



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

«Οπτική & Όραση»

Φασματοσκοπική Συμβολομετρία με εφαρμογή στη
Δυναμική Προφίλομετρία

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΡΙΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπάζογλου Δημήτριος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

«Οπτική & Όραση»

Φασματοσκοπική Συμβολομετρία με εφαρμογή στη
Δυναμική Προφίλομετρία

ΠΑΝΑΓΙΩΤΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΡΙΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπάζογλου Δημήτριος

Η παρούσα εργασία υπεβλήθη ως μέρος των υποχρεώσεων για την απονομή του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Οπτική και Όραση» και παρουσιάστηκε στην Τριμελή Επιτροπή αποτελούμενη από τους:

1. Παπάζογλου Δημήτριος
2. Άγγλος Δημήτριος
3. Ταρουδάκης Μιχαήλ

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1:

- 1.1: Εισαγωγή
- 1.2: Αναφορά στις υπάρχουσες τεχνικές

Κεφάλαιο 2: Κυματική Οπτική

- 2.1: Συμβολή
- 2.2: Συμβολομετρία, και Surface Profiling

Κεφάλαιο 3: Συμβολή στο Λευκό Φως

- 3.1: Διαμόρφωση στο Φάσμα εξαιτίας διαφοράς οπτικού δρόμου
- 3.2: Διαδικασία υπολογισμού προφίλ επιφάνειας με συμβολή λευκού φωτός

Κεφάλαιο 4: Simulation

- 4.1: Το περιβάλλον Matlab
- 4.2: Ο αλγόριθμος

Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διάταξη

- 5.1: Συμβολόμετρο Mirau
- 5.2: Πειραματικές εικόνες

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Βελτιώσεις – Αναφορά στις υπάρχουσες τεχνικές

Παράρτημα

- 1. Αλγόριθμος υπολογισμού προφίλ της Matlab
- 2. Αλγόριθμος Simulation Συμβολής της Matlab

Αναφορές

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματική εργασίας είχα την τύχη να συνεργαστώ με πολλούς ανθρώπους, των οποίων η υποστήριξη και συνεισφορά με βοήθησε πολύ στο έργο μου. Έτσι θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, τους συνεργάτες και τους φίλους μου που με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο και κόπο.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Παπάζογλου, επιβλέπων καθηγητή μου σε αυτή την εργασία. Από την αρχή του μεταπτυχιακού προγράμματος κατάφερε να μου διεγείρει το ενδιαφέρον για την οπτική, αντικείμενο που κατέχει και μπορεί και διδάσκει σαν κανέναν άλλο. Κατά την διάρκεια της συνεργασίας, μας στα πλαίσια της διπλωματικής, ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει και να εξηγήσει, χωρίς ποτέ όμως να σταματάει να πιέζει για την βελτίωση μου. Χωρίς αμφιβολία ήταν η συνεχής του καθοδήγηση και βοήθεια που συντέλεσε στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την φίλο, συμφοιτητή και συνεργάτη μου Γιάννη Ορφανό, που με τις τεράστιες γνώσεις του σε τεχνικά θέματα με βοήθησε ιδιαίτερα στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής. Η καθημερινή μου επαφή μαζί του, με βοήθησε να κατανοήσω και να αντιμετωπίσω τα προβλήματα που προέκυπταν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου Σκουριτάκη Στέλιο, Τσαούση Κώστα, Αργυρόπουλο Χρήστο και Χατζηφούντα Χρήστο που ποτέ δεν αρνήθηκαν να ακούσουν τις δυσκολίες που αντιμετώπιζα και μου πρόσφεραν πολύτιμη ψυχολογική στήριξη.

Κεφάλαιο 1.1: Εισαγωγή

Σε αυτή την διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ένα προφιλόμετρο που λειτουργεί με βάση την φασματική ανάλυση συμβολογραμάτων λευκού φωτός. Το προφίλ που μετράτε είναι μια γραμμή πάνω στην επιφάνεια του εκάστοτε δείγματος, έχοντας ακρίβεια της τάξης των 10nm και εύρος λειτουργίας από 0 έως 80μm υψομετρικής διαφοράς.

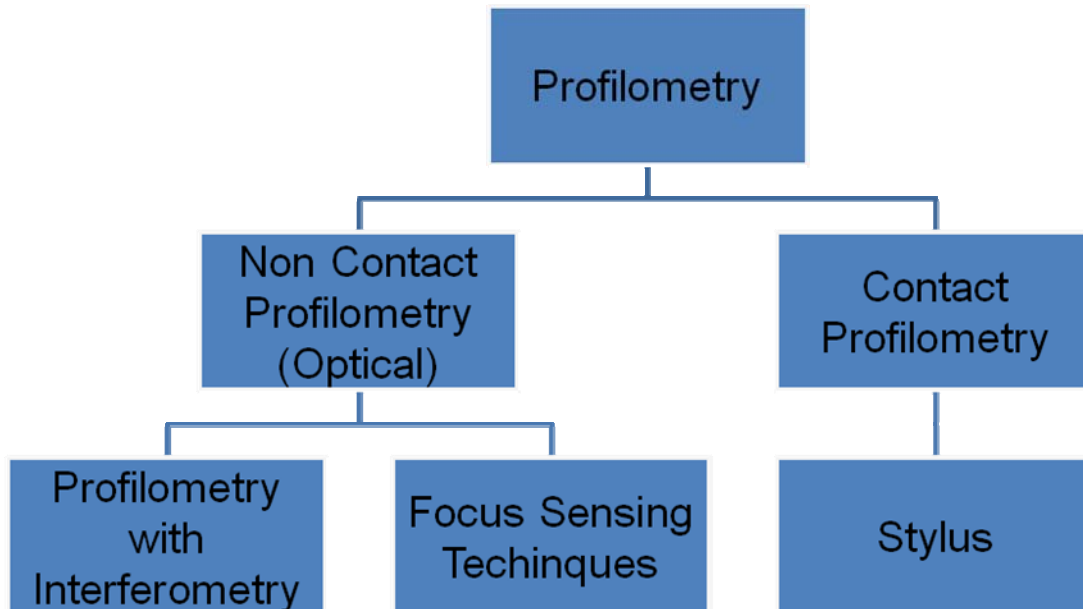
Αρχικά παρουσιάζονται κάποιες βασικές αρχές της κυματικής οπτικής και συμβολής. Μετέπειτα αναλύεται η περίπτωση της συμβολής με λευκού φωτός και το φαινόμενο στο οποίο στηρίζεται η πειραματική διάταξη για να μετράει προφίλ. Το φαινόμενο αυτό έχει να κάνει με την διαμόρφωση στο φάσμα που παρουσιάζεται σε δύο δέσμες που συμβάλουν λόγω διαφοράς οπτικού δρόμου. Στη συνέχεια περιγράφεται η αντιστροφή της διαδικασίας, δηλαδή πως μπορούμε να υπολογίσουμε το προφίλ μιας επιφάνειας από τη φασματική διαμόρφωση σε ένα συμβολόγραμμα.

Ακολουθεί το πρακτικό κομμάτι, το οποίο περιλαμβάνει μια μικρή παρουσίαση του υπολογιστικού πακέτου MATLAB και μια μικρή παρουσίαση του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό διαφόρων δειγμάτων σε ψευδοκώδικα. Επίσης γίνεται εκτίμηση του σφάλματος της αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού. Τέλος παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη στο εργαστήριο και περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας και αναφέρονται τα σημαντικότερα προβλήματα που προέκυψαν στην πορεία και το πώς αυτά ξεπεράστηκαν.

Ακολουθούν οι μετρήσεις που έγιναν σε ένα νόμισμα, πλάκες πυριτίου, κάτοπτρα, πολυμερή και μία σαπουνόφουσκα, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών. Ακολουθούν κάποια γενικά συμπεράσματα και πιθανές βελτιώσεις όσων αφορά την πειραματική διάταξη, τον αλγόριθμο υπολογισμού του προφίλ και μετέπειτα δυνατότητες.

Κεφάλαιο 1.2: Αναφορά στις υπάρχουσες τεχνικές:

Η προφίλομετρία χωρίζεται χοντρικά σε δύο κατηγορίες:



1. Contact Profilometry – προφίλομετρία επαφής
2. Non-Contact Profilometry - Οπτική προφίλομετρία

Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν όλα τα όργανα που μετράει προφίλ επιφανειών όπου είναι αναγκαία η επαφή με το δείγμα. Κύριος εκπρόσωπος της κατηγορίας αυτής είναι τα προφιλόμετρα τύπου Stylus. Το προφίλ μετράται με τη χρήση μιας βελόνας από διαμάντι “Stylus tip” που σέρνεται ουσιαστικά πάνω στο δείγμα. Η κατακόρυφη μετατόπιση μεταφράζεται με τη βοήθεια ενός πιεζοηλεκτρικού ή ενός diode laser και ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή σε προφίλ. Έτσι προσδιορίζεται μια γραμμή – προφίλ του δείγματος, και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για άλλες γραμμές εάν χρειαστεί. Τυπικά χαρακτηριστικά ενός Stylus είναι το μέγεθος της βελόνας (διάμετρος 2 μ m), το tip load (0,05mg) και η ακρίβεια που θεωρείται κοντά στα 10 \AA .

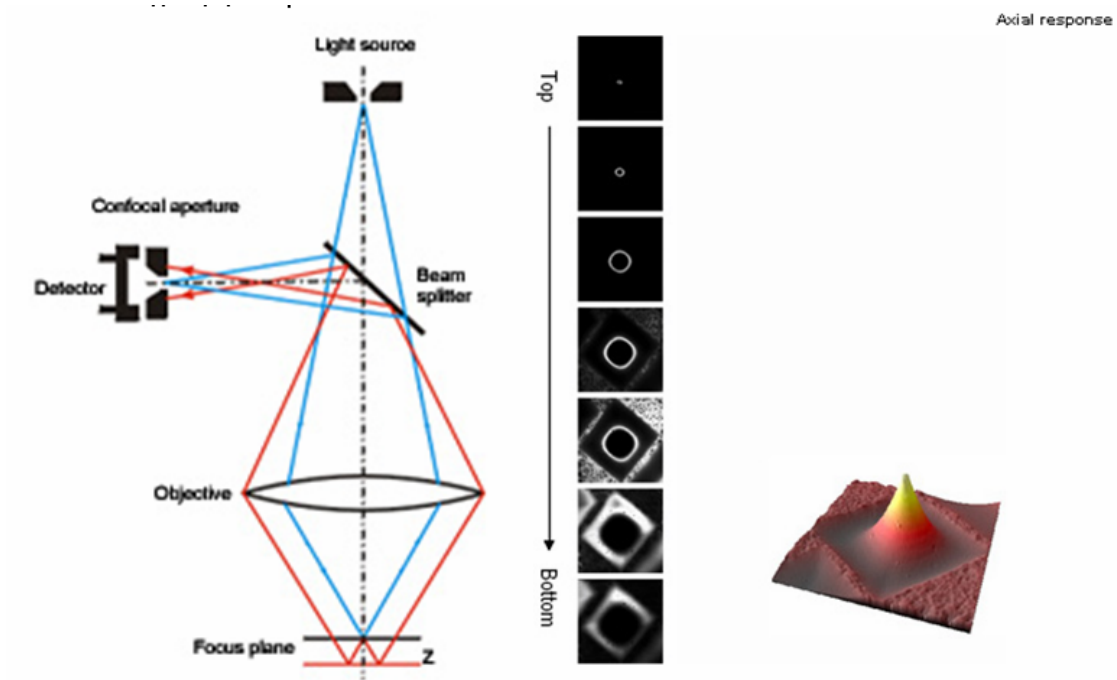
Τα θετικά στοιχεία της τεχνικής Stylus είναι ότι είναι σχετικά ακριβείς, είναι ευρέως διαθέσιμα στην αγορά και κυρίως ότι μπορούμε να μετρήσουμε το προφίλ μιας πολύ μεγάλης γραμμής με μία μέτρηση. Τα αρνητικά στοιχεία είναι κυρίως ότι πρόκειται για μια μέθοδο που απαιτεί επαφή με το δείγμα, συνεπώς μετά την μέτρηση ενός δείγματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αυτό να έχει αλλοιωθεί. Με την ίδια λογική η χρήση ενός Stylus δεν είναι δυνατή σε μαλακά δείγματα όπως ιστοί και άλλα βιολογικά υλικά. Άλλα αρνητικά είναι ότι έχουμε μέτρια εκτίμηση βάθους λόγω όγκου του tip, με μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για κάθε μέτρηση και ότι μπορούμε κάθε φορά να μετράμε μόνο το προφίλ μιας γραμμής και όχι μιας επιφάνειας.

Η δεύτερη κατηγορία προφιλόμετρων χωρίζεται σε πολλές υποκατηγορίες που δεν θα αναφέρω με λεπτομέρεια. Οι κυριότερες μέθοδοι είναι:

1. Focus Sensing Techniques – Συνεστιακή Μικροσκοπία
2. Interferometry based Methods

Η πρώτη κατηγορία λειτουργεί ως εξής:

Σκοπός της μεθόδου είναι να βρεθεί το βέλτιστο επίπεδο εστίασης ενός μικροσκοπίου πάνω στο δείγμα καθώς το κουνάμε μπρος – πίσω με χρήση πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (PZT). Κατά την μετακίνηση, αυξομειώνεται η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας I, η οποία μεγιστοποιείται πάνω ακριβώς στην εστία. Έτσι εφαρμόζοντας το παραπάνω για όλα τα σημεία του δείγματος, μπορούμε να βρούμε το προφίλ της επιφάνειας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αριστερά ένα σχήμα που αναπαριστά ένα συνεστιακό μικροσκόπιο και δεξιά η εικόνα που ανιχνεύεται κατά την μετακίνηση την φακό μικροσκοπίου. Η δομή δεξιά δημιουργήθηκε με τον συνδυασμό των 7 εικόνων που καταγράφηκαν.



Σχήμα α. Αρχή λειτουργίας συνεστιακού μικροσκοπίου

Τα θετικά στοιχεία της τεχνικής αυτή είναι ότι είναι εφαρμόσιμη σε ζωντανά δείγματα, συνεπώς είναι κατάλληλη σε ιατρικές εφαρμογές, είναι εμπορικά διαθέσιμη, είναι εύκολη στη χρήση, υλοποιείται σε φτηνά σχετικά συστήματα και παρέχει μεγάλο οπτικό πεδίο. Το μεγάλο αρνητικό της είναι ότι έχει πολύ κακή ακρίβεια, της τάξης του βάθους εστίας ενός φακού μικροσκοπίου $\sim 0,2\mu\text{m}$

Η δεύτερη κατηγορία προφιλόμετρων που χρησιμοποιεί το φαινόμενο της συμβολής για τον υπολογισμό του προφίλ χωρίζεται σε δύο γενικές κατηγορίες:

1. Laser Interferometry με κύριο εκπρόσωπο την τεχνική που ονομάζεται Phase Shifting Interferometry (PSI)
2. White Light Interferometry

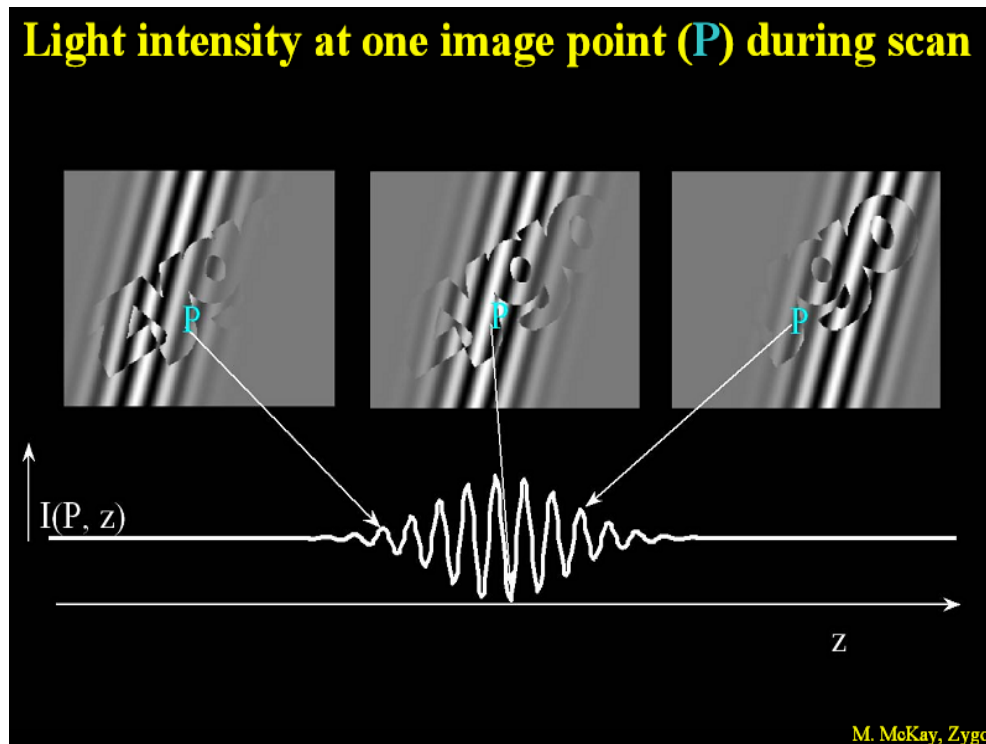
Η πρώτη κατηγορία χρησιμοποιεί μια πηγή laser και ένα συμβολόμετρο για να παράγει κροσσούς συμβολής. Στη συνέχεια το δείγμα ή ο καθρέπτης αναφοράς μετακινείται ένα μικρό διάστημα για να εισαχθεί τεχνικά διαφορά

φάσης ανάμεσα στη δύο κύματα που συμβάλουν στο συμβολόμετρο. Μετρώντας την αλλαγή στην κατανομή των κροσσών καθώς μεταβάλλουμε την διαφορά οπτικού δρόμου όσο την γνωστή σε μας απόσταση (με το πιεζοηλεκτρικό) υπολογίζουμε το προφίλ μιας επιφάνειας του δείγματος.

