρκετά παρατηρητικός, μπορεί να αντιληφθεί, ότι όλες οι γραφικές για τον προσδιορισμό του Eg, βρίσκονται στα όρια από 0 έως (περίπου) το 4 (±0.25) –η ακρίβεια εδώ είναι το ½ της μικρότερης μονάδας που φαίνεται στη γραφική. Μία νέα έκδοση του αλγόριθμου θα μπορούσε να δείχνει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα σημεία-.

Άρα, με μια ματιά φαίνεται ότι δεν δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να δει όλη τη γραφική, καθώς συμπεραίνεται ότι η γραφική συνεχίζεται προς τα δεξιά\* κάλλιστα προς τα αριστερά. Είναι σχεδόν σίγουρο, ότι δεν εμφανίζεται όλη η γραφική, και έτσι χρησιμοποιείται το λάθος σημείο για τον προσδιορισμό της τιμής του Eg στα 2 παραπάνω δείγματα/ γραφικές. Δηλαδή, στις καμπύλες φαίνεται ένα τοπικό ελάχιστο της όλης γραφικής.

Τα παραπάνω μπορούν να επαληθευτούν και μαθηματικά. Καταρχάς, ας αποδειχθεί από τι εξαρτάται ο οριζόντιος άξονας της γραφικής. Ο οριζόντιος άξονας χαρακτηρίζεται από το h\*f, όπου το h είναι μία **σταθερά** και το f είναι η συχνότητα του μήκους κύματος του φωτός που εκπέμπει η λάμπα του FR-basic. Επιπλέον, το  $f = \frac{u}{\lambda}$ , όπου u= c= ταχύτητα φωτός, άρα μία **σταθερά**, και λ= μήκος κύματος του φωτός, το οποίο **αλλάζει** σε κάθε διαφορετική εκπομπή φωτός του FR-basic.

Άρα, η μόνη τιμή που αλλάζει, είναι το λ. Από αυτό εξαρτάται ο οριζόντιος άξονας (την αρχή και το τέλος του οριζόντιου άξονα). Ας επαληθευτεί η θεωρία αυτή, σε μία από τις γραφικές που απέδωσε το σωστό αποτέλεσμα Eg.



Si-poly - Συνάρτηση εύρεσης της τιμής του Eg [6.1.1]

Έστω η συνάρτηση εύρεσης του Eg του Si-poly. Είναι ήδη γνωστό, ότι το ενεργειακό του χάσμα είναι 1.7 [eV]. Για να φανεί σε ποιο μήκος κύματος αποκαλύπτεται το ενεργειακό κενό,

> $\frac{Yπολογίζεται:}{}$  Έχω ότι: h\*f [eV] = 1.7 [eV]  $\Leftrightarrow \frac{h*c}{\lambda} [eV] = 1.7 [eV]$   $\Leftrightarrow \frac{4.1356678*10^{-15} [eV*sec] \times 3*10^8 [m/sec]}{\lambda [nm]} = 1.7 [eV]$   $\Leftrightarrow \frac{12.4070034*10^{-7} [(eV*sec*m)/sec]}{1.7 [eV]} = \lambda [nm]$   $\Leftrightarrow \lambda [nm] = 7.29 * 10^{-7} [m]$   $\Leftrightarrow \lambda [nm] = 7.29 * 10^2 [nm] = 729 [nm]$

Άρα, για λ= 729 [nm] μήκος κύματος, μπορεί να βρεθεί το ενεργειακό χάσμα σε εκείνο το σημείο. Όντως, το FR-basic εκπέμπει αυτό το μήκος κύματος του φωτός -και τα γύρω εύρη κύματος- για να μπορέσει κανείς να διακρίνει τις εφαπτόμενες ευθείες και να βρεθεί το χάσμα. (τα μήκη κύματος που εκπέμπονται είναι από 345[nm] έως 1047[nm], φαίνονται στα ωμά δεδομένα).

Αν κανείς αποπειραθεί να συγκρίνει τις γραφικές του ενεργειακού χάσματος, και της γραφικής της αντανάκλαστικότητας των ωμών δεδομένων, στον οριζόντιο άξονά τους, προκειμένου να αντιληφθεί για το αν το σημείο του χάσματος συμπίπτει με το αντίστοιχο μήκος κύματος (εδώ, τα 729[nm]), στις παραπάνω εικόνες, θα απογοητευθεί. Ουσιαστικά, η γραφική του ενεργειακού κενού πρέπει να δεχθεί οριζόντια αναστροφή για να συμπίπτουν/ αντιστοιχηθούν τα σημεία των δύο γραφικών.