Τα θετικά στοιχεία αυτής της μεθόδου είναι κυρίως η τεράστια ακρίβεια που έχει, και είναι της τάξης του $\lambda/100$. Προστίθεται το γεγονός ότι δεν υπάρχει αλλοίωση του δείγματος, είναι εμπορικά διαθέσιμη αν και σχετικά ακριβή, έχει τεράστια χωρική ανάλυση και μετράμε πραγματικό τρισδιάστατο προφίλ επιφάνειας και όχι γραμμής πολύ γρήγορα. Το κύριο αρνητικό είναι ότι έχουμε μία απροσδιοριστία (ambiguity) της τάξης του $\lambda/2$ ή αλλιώς φάσης π λόγω του μεγάλου μήκους συμφωνίας του laser. Αυτό σημαίνει ότι σε δείγματα έχουν σχετικά απότομη μεταβολή ύψους στα σημεία της επιφάνειας τους δεν μπορούμε να έχουμε σωστές μετρήσεις. Στην πράξη δεν μπορούμε να διακρίνουμε αν η διαφορά ύψους ανάμεσα σε δύο σημεία είναι α , $\alpha+\lambda/2$, $\alpha+2\lambda/2$, $\alpha+3\lambda/2$ κτλ. Άλλα αρνητικά είναι ο πολύ δαπανηρός εξοπλισμός, η μεγάλη ευαισθησία σε κραδασμούς και η αδυναμία εφαρμογής της μεθόδου σε ζωντανά δείγματα και τραχιά δείγματα.

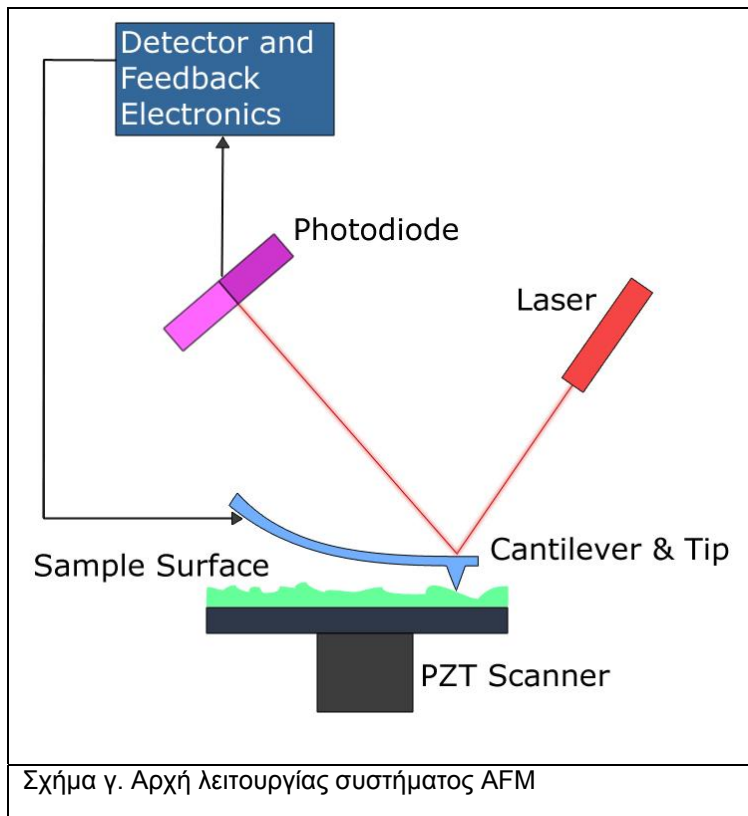
Η τελευταία κατηγορία είναι τα η συμβολομετρία λευκού φωτός που μοιάζει με την PSI, με την θεμελιώδη διαφορά ότι αντί για ένα laser χρησιμοποιεί μία πηγή ευρέως φάσματος (π.χ. λάμπα λευκού φωτός) ως φωτεινή πηγή. Με την χρήση αυτή αυξάνεται το λειτουργικό εύρος πολλές φορές μιας και λόγω του μικρού μήκους συμφωνίας του λευκού φωτός τα συστήματα αυτά δεν υποφέρουν από την απροσδιοριστία $\lambda/2$. Το κόστος μιας τέτοιας διάταξης είναι και πάλι σχετικά υψηλό μιας και υπάρχουν και πάλι πιεζοηλεκτρικά και άλλα όργανα ακριβείας, ενώ ο όγκος των πληροφοριών προς επεξεργασία είναι τεράστιος και η διαδικασία σχετικά χρονοβόρα και ευαίσθητη. Και πάλι μια μικρή μετακίνηση του δείγματος ή του καθρέπτη αναφοράς είναι απαραίτητη, και συνεπώς δεν μπορούμε να παίρνουμε ταχύτατες μετρήσεις όπως στην τεχνική που περιγράφεται σε αυτήν την διπλωματική. Παρόλα αυτά η ακρίβεια είναι πολύ υψηλή ($\lambda/100$), και το προφίλ που υπολογίζεται είναι αυτό μιας επιφάνειας και όχι μιας γραμμής. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται καθαρά πως οι κροσσοί

περνάνε καθώς μεταβάλλουμε τον οπτικό δρόμο, στη συνέχεια από τον τρόπο μεταβολής των κροσσών σε σχέση με την αλλαγή της διαφοράς οπτικού δρόμου που εισάγουμε, υπολογίζουμε το προφίλ της επιφάνειας.



Σχήμα β. Μεταβολή πραγματικών κροσσών καθώς αλλάζει η διαφορά οπτικού δρόμου

Μια τελευταία κατηγορία συστημάτων είναι τα AFM: Atomic Force Microscopy. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ανίχνευση διαφόρων δυνάμεων μεταξύ υλικών όπως: δυνάμεις Van der Waals, ηλεκτροστατικές και μαγνητικές δυνάμεις, δυνάμεις χημικών δεσμών και capillary forces. Οι δυνάμεις αυτές ανιχνεύονται με τη βοήθεια μιας ακίδας (Cantilever tip), η μετατόπιση της οποίας καθώς αυτή περνάει πάνω από το δείγμα μετράται με βοήθεια ενός laser και μιας φωτοδιόδου. Καθώς το δείγμα είναι τοποθετημένο πάνω σε πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο εξασφαλίζεται να μην ακουμπήσει η ακίδα το δείγμα και προκληθεί ζημιά. Η αρχή λειτουργίας φαίνεται στο Σχήμα γ.



Το μεγάλο θετικό αυτής της μεθόδου είναι η τεράστια ακρίβεια λόγω της μεγάλης ευεσθησίας της ακίδας, δυστυχώς όμως έχει πολύ μικρή περιοχή που μπορούμε να μετρήσουμε με κάθε μέτρηση. Επίσης ένα τέτοιο σύστημα έχει πολύ υψηλό κόστος (περίπου 80.000euro)

Το σύστημα που αναπτύχθηκε σε αυτήν την διπλωματική μετράει το προφίλ μιας γραμμής του δείγματός μας (συνεπώς υστερεί από τις μεθόδους που μετράνε επιφάνεια), χωρίς καμία μετακίνηση του δείγματος με τη χρήση φασματοσκοπικής συμβολομετρίας και ρυθμό που καθορίζεται μόνο από το framerate της κάμερας. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας που γίνονται οι ρυθμίσεις (χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων μπορεί να φτάσει τα 50ms) και λόγω της οπτικής μεθόδου, είναι κατάλληλο για μέτρηση δειγμάτων που αλλάζουν το προφίλ τους στο χρόνο ή ακόμα για την μετρηση της κατανομής του δείκτη διάθλασης σε διαφανεί υλικά όπως π.χ. ο κερατοειδής.

Κεφάλαιο 2: Κυματική Οπτική

Όπως είναι γνωστό το φως είναι ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα που περιγράφεται από τις εξισώσεις Maxwell:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho, & \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \operatorname{curl} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \operatorname{curl} \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{aligned}$$

\mathbf{D} ηλεκτρική μετατόπιση
 \mathbf{E} ένταση ηλεκτρικού πεδίου
 \mathbf{P} ηλεκτρική πόλωση
 \mathbf{j} πυκνότητα ρεύματος

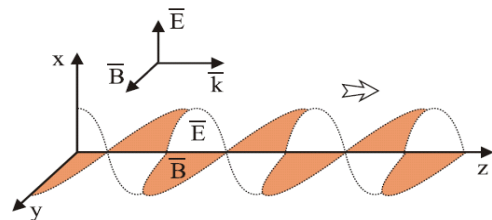
\mathbf{B} μαγνητική επαγωγή
 \mathbf{H} ένταση μαγνητικού πεδίου
 \mathbf{M} μαγνήτιση
 ρ πυκνότητα φορτίου

ϵ_0 ηλ. διαπερατότητα του κενού
 ϵ ηλ. διαπερατότητα του μέσου
 ϵ_r διηλεκτρική σταθερά

μ_0 μαγ. διαπερατότητα του κενού
 μ μαγ. διαπερατότητα του μέσου
 μ_r σχετική μαγ. διαπερατότητα

Οι παραπάνω εξισώσεις διατυπώθηκαν από τον **James Clerk Maxwell** το 1861 στη δημοσίευση “*On Physical Lines of Force*”, και παρουσιάστηκαν σαν ένα σετ εξισώσεων όλες μαζί το 1884 από τους **Oliver Heaviside** και **Willard Gibbs**.

Τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ταλαντώνονται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του φωτός, όπως φαίνεται στα δεξιά:



Σχήμα 1. Διάνυσμα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου φωτός

Όπως κάθε κύμα, έτσι και το φως χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} : \text{συχνότητα (Hz)}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f : \text{κυκλική συχνότητα (rad / sec)} \quad \text{όπου:}$$

$$\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{n} : \text{κυματοδιάνυσμα}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{κυματάριθμος} \left(\frac{1}{m} \right)$$

$$T : \text{περίοδος} \left(\frac{1}{\text{sec}} \right)$$

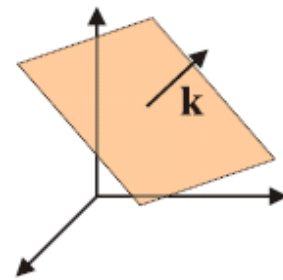
$$\lambda : \text{μήκος κύματος (m)}$$

$$c : \text{ταχύτητα του φωτός}$$

Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε να κάνουμε μόνο με επίπεδα μέτωπα κύματος, μπορούμε να τα περιγράψουμε με την σχέση:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_0 e^{i(\bar{k}\bar{r} - \omega t)} \\ \text{ή αλλιώς} \\ E &= E_0 \cos(\bar{k}\bar{r} - \omega t) \end{aligned} \right\} \text{που περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο.}$$

όπου $\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{n}$



Σχήμα 2. Επίπεδο μέτωπο κύματος

Εάν το επίπεδο μέτωπο κύματος διαδίδεται στον z άξονα η παραπάνω εξίσωση

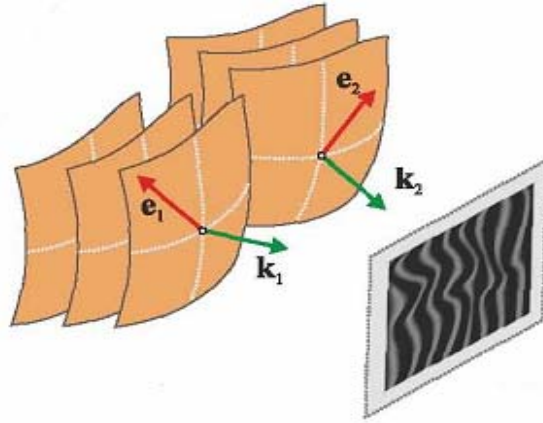
γράφεται: $E = E_0 \cos(kz - \omega t)$.

Το ηλεκτρικό πεδίο του Η/Μ κύματος ταλαντώνεται πολύ γρήγορα με συχνότητα από 430 έως 750 THz), έτσι στην πραγματικότητα ένας ανιχνευτής Η/Μ ακτινοβολίας στο ορατό μετράει την μέση τιμή του ηλεκτρικού πεδίου. Το

μέγεθος αυτό ονομάζεται ένταση του ηλεκτρικού πεδίου: $I = \langle E^2 \rangle_T = \frac{c\epsilon_0}{2} EE^*$,

όπου ο τελεστής $\langle \cdot \rangle_T$ συμβολίζει χρονική μέση τιμή, ενώ το E^* είναι το μιγαδικό συζυγές του E .

Κεφάλαιο 2.1: Συμβολή



Σχήμα 3. Συμβολή δύο μετώπων κύματος

Όπως κάθε κύμα έτσι και το φως εμφανίζει το φαινόμενο της συμβολής. Συμβολή ονομάζεται η υπέρθεση δύο η περισσότερων κυμάτων με συνέπεια τη δημιουργία ενός νέου κύματος. Έτσι ανάλογα με τη μορφή των δύο αρχικών κυμάτων αλλάζει και η μορφή του παραγόμενου κύματος από τη συμβολή τους.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο επίπεδα κύματα με ένταση ηλεκτρικού πεδίου \bar{E}_1 και \bar{E}_2 αντίστοιχα, συμβάλουν στον χώρο, τότε το πεδίο που προκύπτει από τη συμβολή τους θα είναι $\bar{E}_{ολικό} = \bar{E}_1 + \bar{E}_2$. Ας δεχτούμε ότι τα δύο κύματα έχουν ίδια μήκη κύματος και συνεπώς και ίδιες κυκλικές συχνότητες ω . Έτσι οι εντάσεις των πεδίων δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{cases} \bar{E}_1 = E_{01} \cos(\bar{k}_1 \bar{r} - \omega t + \varepsilon_1) \\ \bar{E}_2 = E_{02} \cos(\bar{k}_2 \bar{r} - \omega t + \varepsilon_2) \end{cases} \text{όπου } \varepsilon_1 \text{ και } \varepsilon_2 \text{ είναι η αρχική φάση των κυμάτων.}$$

Μιας και έχουμε ήδη αναφέρει ότι $I = \langle E^2 \rangle_T = \frac{c\varepsilon_0}{2} \mathbf{E} \mathbf{E}^*$ Έτσι η ένταση ακτινοβολίας για το τελικό κύμα είναι:

$$I_{ολικό} = \frac{c\varepsilon_0}{2} \langle \bar{E}_{ολικό}^2 \rangle_T = \frac{c\varepsilon_0}{2} \langle \bar{E}_{ολικό} \bar{E}_{ολικό} \rangle_T = \frac{c\varepsilon_0}{2} \langle (\bar{E}_1 + \bar{E}_2)(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) \rangle_T = \frac{c\varepsilon_0}{2} \langle \bar{E}_1^2 + \bar{E}_2^2 + 2\bar{E}_1 \bar{E}_2 \rangle_T$$

$$I_{ολικό} = \frac{c\varepsilon_0}{2} \langle \bar{E}_1^2 \rangle_T + \frac{c\varepsilon_0}{2} \langle \bar{E}_2^2 \rangle_T + 2 \langle \bar{E}_1 \bar{E}_2 \rangle_T = I_1 + I_2 + 2I_{12}$$

Όπου I_1 και I_2 η ένταση ακτινοβολίας των δύο κυμάτων αντίστοιχα, και I_{12} ο επονομαζόμενος όρος συμβολής. Περαιτέρω μπορούμε να γράψουμε:

$$I_{12} = \langle \bar{E}_1 \bar{E}_2 \rangle_T = \langle \bar{E}_{01} \bar{E}_{02} [\cos(\bar{k}_1 \bar{r} - \omega t + \varepsilon_1) \times \cos(\bar{k}_2 \bar{r} - \omega t + \varepsilon_2)] \rangle_T$$

$$I_{12} = \left\langle \bar{E}_{01} \bar{E}_{02} \left[\cos(\bar{k}_1 \bar{r} + \varepsilon_1) \cdot \cos(\omega t) + \sin(\bar{k}_1 \bar{r} + \varepsilon_1) \sin(\omega t) \right] \right. \\ \left. \times \left[\cos(\bar{k}_2 \bar{r} + \varepsilon_2) \cdot \cos(\omega t) + \sin(\bar{k}_2 \bar{r} + \varepsilon_2) \sin(\omega t) \right] \right\rangle_T$$

Αλλά αφού για κάθε συνάρτηση f , η χρονική μέση τιμή είναι $\langle f(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t') dt$
Και παίρνοντας υπόψη

$$\langle \cos^2(\omega t) \rangle_T = \frac{1}{2}, \quad \langle \sin^2(\omega t) \rangle_T = \frac{1}{2} \quad \text{και} \quad \langle \cos(\omega t) \sin(\omega t) \rangle_T = 0$$

Έχουμε: $I_{12} = \bar{E}_{01} \bar{E}_{02} \cos(\bar{k}_1 \bar{r} - \bar{k}_2 \bar{r} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \bar{E}_{01} \bar{E}_{02} \cos(\delta)$

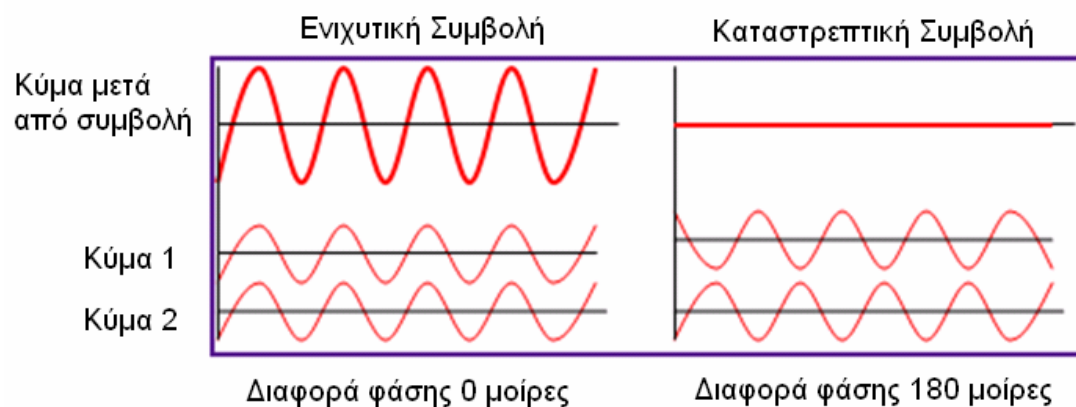
Όπου δ είναι η συνολική διαφορά φάσης των δύο κυμάτων, που αποτελείται από τη διαφορά φάσης λόγω διαφοράς οπτικού δρόμου $\bar{k}_1 \bar{r} - \bar{k}_2 \bar{r}$, συν την αρχική διαφορά φάσης των δύο κυμάτων $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$.

Στην περίπτωση που τα δύο κύματα έχουν την ίδια κατάσταση πόλωσης η τελευταία σχέση γίνεται $I_{12} = E_{01} E_{02} \cos(\delta)$ και τελικά γράφοντας

$$I_1 = \langle \bar{E}_1^2 \rangle_T = \frac{E_{01}^2}{2} \quad I_2 = \langle \bar{E}_2^2 \rangle_T = \frac{E_{02}^2}{2} \quad I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$$

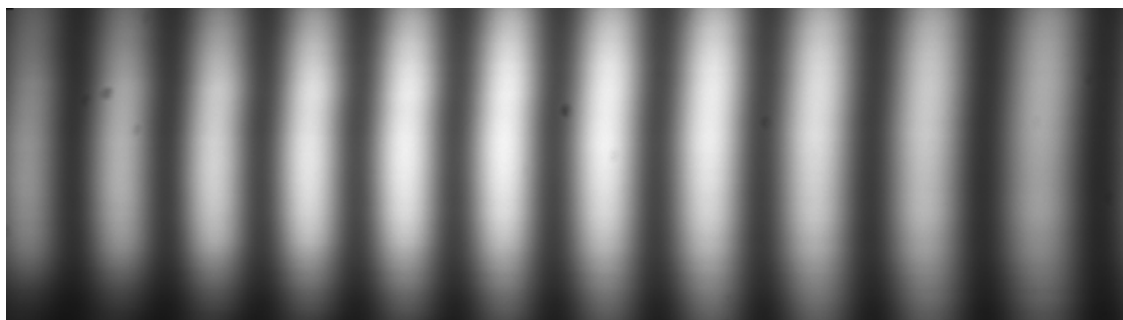
η σχέση συμβολής με εντάσεις ακτινοβολίας γίνεται: $I_{ολικό} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$

Στην ιδιαίτερη περίπτωση που τα δύο κύματα έχουν το ίδιο πλάτος μπορούμε να έχουμε είτε ενισχυτική είτε καταστρεπτική, είτε ενδιάμεσες καταστάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα φαίνεται παρακάτω για $\delta=0$ και $\delta=180$ μοίρες:



Σχήμα 4. Ενισχυτική και Καταστρεπτική συμβολή δύο κυμάτων με ίσο πλάτος

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της συμβολή δύο κυμάτων είναι η εμφάνιση κροσσών συμβολής στο τελικό κύμα. Οι κροσσοί είναι φωτεινοί και σκοτεινοί λοβοί στο τελικό κύμα, και γίνονται ορατοί εάν το κύμα προσπέσει σε ένα πέτασμα ή έναν ανιχνευτή (όπως μια CCD Camera). Μια εικόνα κροσσών συμβολή φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 5. Κροσσοί Συμβολής

Στα σημεία που έχουμε φωτεινό λοβό έχουμε ενισχυτική συμβολή, ενώ αντιθέτως στους σκοτεινούς λοβούς έχουμε καταστρεπτική συμβολή.

Κεφάλαιο 2.2: Συμβολόμετρα και Surface Profiling

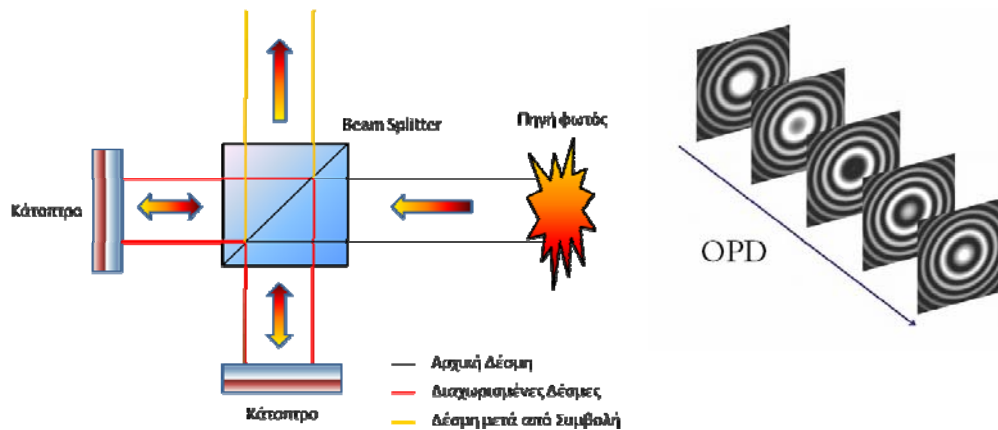
Συμβολή πετυχαίνουμε πειραματικά με χρήση ενός συμβολόμετρου. Υπάρχουν πολλοί τύποι συμβολόμετρων με σημαντικότερα τα τύπου Michelson και Mirau, που κατατάσσονται στα συμβολόμετρα διαχωρισμού πλάτους. Σε κάθε ένα από τα παραπάνω, φως από μία πηγή χωρίζεται σε δύο δέσμες με τη βοήθεια ενός διαχωριστή δέσμης (beam splitter), και έπειτα οι δύο δέσμες ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές η κάθε μία και ξαναβρίσκονται τελικά στον ίδιο χώρο με αποτέλεσμα να έχουμε τη συμβολή των δύο κυμάτων.

Για χάριν απλότητας ας θεωρήσουμε ότι οι το αρχικό μέτωπο κύματος είναι μονοχρωματικό, δηλαδή περιέχει μόνο ένα μήκος κύματος λ έχοντας έτσι μηδενικό φασματικό εύρος. Τέτοιου είδους πηγές είναι σε ένα βαθμό τα laser με στενό φασματικό εύρος. Απ την άλλη πλευρά, όλες οι συμβατικές λάμπες πυρακτώσεως, κεριά LED κ.α. έχουν από σχετικά στενό (~ 10 nm) μέχρι πολύ μεγάλο (>100 nm) φασματικό εύρος. Σε αυτό το κεφάλαιο θεωρούμε όλα τα μέτωπα κύματος μονοχρωματικά, με συμβολή πολυχρωματικού φωτός θα ασχοληθούμε με λεπτομέρεια σε επόμενο κεφάλαιο.

Συμβολόμετρο Michelson

Το συμβολόμετρο Michelson που κατασκευάστηκε από τον Abraham Michelson στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, είναι ίσως το αντιπροσωπευτικό από τα υπόλοιπα, λόγω την απλότητας καθώς και στην σχετική ευκολία κατασκευής του. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η δέσμη που έρχεται από την πηγή στα δεξιά και χωρίζεται στα δύο από ένα διαχωριστή δέσμης. Η κάθε μία από τις δύο δέσμες διαδίδεται, ανακλάται σε ένα κάτοπτρο και επιστρέφει στον διαχωριστή δέσμης. Όταν φτάσουν ξανά στο διαχωριστή δέσμης, οι δύο δέσμες επανασυντίθενται και συμβάλουν έχοντας διανύσει η κάθε μία διαφορετικό οπτικό δρόμο,.

Η όλη διαδικασία περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα:



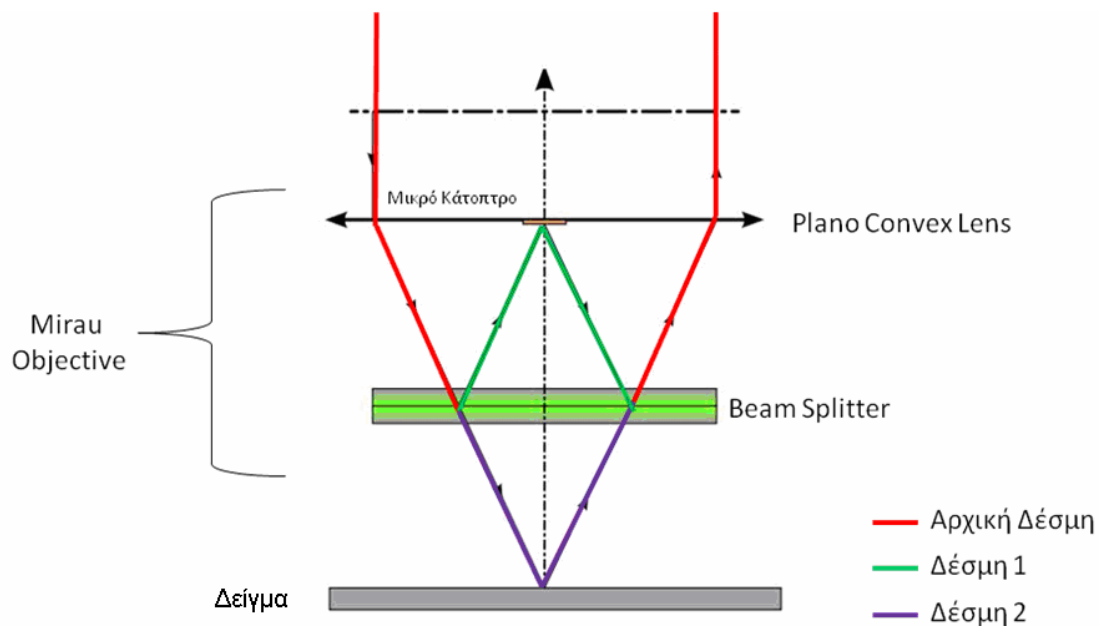
Σχήμα 6. Συμβολόμετρο Michelson και μεταβολή κροσσών συμβολής καθώς αλλάζει η διαφορά οπτικού δρόμου (OPD)

Καθώς μεταβάλλουμε τη διαφορά οπτικού δρόμο (OPD) ανάμεσα στα δύο μέτωπα κύματος μετακινώντας το ένα από τα δύο κάτοπτρα, μεταβάλλεται και η κατανομή των κροσσών στο τελικό κύμα όπως φαίνεται και παραπάνω.

Εδώ όμως πρέπει να αναφέρουμε ότι οπτικός δρόμος (OPD) καλείται η απόσταση d που διανύει το φως, πολλαπλασιασμένο με το δείκτη διάθλασης n του υλικού στο οποίο διαδίδεται $OPD = d \cdot n$. Οπότε εάν σε έναν από τους δύο αρμούς του συμβολόμετρου παρεμβάλλεται ένα υλικό όπως γυαλί, ή οποιοδήποτε άλλο υλικό με διαφορετικό δείκτη διάθλασης από αυτόν του αέρα πρέπει να το πάρουμε υπόψη μας στον συνολικό υπολογισμό του οπτικού δρόμου.

Συμβολόμετρο Mirau

Το συμβολόμετρο Mirau είναι μεταγενέστερο από το Michelson, κατασκευάστηκε από τον André Henri Mirau και έγινε πατέντα το 1949. Είναι ουσιαστικά ένα συμβολόμετρο που μοιάζει με ένα Michelson διπλωμένο σε έναν μόνο άξονα. Φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 7. Συμβολόμετρο Mirau

Το συμβολόμετρο αποτελείται από έναν επιπεδόκυρτο φακό (plano convex lens) εστιακού μήκους f , που πάνω στην επίπεδη πλευρά του έχει τοποθετημένο ένα μικρό κάτοπτρο. Επιπλέον υπάρχει ένας διαχωριστής δέσμης σταθερά τοποθετημένος σε απόσταση $f/2$ από τον φακό. Το όλο σύστημα είναι ευθυγραμμισμένο στον άξονα διάδοσης του φωτός όπως φαίνεται στο σχήμα και αποτελεί το Mirau Objective, και αντιμετωπίζεται σαν ένα ενιαίο κομμάτι στο εργαστήριο. Δεύτερο κάτοπτρο τοποθετείται σε απόσταση $f/2$ από το objective.

Η αρχή λειτουργίας έχει ως εξής: Φως που προέρχεται από την πηγή εισέρχεται στον συμβολόμετρο και εστιάζεται από τον επιπεδόκυρτο φακό ακριβώς πάνω στο μεγάλο κάτοπτρο. Στη διαδρομή αυτή μέρος του φωτός ανακλάται από το διαχωριστή δέσμης προς τα πίσω και προσπίπτει πάνω στο μικρό κάτοπτρο πάνω στον φακό, το οποίο ξανά ανακλά το φως προς τα εμπρός για να ανακλαστεί ξανά από τον διαχωριστή δέσμης και να γυρίσει προς τη διεύθυνση της πηγής. Το άλλο μέρος της δέσμης που δεν ανακλάστηκε από την αρχική πρόσπτωση πάνω στον διαχωριστή δέσμης εστιάζεται κανονικά πάνω

στο δείγμα και ανακλάται πίσω στο διαχωριστή. Εκεί στο διαχωριστή, τα δύο μέτωπα κύματος συμβάλουν. Με τη βοήθεια ενός δεύτερου διαχωριστή δέσμης πριν το Mirau Objective μπορούμε να κατευθύνουμε την τελική δέσμη που προέκυψε από την συμβολή σε έναν ανιχνευτή.

Και εδώ όπως και πριν μεταβάλλοντας τη θέση του ενός κατόπτρου (στην συγκεκριμένη περίπτωση του μεγάλου) μπορούμε να αλλάξουμε την διαφορά οπτικού δρόμου ανάμεσα στους δύο αρμούς για να πάρουμε έτσι διάφορες κατανομές κροσσών.

Surface Profiling

Το surface profiling με τη βοήθεια συμβολόμετρων είναι πλέον μια διαδεδομένη λύση για πολλά προβλήματα της μετρολογίας. Η μεγάλη πλειονότητα των μεθόδων χρησιμοποιούν ένα laser (συνήθως διοδικό) για πηγή φωτός, συνήθως στην ορατή περιοχή του φάσματος για ευκολία στη χρήση. Το δείγμα που προορίζεται για μέτρηση προφίλ τοποθετείται ως κάτοπτρο στον ένα αρμό του συμβολόμετρου και το όλο σύστημα φωτοβολείται από την πηγή που έχουμε επιλέξει. Στην έξοδο της διάταξης τοποθετείται CCD αισθητήρας και ηλεκτρονικός υπολογιστής για την συλλογή των εικόνων συμβολής. Η κατανομή της έντασης στο συμβολόγραμμα (κροσσοί συμβολής) είναι πάρα ευαίσθητη σε αλλαγές του οπτικού δρόμου, έτσι κάθε αλλαγή στο σχήμα ή την περίοδο των κροσσών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τοπογραφίας της επιφάνειας του δείγματος που έχουμε τοποθετήσει.

Το μεγάλο αρνητικό αυτών των μεθόδων είναι ότι με χρήση laser, για πηγή φωτός, εξαιτίας του μεγάλου βαθμού συμφωνίας, , έχουμε μια αβεβαιότητα της τάξης του μήκους κύματος της πηγής μας στην υπολογιζόμενη διαφορά οπτικού δρόμου και τελικά στην τοπογραφία της επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει γιατί το δεν μπορούμε από ένα τέτοιο συμβολόγραμμα διακρίνουμε αλλαγές οπτικού που είναι ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος λ .

Κεφάλαιο 3: Συμβολή με λευκό φως

Όπως έχουμε αναφέρει και νωρίτερα στο κεφάλαιο 2, καθαρά μονοχρωματικές πηγές δεν υπάρχουν, ωστόσο κάποια laser πλησιάζουν κοντά σε αυτές. Το λευκό φως από την άλλη έχει εκτεταμένο φάσμα, και συνεπώς έχει χρονική ασυμφωνία. Εδώ είναι η ώρα να ορίσουμε κάποιους χρήσιμους όρους όπως ο χρόνος συμφωνίας, και το μήκος συμφωνίας μιας δέσμης φωτός:

- Χρόνος Συμφωνίας ονομάζεται ο χρόνος για τον οποίο το κύμα είναι σύμφωνο. Όπως αποδεικνύεται, ο χρόνος συμφωνίας και είναι αντιστρόφως ανάλογος του φασματικού εύρους της πηγής. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο το φασματικό εύρος μιας δέσμης φωτός, τόσο μικρότερος ο χρόνος συμφωνίας.
- Μήκος συμφωνίας ονομάζεται το διάστημα στο χώρο που διανύει μια δέσμη φωτός παραμένοντας σύμφωνο. Ισούται με το χρόνο συμφωνίας επί την ταχύτητα του φωτός στο υλικό που διαδίδεται.

Ο λόγος που αναφερόμαστε τώρα στην συμφωνία του φωτός είναι ότι για να παρατηρήσει κανείς κροσσούς συμβολής πρέπει αυτοί να είναι στατικοί, δηλαδή να μην μεταβάλλονται στο χρόνο. Αυτό συμβαίνει μόνο εφόσον η διαφορά το οπτικού δρόμου ανάμεσα στα δύο μέτωπα κύματος είναι μικρότερη από το μήκος συμφωνίας τους. Εδώ οφείλουμε να πούμε ότι και στην περίπτωση που η διαφορά οπτικού δρόμου είναι μεγαλύτερη από το μήκος συμφωνίας θα έχουμε και πάλι συμβολή των κυμάτων, απλώς δεν είναι δυνατόν να την ανιχνεύσουμε διότι η μορφή των κροσσών μεταβάλλεται πολύ γρήγορα, και έτσι εμείς ανιχνεύουμε μηδενική μέση τιμή.

Κεφάλαιο 3.1: Διαμόρφωση στο φάσμα εξαιτίας διαφοράς οπτικού δρόμου

Είχαμε αποδείξει ότι η γενική σχέση συμβολής για δύο κύματα είναι:

$$I_{ολικό} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$$

η οποία με μεγαλύτερη λεπτομέρεια γράφεται:

$$I(\mathbf{r}, \lambda) = I_1(\mathbf{r}, \lambda) + I_2(\mathbf{r}, \lambda) + 2\sqrt{I_1(\mathbf{r}, \lambda) I_2(\mathbf{r}, \lambda)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L\right)$$

, όπου \mathbf{r} είναι το διάνυσμα θέσης στο σημείο που έχουμε συμβολή, λ το μήκος κύματος, και ΔL η διαφορά οπτικού δρόμου ανάμεσα στα δύο κύματα. Ο όρος που δημιουργεί την διαμόρφωση της έντασης στο χώρο που συναντιούνται τα δύο κύματα είναι το συνημίτονο, μιας και είναι ο μόνος όρος της παραπάνω εξίσωσης που μεταβάλλεται, γιατί όπως βλέπουμε όλοι οι υπόλοιποι όροι είναι σταθεροί.