Τώρα, ας αποδειχθεί το μήκος κύματος φωτός που χρειάζεται να εφαρμοστεί για να φανεί band gap ενέργειας 9 [eV].

Ξέρω ότι: h\*f [eV] = 9 [eV]  $\Leftrightarrow \frac{h*c}{\lambda} [eV] = 9 [eV]$   $\Leftrightarrow \frac{4.1356678*10^{-15} [eV*sec] \times 3*10^8 [m/sec]}{\lambda [nm]} = 9 [eV]$   $\Leftrightarrow \frac{12.4070034*10^{-7} [(eV*sec*m)/sec]}{9 [eV]} = \lambda [nm]$ 

 $\Leftrightarrow \lambda[nm] = 1.38 * 10^{-7}[m]$ 

 $\Leftrightarrow \lambda[nm] = 1.38 * 10^2[nm] = 138[nm]$ 

Προκειμένου να φανεί στη γραφική συνάρτηση -μέσω της οποίας βρίσκεται το ενεργειακό χάσμα- το band gap, θα πρέπει να αναλυθεί το δείγμα στα τουλάχιστον 138[nm], και σε μικρότερα μήκη κύματος από τα 138[nm], διότι το ενεργειακό χάσμα δεν βρίσκεται μόνο στο ολικό ελάχιστο, αλλά χρησιμοποιείται και η συνέχεια της καμπύλης για την δεύτερη εφαπτομένη ευθεία.

**Συμπέρασμα:** Για να δει ο χρήστης μεγαλύτερα ενεργειακά χάσματα σε δείγματα, θα πρέπει το εργαλείο μέτρησής του (εδώ, το FR-basic) να εκπέμπει μικρότερα μήκη κύματος φωτός, τα οποία να είναι και ικανό να εντοπίσει μετά την αντανάκλασή τους. Για να ολοκληρωθεί η έρευνα πάνω στα χάσματα των διαθέσιμων δειγμάτων αυτής της εργασίας, θα χρειαστεί ένα εργαλείο το οποίο θα εκπέμπει και θα μπορεί να λάβει μήκη φωτός έως και στο εύρος των 138[nm]. Η ThetaMetrisis συμφώνησε να παραχωρήσει κάποια ωμά δεδομένα από υλικά των οποίων το ενεργειακό χάσμα δεν μπορεί να φανεί με τη χρήση του FR-Basic του εργαστηρίου. Αυτά τα δεδομένα, θα υπάρχουν στο φάκελο 'data examples' του github στο οποίο φιλοξενείται και ο ίδιος αλγόριθμος.

## Συμβατικές ονομασίες και λεξιλόγιο

Region	Περιοχή
Layer	Επίπεδο ή στρώμα
Wafer, film, sample:	Δείγμα, υμένιο ή λεπτό υμένιο
Laser probe	Εξεταστής, εξεταστής λέιζερ ή εκπομπός λέιζερ
Reflection probe	Λήπτης αντανάκλασης ή λήπτης έντασης
Internal lamp	Λάμπα ή εσωτερική λάμπα
Spectral regions	Φασματικές περιοχές
Energy gap, band gap	Ενεργειακό χάσμα
ThetaMetrisis	Εταιρία

## Βιβλιογραφία

### Εικόνες εξωφύλλου

https://medium.com/extremetech-access/moores-law-scaling-dead-by-2021-to-be-replaced-by-3d-integration-d2736b2f3b8 [19/02/2021]

http://www.joycesolutions.co.uk/slide/audit-2-2/silicon-wafers-and-microcircuits-a-wafer-is-a-thin-slice-of-semiconductor-material-such-as-a-silicon\_t20\_kyprv0-comp/ [19/02/2021]

https://www.indiamart.com/proddetail/nanotechnology-in-waste-water-treatment-22243709830.html [27/03/2021]

https://www.cen.eu/work/areas/nanotech/pages/default.aspx [06/04/2021]

### Περίληψη

[a]https://github.com/Basilisvirus/gauss\_from\_wafer

[b]https://github.com/Basilisvirus/Band-gap-energy-of-photocatalyst

#### Κεφάλαιο 1

[1.1]https://el.wikipedia.org/wiki/Μονωτής, 27/03/2021

[1.1.a]https://en.wikipedia.org/wiki/Insulator\_(electricity), 27/03/2021

[1.2]https://plhroforikh-vioiatrikhtechnologia.blogspot.com/p/blog-page\_9532.html, 27/03/2021