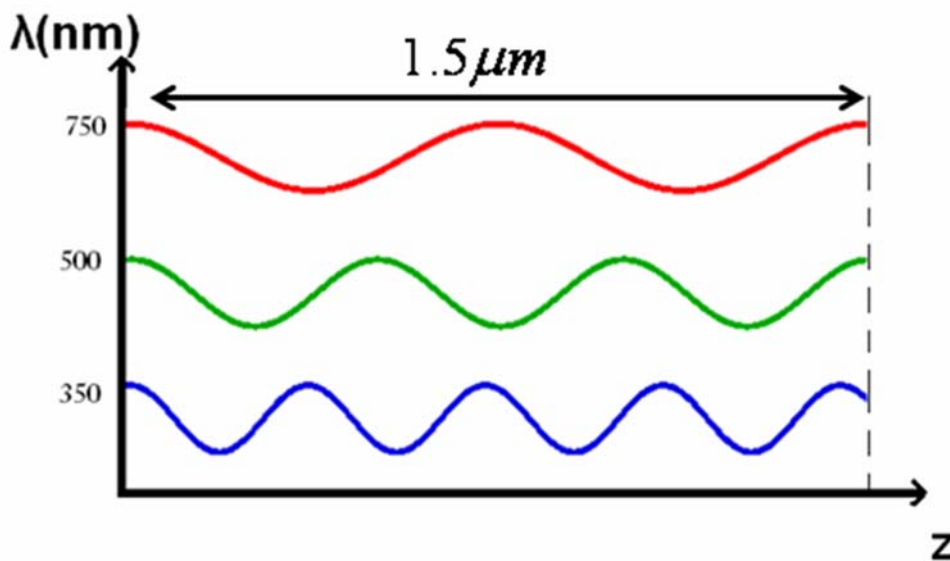
Μεταβολή στη φάση του κύματος μετά από την υπέρθεση των αρχικών δύο και συνεπώς κροσσούς συμβολής μπορούμε να έχουμε αν αλλάζει ο φασικός όρος $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$, δηλαδή στις εξής περιπτώσεις:

1. Αν αλλάζει η διαφορά οπτικού δρόμου ΔL
2. Αν μεταβληθεί το μήκος κύματος λ

Ειδικά για την δεύτερη περίπτωση πρέπει να διευκρινίσω ότι στην περίπτωση πολυχρωματικού φωτός (πχ λευκού φωτός από μια λάμπα πυρακτώσεως) θεωρούμε ότι η συνολική ακτινοβολία είναι ένα άθροισμα στοιχειωδών μονοχρωματικών κυμάτων. Και σε αυτήν την περίπτωση η γενική σχέση

συμβολής που έχουμε γράψει πιο πάνω ισχύει για κάθε φασματική συνιστώσα ξεχωριστά.

Έχοντας πει όλα αυτά, θα ήταν πολύ βοηθητικό να δούμε όντως πως διαφορετικά μήκη κύματος «βλέπουν» τον ίδιο οπτικό δρόμο σαν διαφορετική μεταβολή στη φάση. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε τρία κύματα με μήκη κύματος 750nm, 500nm και 350nm να διανύουν μία απόσταση 1500nm ή αλλιώς 1,5μm:

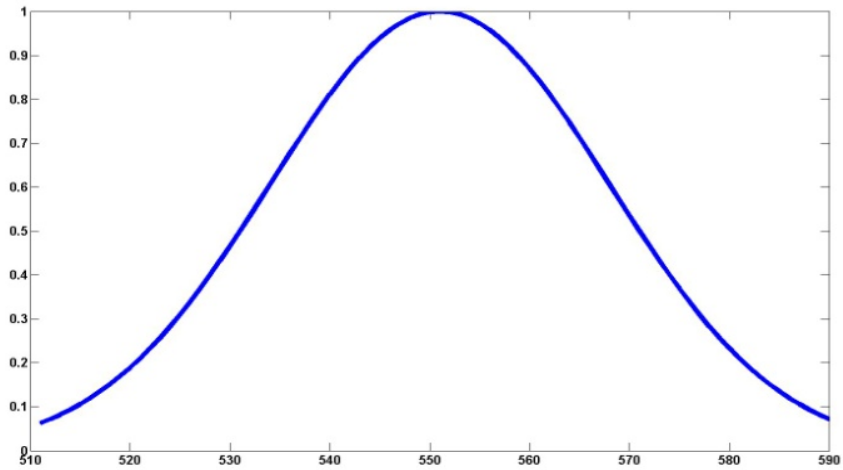


Σχήμα 8. Μετατόπιση 1,5μm για φως μήκους κύματος 350nm, 500nm και 750nm

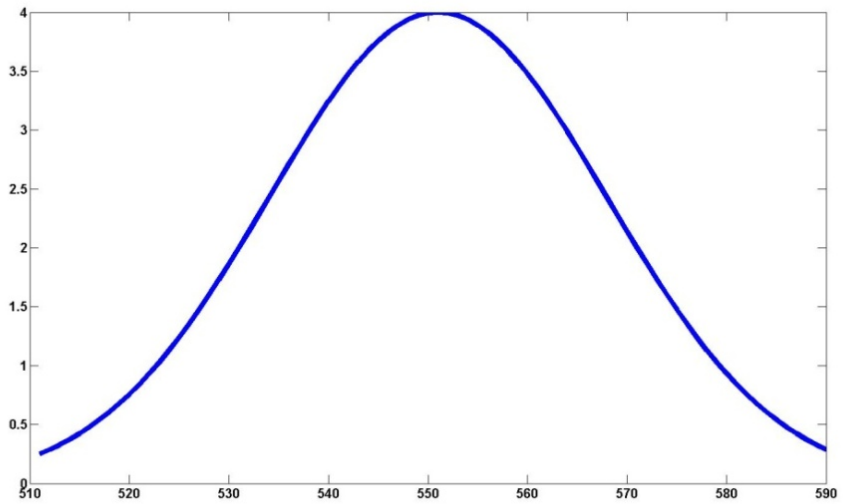
Βλέπουμε ότι το κόκκινο ($\lambda=750\text{nm}$) χρειάζεται δύο περιόδους για να διανύσει την απόσταση των 1,5μm που αντιστοιχεί σε αλλαγή στη φάση κατά 4π. Από την άλλη το πράσινο ($\lambda=500\text{nm}$) χρειάζεται τρεις περιόδους για να διανύσει την ίδια απόσταση ενώ το μπλε ($\lambda=350\text{nm}$) χρειάζεται παραπάνω από τέσσερις.

Είναι λοιπόν απόλυτα φυσικό να ισχύει και το αντίθετο, δηλαδή όταν έχουμε μια διαφορά στη φάση μεταξύ δύο κυμάτων με διαφορετικό λ , που έχουν διανύσει το ίδιο διάστημα, να μπορούμε να πάρουμε πληροφορία για το πόση είναι η αυτή η κοινή απόσταση. Για να το δούμε αυτό δεν έχει κανείς παρά να παρατηρήσει τα επόμενα διαγράμματα στα οποία φαίνονται δύο ίδιες πηγές που βρίσκονται σε φάση (έχουν αρχική διαφορά φάσης 0) σαν αυτές που παράγονται

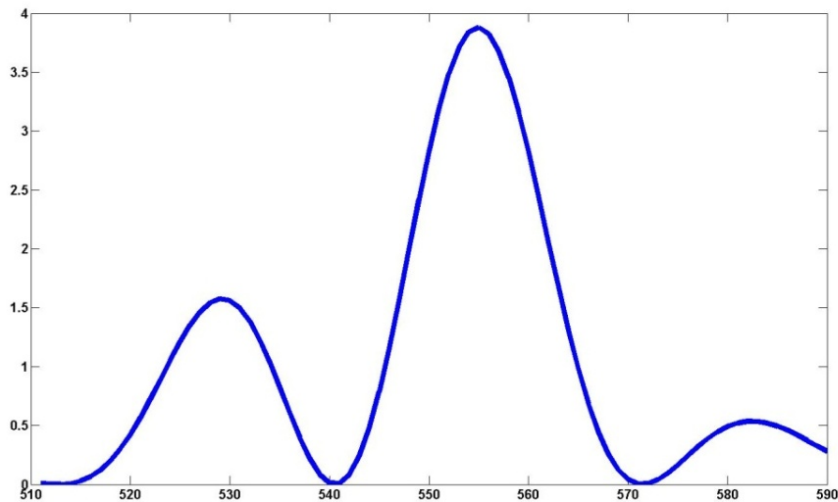
από ένα συμβολόμετρο Michelson να συμβάλουν. Στο πρώτο διάγραμμα η διαφορά οπτικού δρόμου είναι 0 και στο δεύτερο είναι 5μm.



Σχήμα 9. Ένταση ακτινοβολίας $I_1 = I_2$



Σχήμα 10. $I_{ολικό}$ μετά από συμβολή για διαφορά οπτικού δρόμου OPD=0



Σχήμα 11. $I_{ολικό}$ μετά από συμβολή για διαφορά οπτικού δρόμου $OPD=5\mu m$

Βλέπουμε λοιπόν καθαρά ότι όταν μεταβάλλεται η διαφορά οπτικού δρόμου έχουμε διαμόρφωση στο φάσμα και φασματικού κροσσούς!

Από την άλλη πλευρά, η συνολική ένταση σε ένα σημείο στο χώρο προκύπτει από το άθροισμα των εντάσεων όλων των φασματικών συνιστωσών. Έστω $I_1(\mathbf{r}, \lambda)$ η συνάρτηση φασματικής πυκνότητας (Power Spectral Density Function) της πηγής, δηλαδή η συνάρτηση που μας λέει πόση ένταση εκπέμπει η πηγή σε κάθε μήκος κύματος λ στη θέση \mathbf{r} . Εάν κανείς αθροίσει όλες τις φασματικές συνιστώσες $I_1(\mathbf{r}, \lambda)$ στις οποίες εκπέμπει μια πολυχρωματική πηγή ολοκληρώνοντας ως προς λ θα πάρει από την γενική σχέση συμβολής

$$I(\mathbf{r}, \lambda) = I_1(\mathbf{r}, \lambda) + I_2(\mathbf{r}, \lambda) + 2\sqrt{I_1(\mathbf{r}, \lambda)I_2(\mathbf{r}, \lambda)}\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta L\right)$$

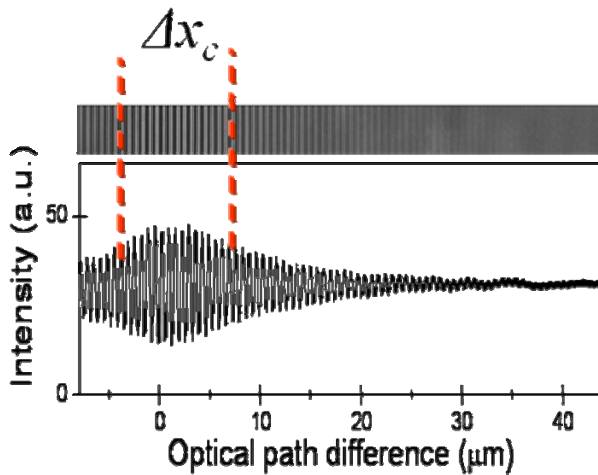
την παρακάτω:

$$I(\mathbf{r}) = \int I_1(\mathbf{r}, \lambda) d\lambda + \int I_2(\mathbf{r}, \lambda) d\lambda + 2 \int \sqrt{I_1(\mathbf{r}, \lambda) I_2(\mathbf{r}, \lambda)} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L\right) d\lambda$$

Που είναι η γενική σχέση συμβολής για πολυχρωματικό φως, ο τελευταίος όρος της οποίας, γνωστός και ως όρος συμβολής, προκύπτει να είναι:

$$2\sqrt{I_1(\mathbf{r})I_2(\mathbf{r})} |\gamma_{12}(\Delta L)| \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} \Delta L - a_{12}(\Delta L)\right]$$

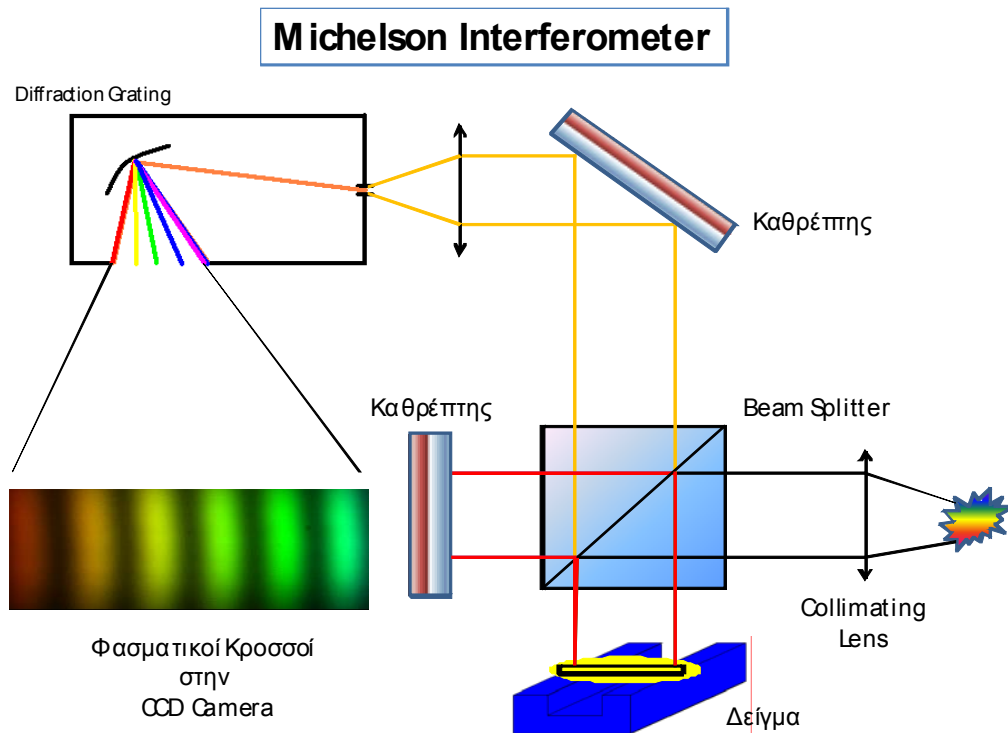
Η συνάρτηση γ_{12} είναι ο βαθμός συμφωνίας των δύο πηγών μας, και πολλαπλασιάζεται με το πλάτος της συνημίτονοειδούς διαμόρφωσης των κροσσών. Η “ γ ” μειώνεται όσο αυξάνεται το ΔL και εκφράζει την ευκρίνεια (visibility) των πραγματικών κροσσών (όχι των φασματικών). Η επίδραση της συνάρτησης “ γ ” φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου βλέπουμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από την μηδενική διαφορά οπτικού δρόμου το πλάτος της διαμόρφωσης μειώνεται και το visibility πέφτει:



Σχήμα 12. Ευκρίνεια πραγματικών κροσσών ως προς την διαφορά οπτικού δρόμου (σε μm) – μήκος συμφωνίας Δx_c

Το Full Width Half Maximum της συνάρτησης “ γ ” καθορίζει το μήκος συμφωνίας της ακτινοβολίας που περιγράφηκε στη αρχή του κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 3.2: Διαδικασία υπολογισμού profile επιφάνειας με συμβολή λευκού φωτός



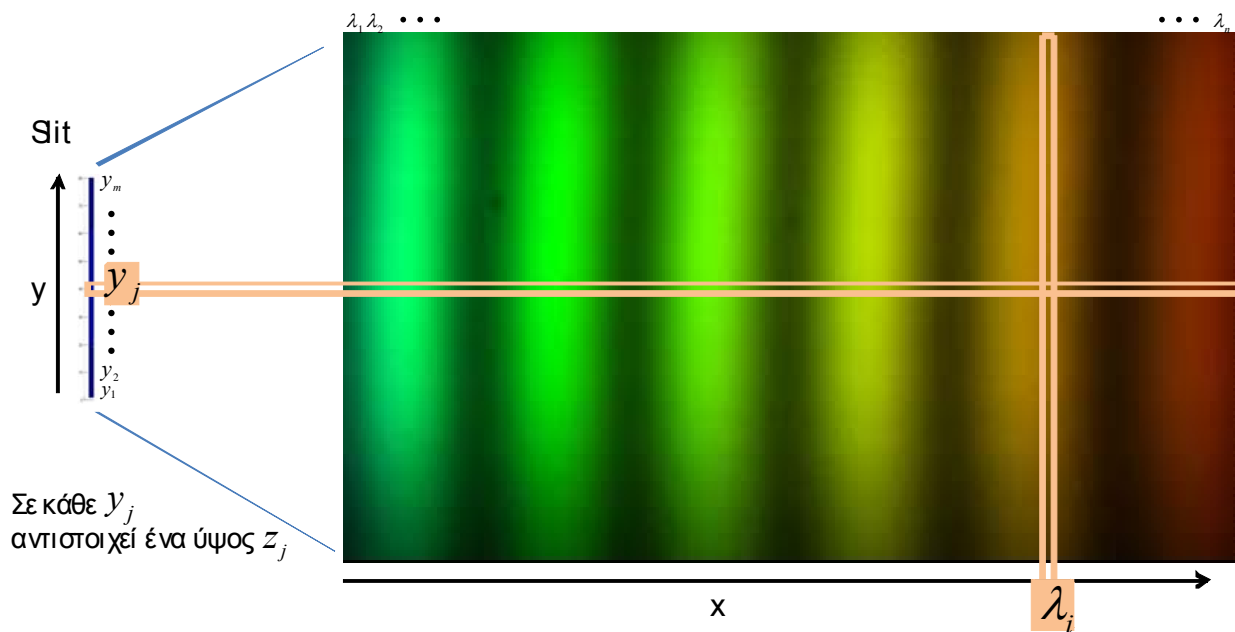
Σχήμα 13. Προφιλόμετρο με χρήση συμβολόμετρου Michelson – σχηματική αναπαράσταση της διάταξης στο εργαστήριο

Η ιδέα είναι να μετρήσουμε την διαφορά οπτικού δρόμου που διανύουν δύο δέσμες λευκού φωτός, που έχουν ανακλαστεί η μία από ένα τέλειο κάτοπτρο και η άλλη από το δείγμα που θέλουμε να μετρήσουμε. Χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο Michelson και έχοντας αντικαταστήσει το κάτοπτρο στον έναν αρμό με το δείγμα μας παίρνουμε στην έξοδο μια δέσμη που «κρύβει» στην κατανομή της φάσης της την πληροφορία για το προφίλ του δείγματος. Όπως και φαίνεται στο σχήμα παρακάτω:

Η δέσμη κατευθύνεται με έναν καθρέπτη. Με τη βοήθεια ενός συγκεντρωτικού φακού, η επιφάνεια του δείγματος απεικονίζεται στο επίπεδο της σχισμής (slit) εισόδου του φασματογράφου. Το μέρος της δέσμης που διέρχεται από την σχισμή εισόδου προσπίπτει πάνω σε ένα φράγμα περίθλασης, (diffraction

grating) που αναλύει τη δέσμη στις φασματικές συνιστώσες της. Οι συνιστώσες αυτές ανιχνεύονται μετά από έναν αισθητήρα CCD στην έξοδο.

Λόγω της γεωμετρίας της διάταξης, στην σχισμή εισόδου του φασματογράφου απεικονίζεται μια περιοχή που αντιστοιχεί σε μια λεπτή γραμμή στην επιφάνεια του δείγματος. Η γραμμή αυτή παράγει, όταν αναλυθεί στις φασματικές συνιστώσες της από το φράγμα περίθλασης, μια εικόνα στο επίπεδο του CCD. Κάθε γραμμή πάνω στο CCD αντιστοιχεί σε ένα σημείο στο slit, αναλυμένο στα διάφορα μήκη κύματος. Έτσι, αν πάρουμε από όλα τα σημεία στο slit μία γραμμή, δημιουργείται ένας πίνακας τιμών, που ανιχνεύεται από το CCD σαν μία εικόνα. Η δισδιάστατη εικόνα που μετράμε έχει ως κατακόρυφο άξονα τα σημεία μιας γραμμής του δείγματος όπως απεικονίζονται πάνω στο slit, ενώ ο οριζόντιος άξονας μετράει τα μήκη κύματος λ . Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι κάθε σημείο της εικόνας, κάθε pixel, είναι προϊόν συμβολής των δύο κυμάτων, και κρύβει πληροφορία για την διαφορά οπτικού δρόμου. Μια σχηματική αναπαράσταση φαίνεται παρακάτω:



Κάθε γραμμή από pixels απεικονίζει ένα σημείο του Slit μετά από τη συμβολή των δύο κυμάτων για όλα τα μήκη κύματος

Κάθε στήλη απεικονίζει το slit στο μήκος κύματος λ_i μετά από τη συμβολή των δύο κυμάτων

Κάθε pixel της **mxn** εικόνας μετράει το αποτέλεσμα της συμβολής φωτός μήκος κύματος λ_i (στήλη) στο σημείο y_j του Slit:

$$I_{\text{ολικό}}(z_j, \lambda_i) = I_{\text{ref}}(z_j, \lambda_i) + I_{\text{surf}}(z_j, \lambda_i) + 2\sqrt{I_{\text{ref}}(z_j, \lambda_i) I_{\text{surf}}(z_j, \lambda_i)} \cos\left(\frac{2\pi 2z_j}{\lambda_i} + \delta\phi\right)$$

Το γεγονός ότι το δείγμα απεικονίζεται πάνω στο επίπεδο του slit μας θέτει ένα ελάχιστο όριο στο πάχος της γραμμής της οποίας μετράμε, που είναι ίσο με το πλάτος του slit έχοντας πάρει υπόψη την μεγέθυνση που κάνει το οπτικό σύστημα στο δείγμα. Όσο πιο λεπτό το slit τόσο μικρότερη η επικάλυψη των φασματικών συνιστωσών και συνεπώς η ακρίβεια στον χρωματικό άξονα, ωστόσο το μικρό πλάτος του slit επιφέρει μείωση φωτισμού.

Καταλήγοντας, όπως είναι γνωστό η γενική σχέση συμβολής για πολυχρωματικό φως είναι :

$$I_{ολικό}(z_j, \lambda_i) = I_{ref}(z_j, \lambda_i) + I_{surf}(z_j, \lambda_i) + 2\sqrt{I_{ref}(z_j, \lambda_i)I_{surf}(z_j, \lambda_i)}\cos\left(\frac{2\pi 2z_j}{\lambda_i} + \delta\phi\right)$$

που αντιπροσωπεύει τις τιμές έντασης που ανιχνεύει το CCD στην έξοδο, όπου:

$I_{ολικό}(z_j, \lambda_i)$: Η τιμή της έντασης στο j σημείο του δείγματος για το μήκος κύματος λ_i μετά από συμβολή

$I_{ref}(z_j, \lambda_i)$: Η τιμή της έντασης στο j σημείο του κατόπτρου για το μήκος κύματος λ_i στον *reference* αρμό

$I_{surf}(z_j, \lambda_i)$: Η τιμή της έντασης στο j σημείο του δείγματος για το μήκος κύματος λ_i στον αρμό του δείγματος

$2z_j$: Η διαφορά οπτικού δρόμου στο j σημείο της γραμμής

$\delta\phi$: Η διαφορά στη φάση λόγω οπτικών

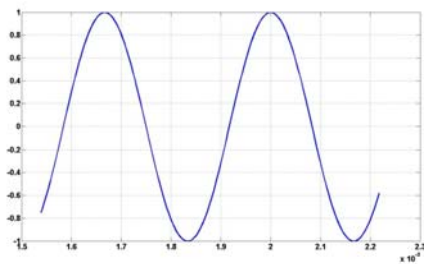
Στην παραπάνω σχέση όλοι οι όροι εκτός από τα συνημίτονο μπορούν να μετρηθούν άμεσα από τη διάταξη, και έτσι προκειμένου να υπολογίσουμε το z για όλα τα σημεία της γραμμής, και έτσι να σχηματίσουμε το προφίλ της, πρέπει να επιλύσουμε τον παραπάνω τύπο ως προς το συνημίτονο:

$$\cos\left(\frac{2\pi 2z_j}{\lambda_i} + \delta\phi\right) = \frac{I_{ολικό}(z_j, \lambda_i) - I_{ref}(z_j, \lambda_i) - I_{surf}(z_j, \lambda_i)}{2\sqrt{I_{ref}(z_j, \lambda_i)I_{surf}(z_j, \lambda_i)}}$$

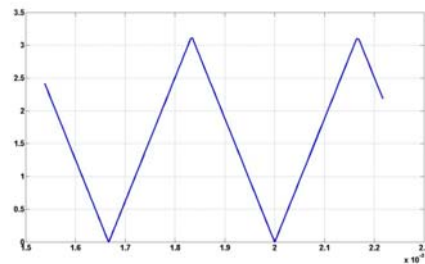
Ο δεξιά όρος της εξίσωσης είναι γνωστός γιατί μπορούμε να μετρήσουμε όλες τις ποσότητες απευθείας από τη διάταξη. Συνεπώς για να υπολογίσουμε σωστά το z για κάθε σημείο πρέπει να γνωρίζουμε δύο ποσότητες

1. Την φάση του συνημίτονου: $\Phi = \frac{2\pi 2z_j}{\lambda_i}$. Η οποία υπολογίζεται

απευθείας από το συνημίτονο με χρήση του τύπου: $\text{acos}(\cos(\phi)) = \phi$. Μια αναπαράσταση πως από ένα συνημίτονο παίρνουμε τη φάση του, και το πώς μοιάζει αυτή φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 14. Συνημίτονο



Σχήμα 15. Φάση Συνημίτονου

2. Την μεταβολή της φάσης ως προς τον κυματάριθμο κ , δηλαδή την ποσότητα $z_j = \frac{\Delta\phi(\kappa)}{\Delta\kappa}$. Για τον καθορισμό αυτής χρειάζονται θεωρητικά μόνο δύο τιμές γής φάσης για δύο δεδομένα κ . Στην πράξη όμως τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα και θα χρειαστεί να υπολογίσουμε την κλίση της φάσης ως προς τον κυματάριθμο κ , που στην πράξη είναι η κλίση της ευθείας της φάσης στο χώρο του κ . Η κλίση της φάσης όπως βλέπουμε και παραπάνω είναι σταθερή και αντιστρέφεται περιοδικά ώστε να έχουμε μια πριονωτή μορφή. Συνεπώς θα υπολογίσουμε την κλίση της φάσης αφού αυτή ξεδιπλωθεί όπως θα δούμε παρακάτω.

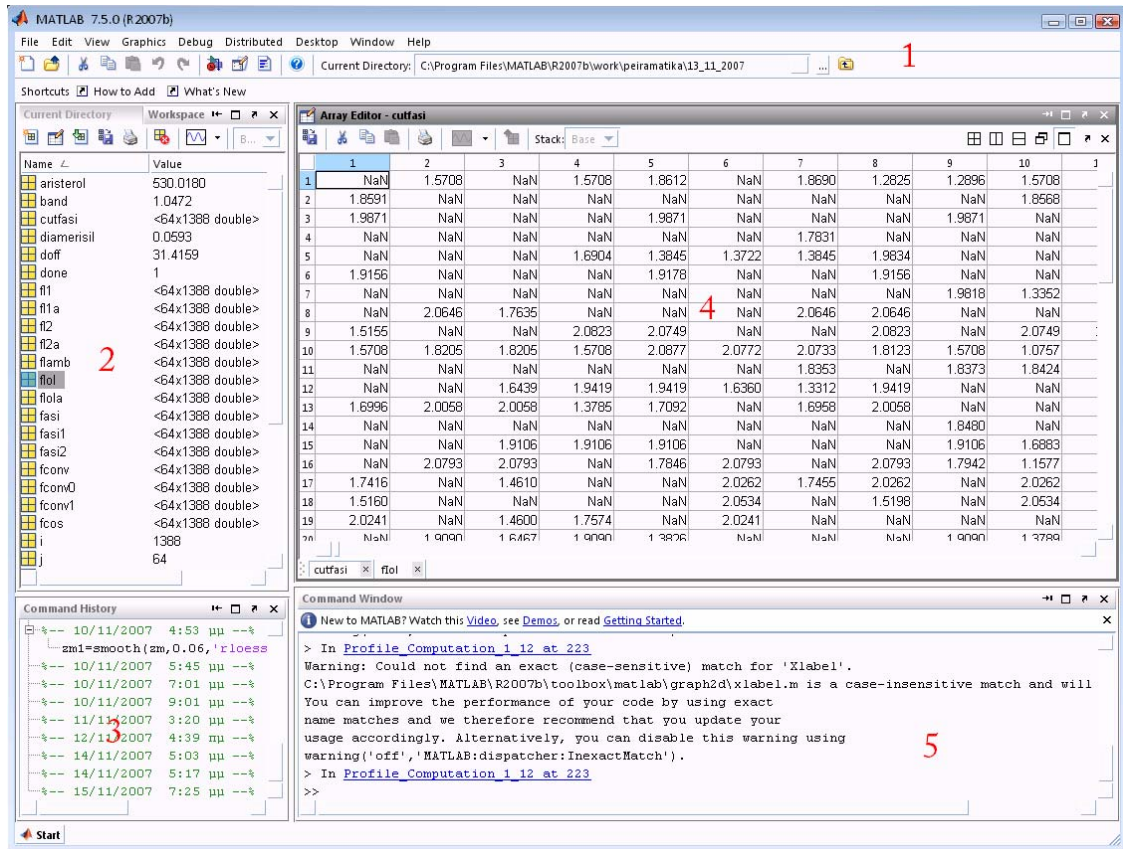
Κεφάλαιο 4: Simulation

Σε κάθε φυσικό πρόβλημα που πρόκειται να λυθεί με τη βοήθεια μοντελοποίησης και μιας αριθμητικής μεθόδου είναι καλό κανείς πρώτα να παράγει κάποια simulated data ώστε να εφαρμόσει εκεί πρώτα την αριθμητική μέθοδο. Το προτέρημα με αυτήν τη προσέγγιση είναι ότι: κανείς δημιουργεί μια εικονική αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος ο ίδιος, και έτσι μπορεί να ελέγξει την αποτελεσματικότητα της αριθμητικής μεθόδου άμεσα, μιας και ξέρει τι περιμένει να δει ως αποτέλεσμα. Σε αυτή την εργασία ο σχεδιασμός του αλγόριθμου υπολογισμού προφίλ καθώς και ο αλγόριθμος για την παραγωγή «προσομοιωμένων εικόνων» από simulated data έγιναν πριν την τελειοποίηση της πειραματικής διάταξης στο εργαστήριο.

Κεφάλαιο 4.1: Το περιβάλλον MATLAB

Το υπολογιστικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των αλγορίθμων ήταν το MATLAB. Η λέξη MATLAB είναι τα αρχικά MAtrix LABoratory και όπως αναμένεται σχεδιάστηκε αρχικά για την εύκολη και αποδοτική δημιουργία και χρήση πινάκων. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα προγράμματα MATLAB για την επίλυση προβλημάτων σε πανεπιστήμια και ερευνητικά εργαστήρια, πολλά από τα οποία περιλαμβάνονται σαν toolboxes στο κυρίως πρόγραμμα ή σαν επιπλέον add-ons. Τα toolboxes αυτά είναι μια συλλογή συναρτήσεων της MATLAB ή αλλιώς M-files, και περιλαμβάνουν λύσεις σε τομείς όπως επεξεργασία σήματος, νευρωνικά δίκτυα, βιο-πληροφορική, και κυματική ανάλυση.

Το γραφικό περιβάλλον της MATLAB αποτελείται από 5 κυρίως κομμάτια που φαίνονται παρακάτω:

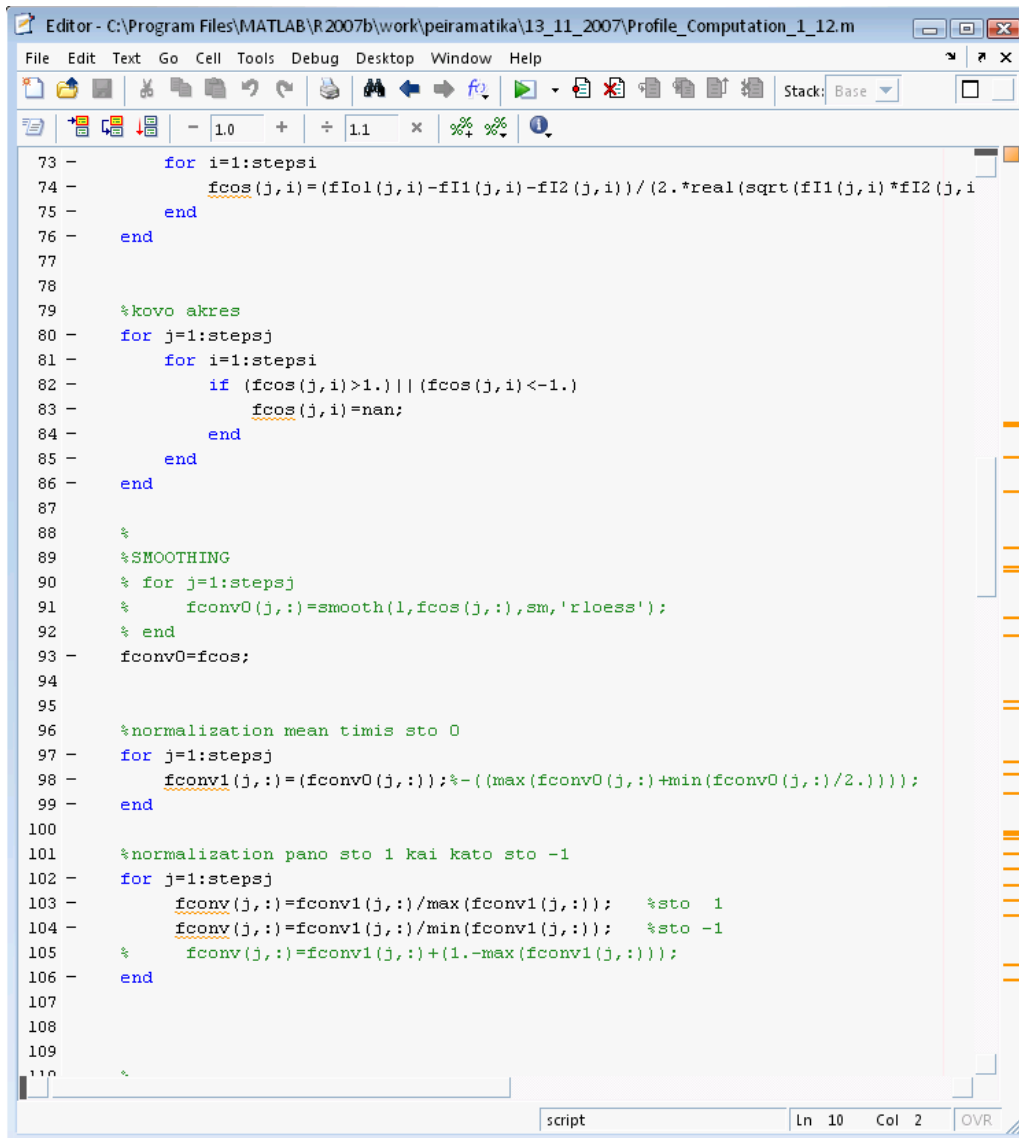


Σχήμα 16. Το γραφικό περιβάλλον της MATLAB

Στο πάνω μέρος (1) υπάρχει ένα μενού από όπου μπορεί κανείς να ρυθμίσει παραμέτρους του προγράμματος, ο χώρος από κάτω χωρίζεται σε 4 κομμάτια: αριστερά επάνω (2) υπάρχει το workspace όπου κανείς βλέπει όλες τις μεταβλητές που έχει δημιουργήσει, ακριβώς από κάτω υπάρχει το command history (3) όπου μπορεί κανείς να ανακαλέσει εντολές που χρησιμοποίησε παλιότερα. Στα δεξιά (4) υπάρχει ένας χώρος που μπορεί κανείς να εξερευνήσει τις τιμές μιας ή περισσότερων μεταβλητών και τέλος κάτω δεξιά (5) υπάρχει το command window από όπου κανείς μπορεί να εισάγει εντολές με το χέρι.