[1.3]https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/the-lost-history-of-the-transistor, μεταφρασμένο, 27/03/2021

[1.4] https://www.extremetech.com/computing/191415-tsmc-announces-first-16nm-finfet-results-unveils-10nm-roadmap, 27/03/2021

[1.5]http://gr.rycwafer.com/silicon-wafer/silicon-wafers.html, η εικόνα βρέθηκε σαν προϊόν, 27/03/2021

[1.6]http://egloos.zum.com/star1034/v/2230320, μία από τις διαθέσιμες εικόνες για κατέβασμα. 05/04/2021

[1.7]https://slideplayer.com/slide/9416386/, μεταφρασμένο 22/04/2021

[1.7.1]https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/optical-lithography, μεταφρασμένο 22/04/2021

[1.7.2]https://cores.research.asu.edu/nanofabrication-and-cleanroom/techniques-lithography, μεταφρασμένο 17/05/2021

[1.8]https://learn.sparkfun.com/tutorials/integrated-circuits/inside-the-ic, μεταφρασμένο 27/03/2021

[1.9]http://nn.physics.auth.gr/index.php?option=com\_content&view=article&id=303%3 A2013-11-05-14-19-06&catid=68%3A2010-09-03-21-09-19&Itemid=158&lang=el, 27/03/2021

[1.10]https://www.explainthatstuff.com/fiberoptics.html, μεταφρασμένο 27/03/2021

[1.11]https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic\_radiation, μεταφρασμένο 27/03/2021

[1.12]https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum, μεταφρασμένο 27/03/2021

[1.13]https://en.wikipedia.org/wiki/Light, μεταφρασμένο 27/03/2021

[1.14]https://en.wikipedia.org/wiki/Reflectance, μεταφρασμένο 19/04/2021

[1.15]https://fd3u7gx44wclsqkkogjdyyu6zu-adv7ofecxzh2qqi-en-m-wikipedia org.translate.goog/wiki/Electronic\_structure, μεταφρασμένο 19/04/2021

[1.16]http://auto.teipir.gr/sites/default/files/fr-monitor\_manual\_v3.3\_march\_2016.pdf, μέσω PDF της εταιρίας ThetaMetrisis, μέσω PDF της εταιρίας ThetaMetrisis σελίδες 12,14,16, μεταφρασμένο 06/04/2021

[1.17]https://en.wikipedia.org/wiki/Absorbance, μεταφρασμένο 19/04/2021

[1.18]https://en.m.wikipedia.org/wiki/Transmittance, μεταφρασμένο 19/04/2021

### Κεφάλαιο 2

[2.1.1]https://www.researchgate.net/figure/The-specter-of-solar-light\_fig1\_276062526, εικόνα 06/04/2021

[2.1.2]έχουν ληφθεί από τον κάτοχο της διπλωματικής, μέσα στο εργαστήριο του μαθήματος Νανοτεχνολογίας

[2.1.3]έχουν ληφθεί από τον κάτοχο της διπλωματικής, μέσα στο εργαστήριο του μαθήματος Νανοτεχνολογίας

[2.1.4]έχουν ληφθεί από τον κάτοχο της διπλωματικής μέσα στο εργαστήριο του μαθήματος Νανοτεχνολογίας

[2.1.5]http://auto.teipir.gr/sites/default/files/fr-monitor\_manual\_v3.3\_march\_2016.pdf, σελίδα 21, μέσω PDF της εταιρίας ThetaMetrisis, 06/04/2021

[2.1.6]http://auto.teipir.gr/sites/default/files/fr-monitor\_manual\_v3.3\_march\_2016.pdf, σελίδα 56, μέσω PDF της εταιρίας ThetaMetrisis, 06/04/2021

[2.1.7]μέσω Screenshot από το πρόγραμμα FR-Monitor

[2.1.8]μέσω Screenshot από το πρόγραμμα FR-Monitor

#### Κεφάλαιο 3

[3.1]https://www.thetametrisis.com/images/FR-Basic-2017-1.jpg, 06/04/2021

[3.2]έχουν ληφθεί από τον κάτοχο της διπλωματικής μέσα στο εργαστήριο του μαθήματος Νανοτεχνολογίας