Στην πράξη όμως δεν εισάγουμε ποτέ εντολές με το χέρι, αλλά της γράφουμε σε ένα αρχείο σαν ένα πρόγραμμα κάποιας γλώσσας προγραμματισμού, το οποίο μπορούμε να το επεξεργαστούμε μέσω του editor της MATLAB και το τρέχουμε από εκεί απευθείας. Το πρόγραμμα που

χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία φαίνεται μέσα στον editor στην παρακάτω εικόνα:



```
73 -     for i=1:stepsi
74 -         fcos(j,i)=(fIol(j,i)-fI1(j,i)-fI2(j,i))/(2.*real(sqrt(fI1(j,i)*fI2(j,i)
75 -     end
76 - end
77
78
79 %kovo akres
80 for j=1:stepsj
81     for i=1:stepsi
82         if (fcos(j,i)>1.)|| (fcos(j,i)<-1.)
83             fcos(j,i)=nan;
84         end
85     end
86 end
87
88 %
89 %SMOOTHING
90 % for j=1:stepsj
91 %     fconv0(j,:)=smooth(1,fcos(j,:),sm,'rloess');
92 % end
93 fconv0=fcos;
94
95
96 %normalization mean timis sto 0
97 for j=1:stepsj
98     fconv1(j,:)=(fconv0(j,:))%-(max(fconv0(j,:)+min(fconv0(j,:)/2.));
99 end
100
101 %normalization pano sto 1 kai kato sto -1
102 for j=1:stepsj
103     fconv(j,:)=fconv1(j,:)/max(fconv1(j,:)); %sto 1
104     fconv(j,:)=fconv1(j,:)/min(fconv1(j,:)); %sto -1
105     %     fconv(j,:)=fconv1(j,:)+(1.-max(fconv1(j,:)));
106 end
107
108
109
110 %
111
```

Σχήμα 17. Ο editor της MALTAB

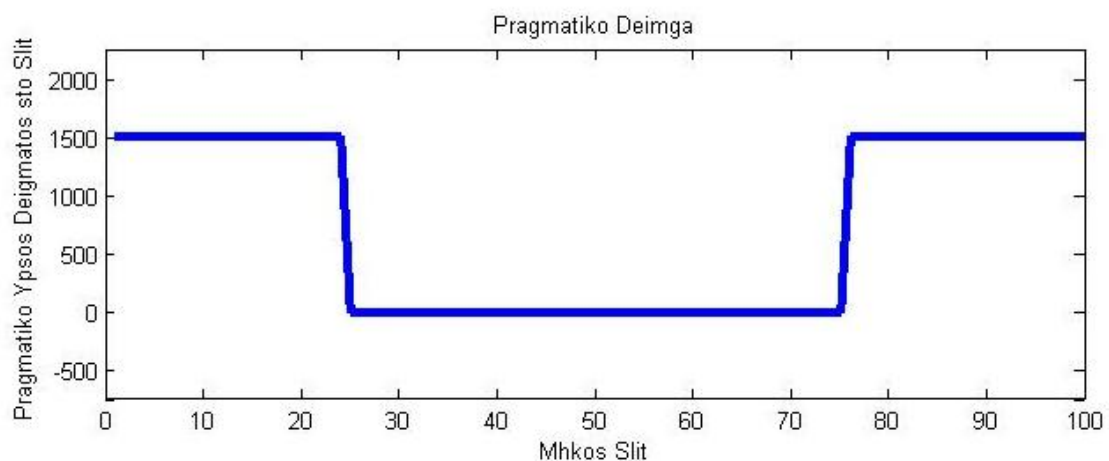
Ο editor μας δείχνει την γραμμή στην οποία βρισκόμαστε, χρωματίζει αυτόματα σχόλια και παρενθέσεις, καθώς μεταξύ άλλων μας δίνει και την δυνατότητα να χρονομετρήσουμε την εκτέλεση του κώδικα και να κάνουμε debugging.

Κεφάλαιο 4.2: Ο αλγόριθμος υπολογισμού profile

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του προφίλ ακολουθεί την διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Ωστόσο λόγω προβλημάτων θορύβου, που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες, χρειάστηκε να γίνουν κάποιες μετατροπές στο τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται το προφίλ, προκειμένου να έχουμε πιο σωστά αποτελέσματα. Η ύπαρξη θορύβου είναι αναμενόμενη σε κάθε μέτρηση που γίνεται σε πραγματικές συνθήκες, και συνεπώς πρέπει να παίρνεται υπόψη στη διαχείριση και την επεξεργασία των δεδομένων αργότερα.

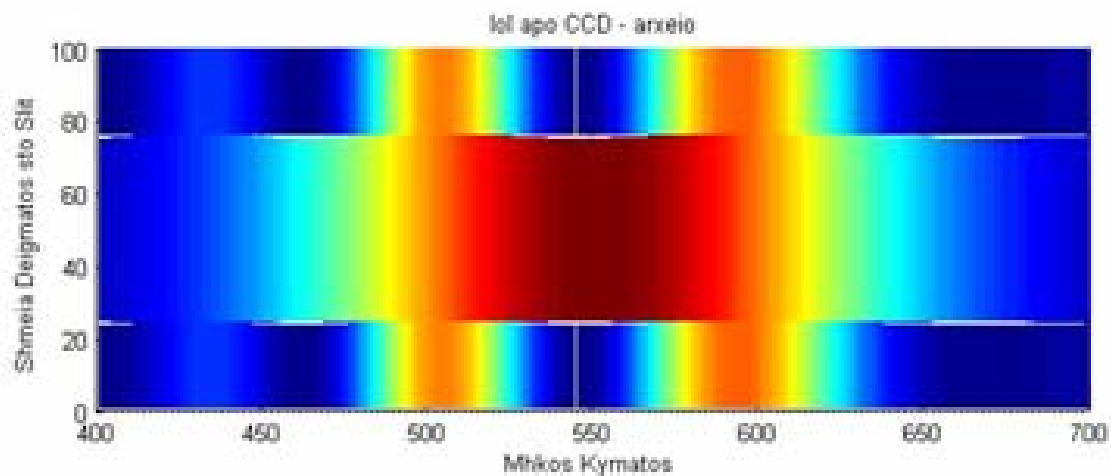
Simulation

Αντί για πραγματικά δεδομένα μπορούμε να παράγουμε, με χρήση των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο της συμβολής (βλέπε σελ. 25 – 26), εικόνες που μοιάζουν με αυτές που περιμένουμε να δούμε στο εργαστήριο. Έτσι παράγονται εικόνες που δημιουργούνται μετά από συμβολή δύο κυμάτων που το ένα έχει ανακλαστεί από ένα εικονικό δείγμα με καθορισμένο προφίλ. Για παράδειγμα, για ένα προφίλ με σκαλοπάτι 1,5μm μιας γραμμής στο δείγμα που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 18. Simulated προφίλ μιας γραμμής δείγματος

πάνω στο οποίο θα προσπέσει μία δέσμη με ευρύ φάσμα. Όπως και στην πραγματικότητα μία πανομοιότυπη δέσμη θα προσπέσει σε ένα κάτοπτρο και θα ανακλαστεί συμβάλλοντας με την προηγούμενη. Θα δημιουργηθεί μία διαμόρφωση στο φάσμα και στη συνέχεια η simulated εικόνα σε ψευδο-χρώματα που δημιουργείται είναι η παρακάτω:

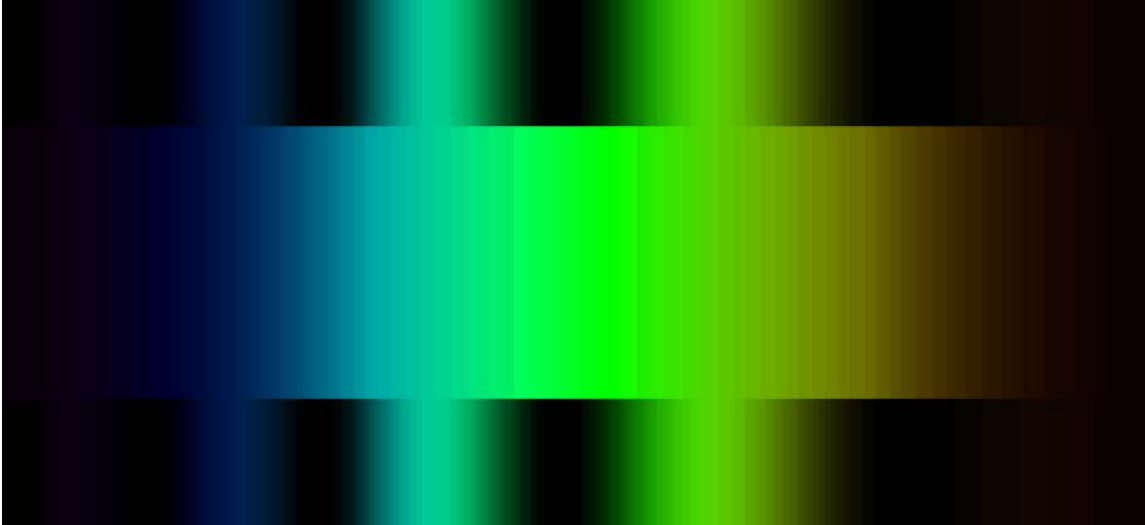


Σχήμα 19. Simulated εικόνα εντάσεων μετά από συμβολή μεταξύ καθρέπτη και simulated δείγματος. Απεικόνιση με ψευδο-χρώματα.

η οποία θα πρέπει να μοιάζει με αυτήν που θα είχαμε σε μια πραγματική διάταξη.

Βήμα 1^ο

Αρχικά πραγματοποιείται το άνοιγμα των εικόνων είτε αυτές είναι παραγμένες από simulation είτε από αρχείο σωμένο από την CCD κάμερα στο εργαστήριο. Τα διαγράμματα και οι εικόνες που θα ακολουθήσουν είναι πάνω στην εφαρμογή του αλγορίθμου σε simulated data. Μία εικόνα που παράχθηκε με simulation φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 20. Simulated εικόνα εντάσεων μετά από συμβολή μεταξύ καθρέπτη και simulated δείγματος. Απεικόνιση με πραγματικά χρώματα.

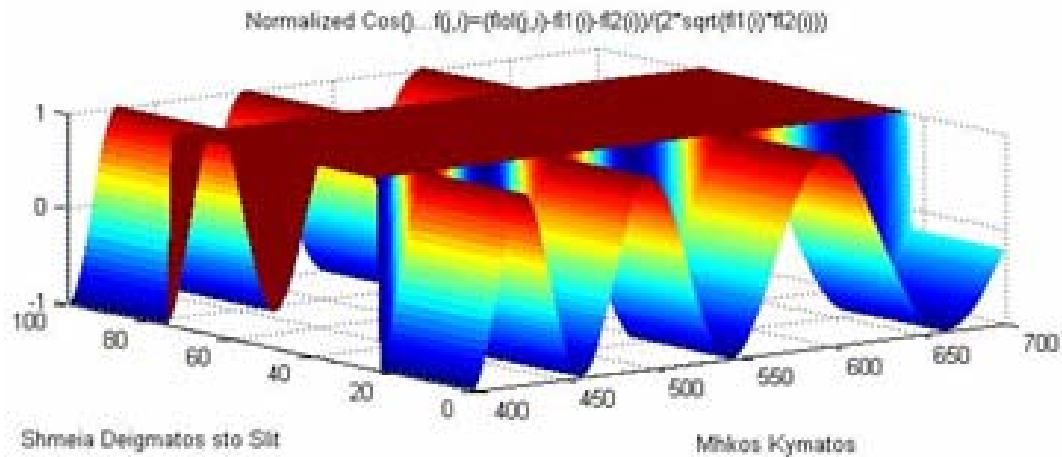
Έχοντας πλέον δημιουργήσει έναν πίνακα από την δισδιάστατη εικόνα, με κάθε στοιχείο του πίνακα να αντιστοιχεί σε ένα pixel της εικόνας έχουμε εισάγει έτσι το $I_{ολικό}$. Εφόσον μιλάμε για πραγματικά δεδομένα και όχι simulated, επαναλαμβάνοντας την διαδικασία κλείνοντας έναν από τους δύο αρμούς κάθε φορά εισάγουμε τις τιμές για το I_{ref} και I_{surf} . Και τέλος μετράμε τον διάχυτο φωτισμό (ambient light) κλείνοντας και τους δύο αρμούς. Στη συνέχεια από κάθε μία από τις $I_{ολικό}$, I_{ref} και I_{surf} αφαιρείται ο διάχυτος φωτισμός I_{amb} ώστε στην μετέπειτα επεξεργασία να χρησιμοποιηθούν οι “καθαρές” από παρασιτικό φωτισμό εικόνες.

Βήμα 2°

Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται το συνημίτονο με χρήση του τύπου

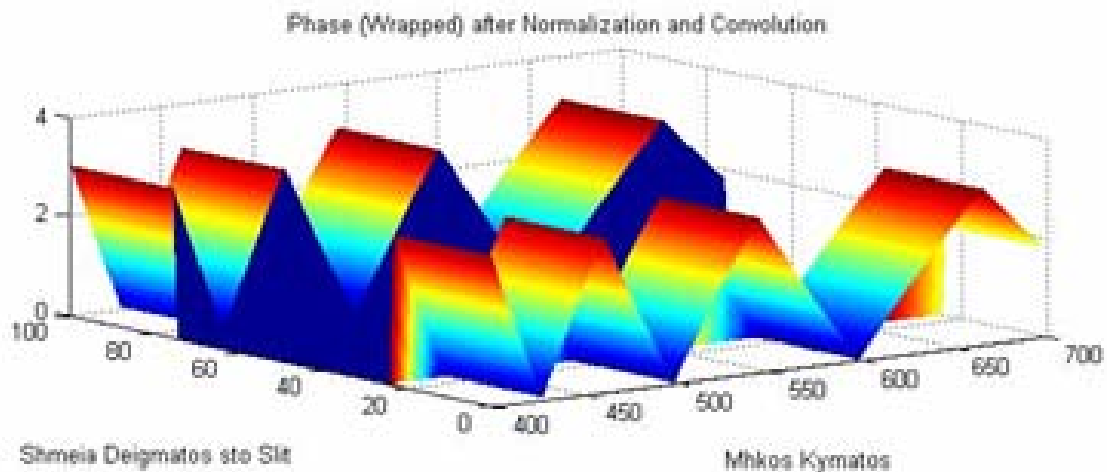
$$\cos\left(\frac{2\pi 2z_j}{\lambda_i} + \delta\phi\right) = \frac{I_{ολικό}(z_j, \lambda_i) - I_{ref}(z_j, \lambda_i) - I_{surf}(z_j, \lambda_i)}{2\sqrt{I_{ref}(z_j, \lambda_i)I_{surf}(z_j, \lambda_i)}}$$

όπου όλες οι ποσότητες στο αριστερό μέλος της εξίσωσης είναι γνωστές. Κάνοντας το παραπάνω για όλες τα σημεία της εικόνας παίρνουμε ένα συνημίτονο για κάθε γραμμή του δείγματος, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 21. Συνημίτονο όλως των σημείων

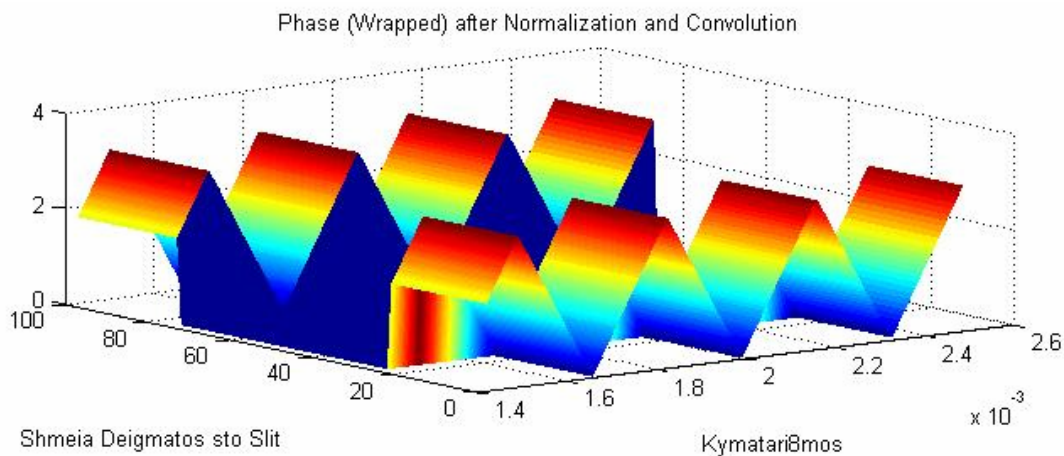
Και όπως είναι φυσικό μπορούμε να υπολογίσουμε από το παραπάνω συνημίτονο, την φάση για κάθε μήκος κύματος και κάθε σημείο πάνω στο δείγμα. Ο υπολογισμός της φάσης γίνεται με χρήση του τύπου $\text{acos}(\cos(\varphi)) = \varphi$, και για το παραπάνω συνημίτονο η υπολογισμένη φάση φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 22. Φάση όλων των σημείων στο CCD στο χώρο του λ

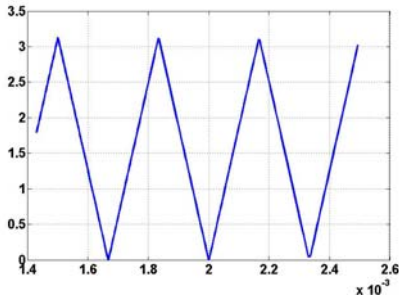
Βήμα 3^ο

Και τελικά όπως έχουμε ήδη εξηγήσει πρέπει να ξεδιπλώσουμε (unwrapping) τη φάση ως προς τον κυματάριθμο k . Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η wrapped φάση ως προς λ όμως. Έτσι αντίστοιχα η wrapped phase ως προς k είναι:

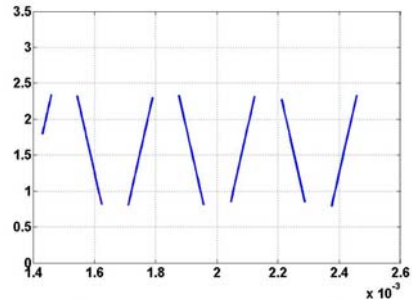


Σχήμα 23. Φάση όλων των σημείων στο CCD στο χώρο του k

Στη πράξη όμως δεν μπορούμε να ξεδιπλώσουμε την φάση λόγω θορύβου στην πραγματική εικόνα, έτσι αφού τελικά θα δούμε ότι μας ενδιαφέρει η κλίση της unwrapped phase εφαρμόζουμε το εξής τέχνασμα: Κόβουμε από τη φάση (πριονωτή μορφή) μια ζώνη από πάνω και από κάτω (συνήθως $\pi/3$), έτσι ώστε ο θόρυβος των πειραματικών δεδομένων δεν μας επηρεάσει ιδιαίτερα στα άκρα όπου το πρόβλημα περιπλέκεται. Μια σχηματική αναπαράσταση φαίνεται παρακάτω:

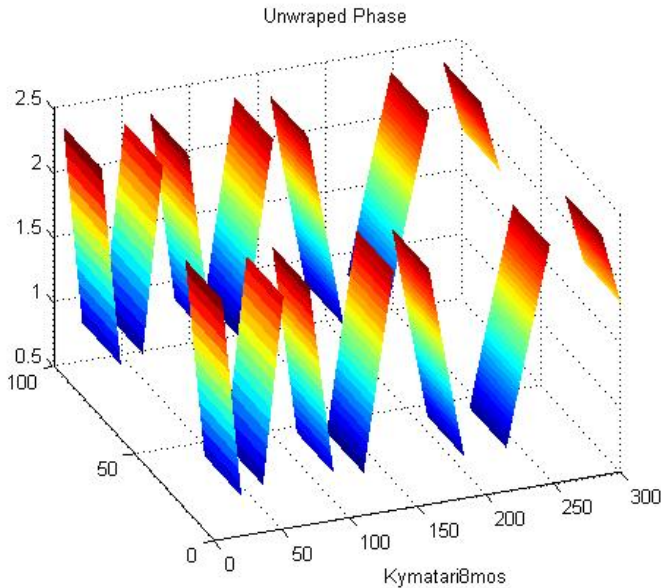


Σχήμα 24. Φάση μιας γραμμής στο χώρο του κ



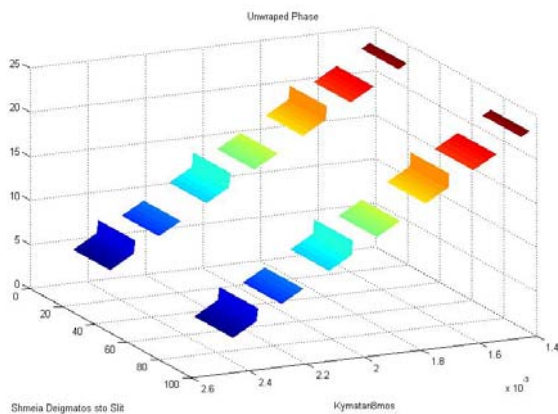
Σχήμα 25. Κομμένη κατά πλάτος $\pi/3$ φάση μιας γραμμής στο χώρο του κ

Που στην συνέχεια για όλα τα σημεία κάθε γραμμής μας δίνει:



Σχήμα 26. Κομμένη φάση για όλα τα σημεία

Στη συνέχεια κάνουμε unwrap στα κομμάτια που μέινανε μετά το crop και παίρνουμε από κάθε πριονωτή γραμμή μία διακεκομμένη γραμμή, η κλίση της οποίας περιέχει την πληροφορία για την διαφορά οπτικού δρόμου. Η ξεδιπλωμένη φάση για την κομμένη διπλωμένη φάση του προηγούμενου σχήματος φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 27. Ξεδιπλωμένη (unwrapped) φάση μετά από κόψιμο για όλα τα σημεία

Βήμα 4^ο

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογίσουμε την μεταβολή της φάσης καθώς αλλάζει το k . Αντί για να πάρουμε δύο ή τρία σημεία για δεδομένους κυματάρθρο k , παίρνουμε την συνολική κλίση ανά γραμμή. Για να το κάνουμε αυτό κάνουμε *robust linear regression* στα σημεία κάθε γραμμής στο χώρο του k .

Σε αυτό το σημείο χρησιμοποιήθηκε η ενσωματωμένη συνάρτηση της MATLAB: “**robustfit**” η οποία ουσιαστικά είναι *linear fitting* με βάρη, δηλαδή κάθε σημείο δεδομένων έχει διαφορετικό αντίκτυπο στην κλίση της τελικής ευθείας. Όσο πιο μακριά βρίσκεται ένα σημείο από την πλειοψηφία των υπολοίπων τόσο μικρότερη η συνεισφορά του στο σχηματισμό της τελικής ευθείας, και το αντίθετο. Συνεπώς αυτή η μέθοδος είναι ιδανική για παρεμβολή δεδομένων με υψηλή παρουσία θορύβου, όπως είναι και η περίπτωση μας. Επίσης το γεγονός ότι έχουμε κόψει κάποια κομμάτια από την φάση δεν επηρεάζει το *fitting* για τον υπολογισμό της ευθείας, μιας και τα κομμένα κομμάτια παραλείπονται από στον υπολογισμό.

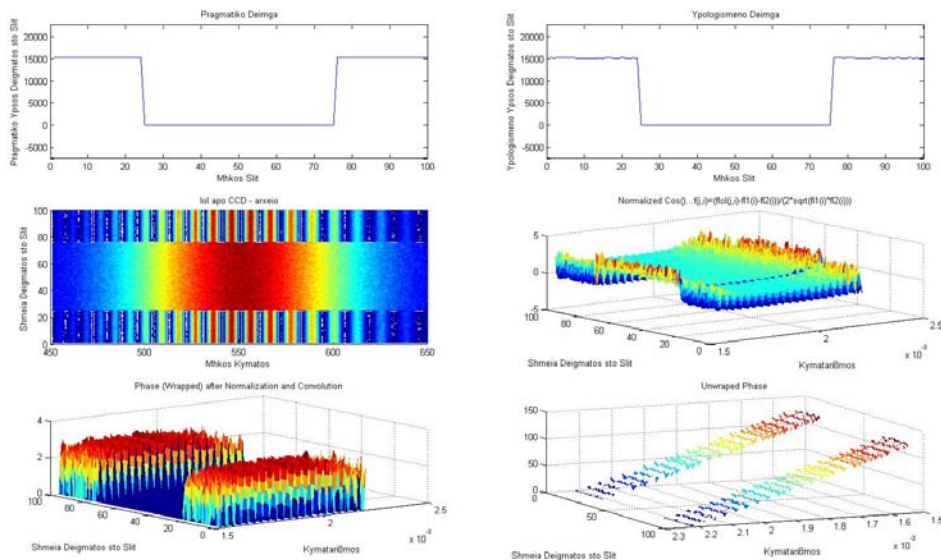
Στη συνέχεια υπολογίζουμε το ύψος κάθε σημείου από την κλίση της φάσης της αντίστοιχης γραμμής από τον τύπο:

$$z_j = - \frac{\text{κλίση ευθείας από fitting}}{4\pi}$$

Noise Testing

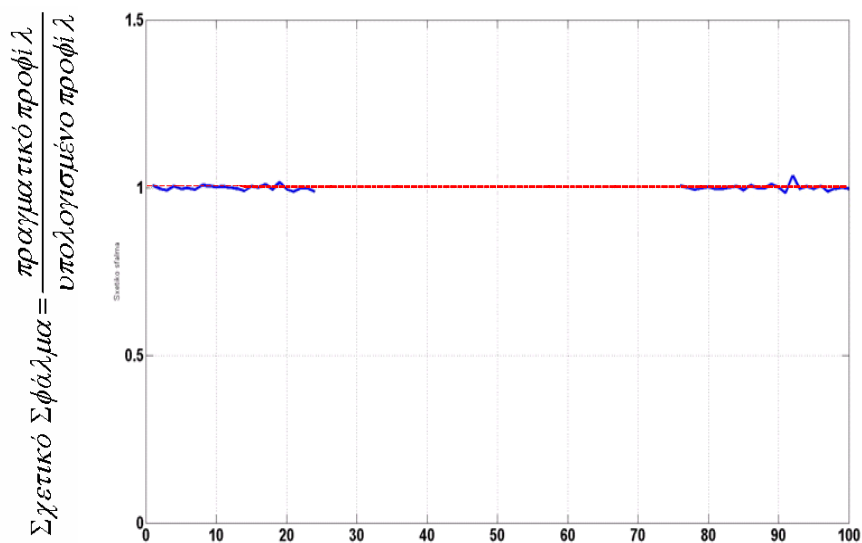
Πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου σε πειραματικά δεδομένα, αυτός δοκιμάστηκε όσον αφορά την επίδραση θορύβου στα αποτελέσματα. Εισάγοντας τεχνητά θόρυβο 10% σε όλες τις εικόνες που θα παίρναμε από την πειραματική διάταξη, δηλαδή το $I_{ολικό}$, I_{ref} , I_{surf} , φάνηκε ότι ο αλγόριθμος ανταποκρίνεται άριστα και μπορεί να θεωρηθεί ευσταθής.

Ένα διάγραμμα που παράχθηκε με την παραπάνω διαδικασία φαίνεται εδώ:



Σχήμα 28. Διάγραμμα αποτελεσμάτων της MATLAB

Στο παραπάνω simulation το σχετικό σφάλμα, δηλαδή ο λόγος του πραγματικού προς το υπολογισμένο προφίλ, ήταν πολύ κοντά στην ιδανική τιμή που είναι η μονάδα:



Σχήμα 29. Σχετικό σφάλμα αλγορίθμου με παρουσία θορύβου 10% σε όλες τις εικόνες

Όπου η γαλάζια γραμμή είναι το υπολογισμένο σχετικό σφάλμα για κάθε ένα από τα 100 σημεία του slit.

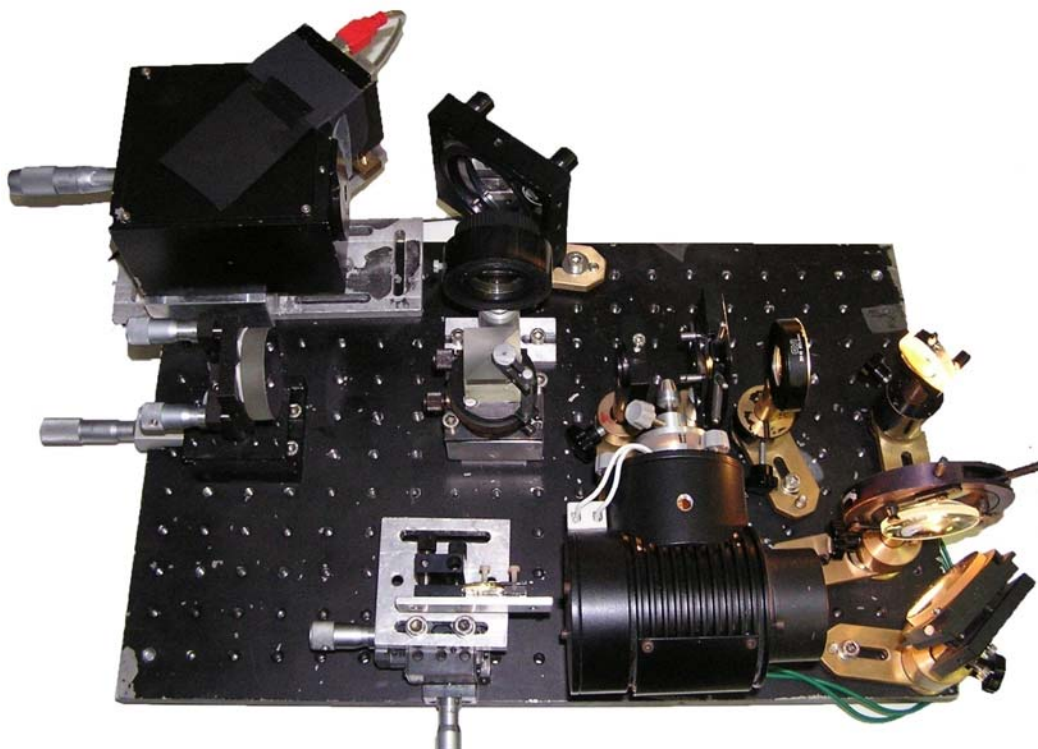
Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή είναι η ιδανική τιμή του σχετικού σφάλματος, και όπως βλέπουμε έχουμε έναν πάρα πολύ ακριβή υπολογισμό, κατά πολύ μικρότερο από το 10% του θορύβου που εισήχθη.

Κεφάλαιο 5: Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε σε εργαστήριο του ΙΤΕ κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2006-2007. Όλα τα εξαρτήματα στερεώθηκαν πάνω σε πλάκα αλουμινίου με αντικραδασμική προστασία, και μαύρο χρώμα για την αποφυγή αθέμιτων ανακλάσεων και παρασιτικού φωτισμού.

Κεφάλαιο 5.1: Συμβολόμετρο Michelson

Το συμβολόμετρο Michelson είναι αυτό με το οποίο έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις. Η αρχή λειτουργίας του περιγράφηκε αναλυτικά πιο πριν. Η διάταξη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 30. Πειραματική διάταξη εργαστηρίου – συμβολόμετρο Michelson

Σύστημα φωτισμού:

Όπως βλέπουμε το φως ξεκινάει από μια λάμπα πυρακτώσεως των 60W και αφού προσπέσει σε κάτοπτρο διαμέτρου 50mm εστιάζεται από συγκλίνων φακό εστιακού μήκους 50mm και διαμέτρου 50mm, και μετά προσπίπτει σε δεύτερο κάτοπτρο διαμέτρου 25mm. Στη συνέχεια εστιάζεται από συγκλίνων φακό εστιακού μήκους 25mm και διαμέτρου 25mm και περνάει από ένα pinhole διαμέτρου 100μm, για να σχηματιστεί έτσι μια σημειακή πηγή λευκού φωτός. Στη συνέχεια περνάει από έναν ακόμα συγκλίνων φακό εστιακού μήκους 25mm και διαμέτρου 25mm για collimation, ώστε να μπορεί να ανακλαστεί από το δείγμα και το κάτοπτρο που βρίσκονται αρκετά πιο μακριά.

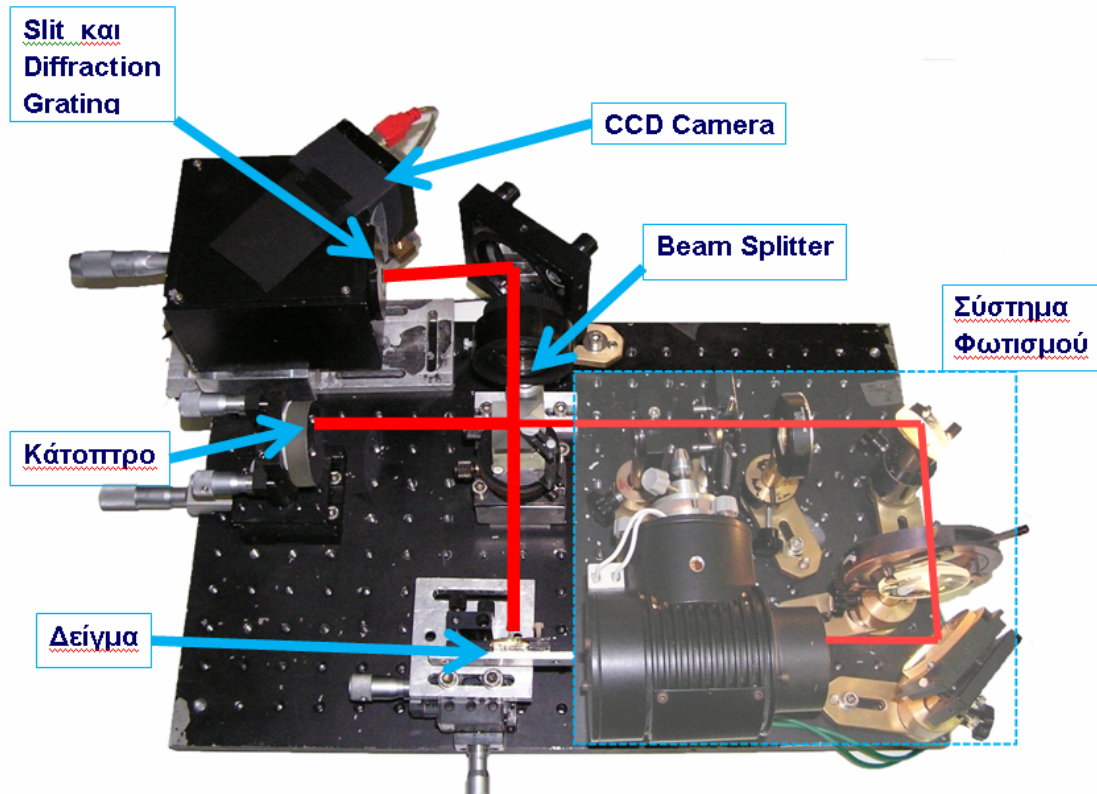
Συμβολή:

Στη συνέχεια η δέσμη από το σύστημα φωτισμού προσπίπτει πάνω στον διαχωριστή δέσμης και χωρίζεται στα δύο, η κάθε μια δέσμη διανύει μια απόσταση και ανακλάται, η μία από ένα κάτοπτρο και η άλλη από το δείγμα, και επιστρέφουν για να συμβάλουν αφού προσπέσουν στον διαχωριστή δέσμης για δεύτερη φορά.

Imaging System:

Μετά την συμβολή των δύο δεσμών, η νέα δέσμη περνάει μέσα από αχρωματικό φακό εστιακού μήκους 90mm και διαμέτρου 30mm, και στη συνέχεια προσπίπτει σε κάτοπτρο διαμέτρου 50mm και τελικά προσπίπτει πάνω σε μια σχισμή πλάτους 200μm. Το κομμάτι της δέσμης που περνάει από τη σχισμή (slit) αναλύεται στις φασματικές συνιστώσες του από ένα φράγμα περίθλασης (diffraction grating) ανάλυσης 1200 γραμμών ανά χιλιοστό (lines/mm), και η τελική εικόνα του φάσματος ανιχνεύεται από CCD κάμερα (τύπου Basler A102f με μέγιστη ανάλυση 1392x1050 pixel) στην έξοδο. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι η επιφάνεια του δείγματος, το slit και η επιφάνεια του CCD είναι συνεστιακά επίπεδα, δηλαδή έχουμε στιγματική απεικόνιση από το δείγμα στο slit και μετά στο CCD. Η απόκλιση από την ιδανική περίπτωση επιφέρει σφάλματα στον υπολογισμό του προφίλ λόγω overlap των φασματικών κροσσών.

Μια συγκεντρωτική εικόνα των παραπάνω σημείων φαίνεται παρακάτω. Η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει την πορεία της δέσμης από την πηγή αρχικά, μέχρι να διαβαστεί από το CCD της κάμερας στην έξοδο.