[3.1.2]Cutter, Elizabeth G. (1978). Plant Anatomy. Part 1 Cells and Tissues (2nd ed.). London:EdwardArnold.ISBN978-0-7131-2639-6.,μεταφρασμένο,https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon, 27/03/2021

[3.1.3]Semiconductors Without the Quantum Physics, μεταφρασμένο, μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon, 27/03/2021

[3.1.4]Monkowski, J. R.; Bloem, J.; Giling, L. J.; Graef, M. W. M. (1979). "Comparison of dopant incorporation into polycrystalline and monocrystalline silicon". Appl. Phys. Lett. 35 (5): 410–412. doi:10.1063/1.91143, μεταφρασμένο μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline\_silicon, 27/03/2021

[3.1.5]Iler RK (1979). The Chemistry of Silica. New York: Wiley., μεταφρασμένο, μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\_dioxide, 27/03/2021

[3.1.6]Fernández LD, Lara E, Mitchell EA (2015). "Checklist, diversity and distribution of testate amoebae in Chile"., μεταφρασμένο μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\_dioxide, 27/03/2021

[3.1.7]Gray, P. R.; Hurst, P. J.; Lewis, S. H.; Meyer, R. G. (2009). Analysis and Design of Analog Integrated Circuits (5th ed.). Wiley. p.40, μεταφρασμένο, μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Relative\_permittivity, 27/03/2021

[3.3]https://en.wikipedia.org/wiki/File:FET\_cross\_section.png#file, εικόνα 27/03/2021

[3.1.8]Mellor, Joseph William (1947). A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. 8. Longmans, Green and Co. pp. 115–7, μεταφρασμένο, πηγή 4 μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\_nitride, 27/03/2021

[3.1.9]https://www.wisegeek.com/what-is-thermodynamic-stability.htm#, μεταφρασμένο 08/04/2021 [3.1.10]Haynes, William M., ed. (2011).CRC Handbook of Chemistry and Physics(92nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press p.4.88. Kαι https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\_nitride, πηγή 1 μεταφρασμένο 08/04/2021

[3.1.11]Fabrication and characterisation of copper diffusion barrier layers for future interconnect applications, Conor ByrneB.Sc.Doctor of Philosophy June 2015 Supervised by Professor Greg Hughes., Dublin City UniversitySchool of Physical Sciences PDF:

chrome-

extension://oemmndcbldboiebfnladdacbdfmadadm/http://doras.dcu.ie/20828/1/CBThesis\_PostVi va.pdf, μεταφρασμένο 08/04/2021

[3.1.12]Pierson, Hugh O. (1992). Handbook of chemical vapor deposition (CVD). William Andrew. p. 282. Μεταφρασμένο, μέσω https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon\_nitride, 08/04/2021

[3.1.13]"Solar Insight, Research note – PV production 2013: an all Asian-affair". Bloomberg New Energy Finance. 16 April 2014. pp.2–3. from the original on 30 April 2015. , μεταφρασμένο, μέσω: https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline\_silicon, 09/04/2021

[3.1.14]https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline\_silicon#Polycrystalline\_vs\_monocrystalline\_s ilicon, μεταφρασμένο 09/04/2021

[3.4]https://en.wikipedia.org/wiki/File:Crystallite.jpg, εικόνα 09/04/2021

[3.5]https://en.wikipedia.org/wiki/File:CrystalGrain.jpg, εικόνα 09/04/2021

[3.6]https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison\_solar\_cell\_poly-Si\_vs\_mono-Si.png, εικόνα 09/04/2021

### Κεφάλαιο 4

[4]μέσω Screenshot από το πρόγραμμα FR-Monitor

#### Κεφάλαιο 5

[5]https://github.com/Basilisvirus/gauss\_from\_wafer

[5.1.1]μέσω Screenshot από το πρόγραμμα FR-Monitor

### Κεφάλαιο 6

[6.1]Screenshot φωτογραφίας από ωμά δεδομένα μέσω FR-Monitor

[6.1.1]γραφικές από το matplotlib πρόσβαση από https://github.com/matplotlib/matplotlib

#### [6.2]https://github.com/matplotlib/matplotlib

[6.1.2]Author tanks to RNDr. J. Jirkovský, CSc. from J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry for consultation with interpretation of diffuse reflectance spectra. "Band gap energy of powder photocatalysts", μεταφρασμένο 09/04/2021

[6.3]https://en.wikipedia.org/wiki/Band\_gap

[6.4]https://en.wikipedia.org/wiki/Polycrystalline\_silicon