Σχήμα 31. Πειραματική διάταξη εργαστηρίου – συμβολόμετρο Michelson

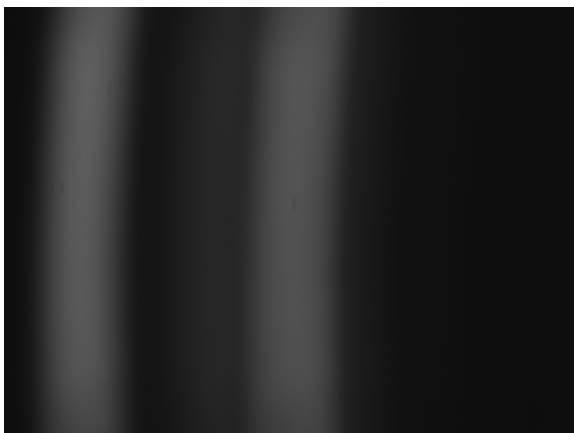
Η κάμερα τελικά μεταφέρει το σήμα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω USB 2.0 θύρας όπου και γίνεται η περαιτέρω επεξεργασία. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η εικόνα διαβάζεται μέσω του προγράμματος LABVIEW. Ο κώδικας LABVIEW που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις γράφτηκε εξολοκλήρου από τον κ. Ιωάννη Ορφανό, και ήταν ζωτικής σημασίας για να γίνουν ορθά και γρήγορα οι πειραματικές μετρήσεις.

Βαθμονόμηση της διάταξης:

Πριν μπορέσουμε να πάρουμε οποιοσδήποτε πειραματικές εικόνες θα πρέπει πρώτα να βαθμονομήσουμε τη διάταξή μας. Λέγοντας αυτό εννοώ ότι αφού έχουν στερεωθεί όλα τα επιμέρους κομμάτια θα πρέπει να μετρηθούν:

1. πια στήλη από pixel αντιστοιχεί σε ποιο μήκος κύματος
2. ποιά είναι η χρωματική ανάλυση που έχουμε στο CCD
3. ποιά είναι η χωρική ανάλυση

Όσον αφορά την χρωματική βαθμονόμηση του CCD sensor, έγινε με τη χρήση μια λάμπας φθορίου, φως από την οποία οδηγήθηκε μέσα στη διάταξη και ανιχνεύθηκε από το CCD. Μετά από τον φασματικό διαχωρισμό ήταν εμφανείς δύο από τις φασματικές γραμμές του υδραργύρου, όπως φαίνετε στην παρακάτω εικόνα:



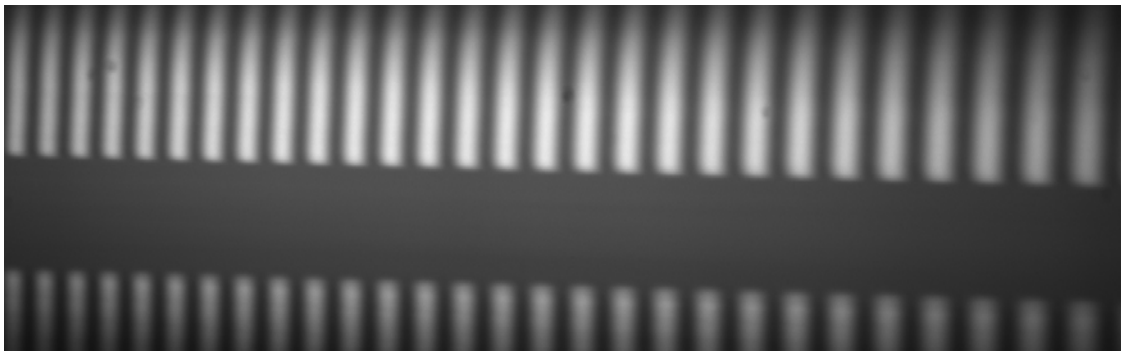
Οι φασματικές γραμμές που φαίνονται στην εικόνα είναι των 546nm και 578nm αντίστοιχα. Έτσι μπορούμε να αντιστοιχίσουμε κάθε στήλη από pixel σε ένα μήκος κύματος, καθώς και να βρούμε την χρωματική ανάλυση και το εύρος του φάσματος που εκμεταλλευόμαστε.

Σχήμα 32. Χρωματική Βαθμονόμηση: Φασματικές γραμμές υδραργύρου (Hg) στα 546nm και 578nm

Σε αυτήν την φωτογραφία το εύρος είναι: 621(στην δεξιά άκρη) - 534.25 (στην αριστερή άκρη) = 86.75nm, καθώς και μήκος του CCD είναι 1392pixel.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε τρεις φορές με την συγκεκριμένη πηγή και στη συνέχεια άλλες τρεις με μια ειδική πηγή κατάλληλη για βαθμονόμηση φασματογράφων, και στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των έξι μετρήσεων ο οποίος και χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

Όσον αφορά την χωρική βαθμονόμηση του CCD sensor, αυτή έγινε με τη χρήση μιας λεπτής και μιας παχιάς βελόνας. Τοποθετώντας μία από τις δύο βελόνες μπροστά από το ένα κάτοπτρο παίρνουμε την παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 33. Χωρική Βαθμονόμηση: απεικόνιση μιας βελόνας στο CCD

Όπως βλέπουμε, μια εγκάρσια γραμμή της βελόνας απεικονίζεται στο slit και από εκεί πάνω στο CCD. Με δεδομένο το πάχος της βελόνας, και μετρώντας το πλάτος της προβολής της στην κάμερα μπορούμε να αντιστοιχίσουμε ένα pixel στην κάμερα με μια απόσταση στην χώρο του δείγματος. Στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση ένα pixel στην εικόνα αντιστοιχεί σε 8μm πάνω στο δείγμα μας.

Κεφάλαιο 5.2: Πειραματικές εικόνες

Οι εικόνες που καταγράφουμε με την CCD κάμερα σε κάθε υπολογισμό προφίλ όπως έχουμε πει είδη είναι τέσσερις: καταγράφουμε το $I_{ολικό}$ μετά από την συμβολή, και στη συνέχεια κλίνοντας τον έναν από τους δύο αρμούς κάθε φορά, καταγράφουμε το φάσμα του ανακλώμενου φωτός από το δείγμα και το κάτοπτρο (I_{ref} , I_{surf}). Τέλος κλίνοντας και τους δύο αρμούς καταγράφουμε τον διάχυτο φωτισμό που εισέρχεται στην διάταξη από τις φωτεινές πηγές του εργαστηρίου, με σκοπό να τον αφαιρέσουμε μετά από τις προηγούμενες τρεις εικόνες.

Επίσης είναι αναγκαίο να μην μεταφέρονται δονήσεις στη διάταξη από το περιβάλλον. Τέλος ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό του προφίλ είναι η ανακλαστικότητα του δείγματος. Όσο μεγαλύτερη η ανακλαστικότητα του δείγματος τόσο πιο ομαλά τα δεδομένα που μετράμε, και συνεπώς τόσο πιο ακριβείς ο υπολογισμός του προφίλ.

Δείγμα 1^ο: Κάτοπτρο

Το πρώτο δείγμα που μετρήθηκε με την διάταξή μας ήταν ένα κάτοπτρο. Η επιλογή αυτή είναι φανερά μιας και λόγω της υψηλής ανακλαστικότητας του, και της επίπεδης επιφάνειάς του, το κάτοπτρο είναι ένα δείγμα στο οποίο μπορεί κανείς να δει κροσσούς συμβολής με μεγάλο visibility, είτε πραγματικούς είτε φασματικούς.

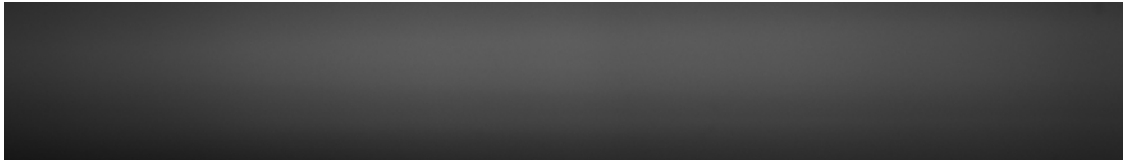
Αρχικά το η διάταξη ρυθμίστηκε να εισάγει ελάχιστη διαφορά οπτικού δρόμου με χρήση παχύμετρου, και μετέπειτα με ρυθμίσεις των μικρομετρικών φέραμε τη διάταξη σε κατάσταση που εμφανίζει φασματικούς κροσσούς στην

έξοδο. Μία από τις εικόνες που ανιχνεύθηκε από την ασπρόμαυρη CCD κάμερα Basler 102f ήταν η παρακάτω:

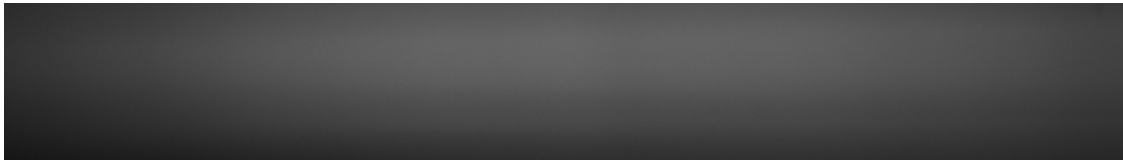


Σχήμα 34. Φασματικοί κροσσοί μετά από συμβολή των κυμάτων από τους δύο αρμούς

Στη συνέχεια αποκόπτοντας διαδοχικά το φως από τον έναν και από τον άλλο αρμό καταγράφηκαν οι δύο εικόνες που αντιπροσωπεύουν το I1 και I2:



Σχήμα 35. Φασματική εικόνα από αρμό 1



Σχήμα 36. Φασματική εικόνα από αρμό 2

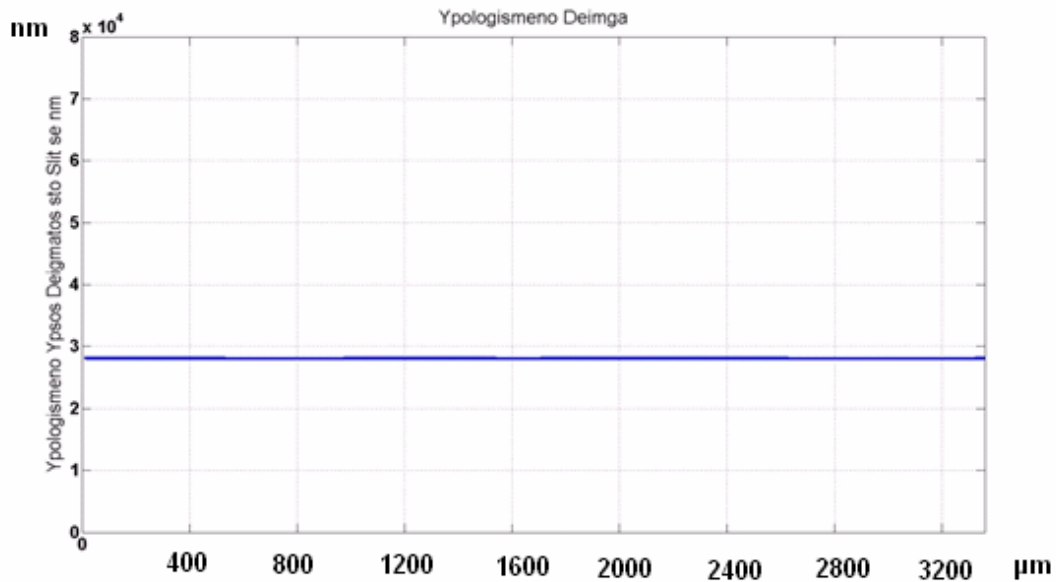
Τέλος καταγράφηκε και μία εικόνα έχοντας κλειστούς και τους δύο αρμούς, η οποία αφαιρέθηκε από τις προηγούμενες 3 πριν ξεκινήσει η επεξεργασία των δεδομένων. Αυτό έγινε για την απομάκρυνση θορύβου λόγω παρασιτικού φωτισμού από το περιβάλλον του εργαστηρίου, και του ψηφιακού θορύβου που υπάρχει σε όλες τις CCD κάμερες της αγοράς. Η εικόνα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 37. Φασματική εικόνα από διάχυτο φωτισμό – παρασιτικό φωτισμό

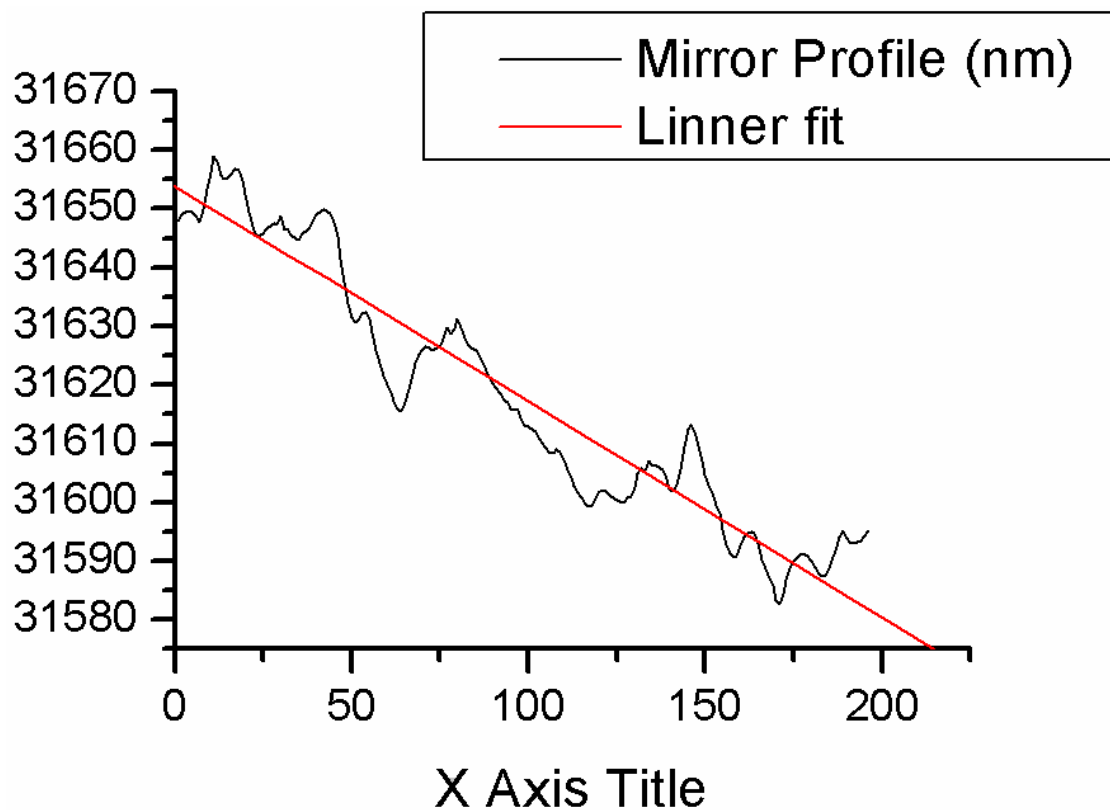
Ο λόγος που η εικόνα φαίνεται μαύρη, είναι ότι το επίπεδο του θορύβου είναι πολύ χαμηλό. Ωστόσο η αφαίρεσή του από τα τις εικόνες προς επεξεργασία είναι ένα σημαντικό βήμα για την βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων,.

Αφού καταγράψουμε τις εικόνες, τις ανοίγουμε με το πρόγραμμα της MATLAB το οποίο και αποθηκεύει κάθε μία σε έναν πίνακα, που αντιπροσωπεύει όπως έχουμε ήδη αναλύσει τα I_{ref} , I_{surf} και $I_{ολικό}$. Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά οπτικού δρόμου ανάμεσα στις δύο επιφάνειες που παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 38. Υπολογισμένο προφίλ κατόπτρου

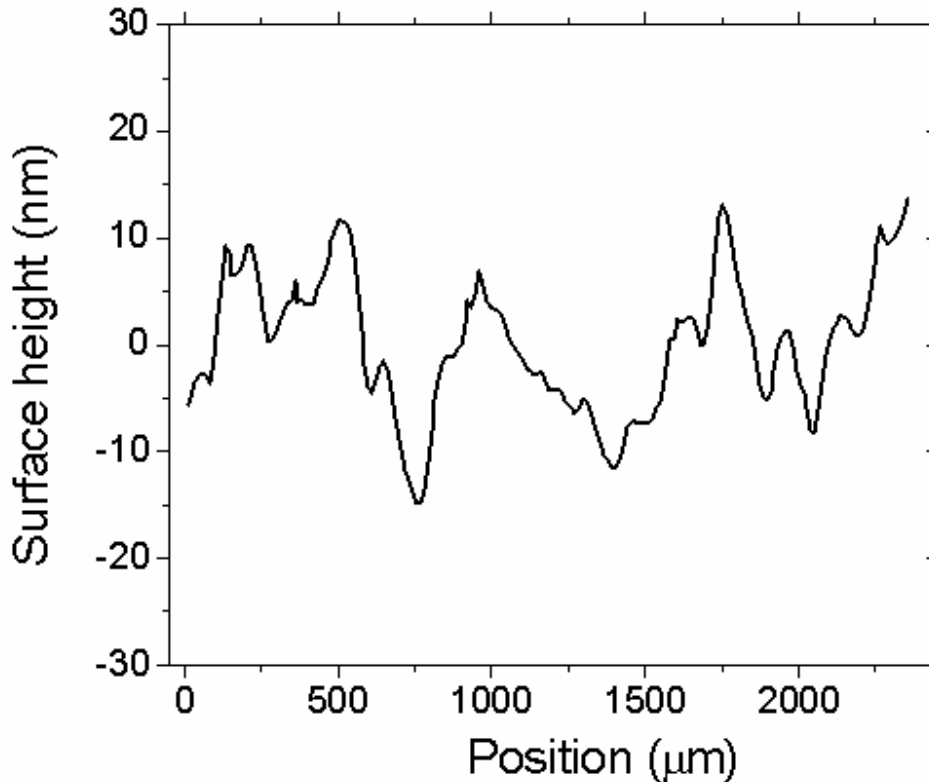
Στην πραγματικότητα το προφίλ που υπολογίζουμε είναι η διαφορά οπτικού δρόμου ανάμεσα σε αντίστοιχα σημεία του δείγματος και του κατόπτρου. Στην περίπτωση μας μετράμε την διαφορά οπτικού δρόμου ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα και υπολογίζουμε σαν προφίλ την διαφορά στο roughness των δύο επιφανειών. Το τελευταίο είναι και ένα μέτρο για το ελάχιστο σφάλμα που μπορούμε να πετύχουμε στην μέτρηση του προφίλ. Για το παραπάνω πείραμα το προφίλ, δηλαδή η διαφορά στο roughness των δύο κατόπτρων με αλλαγμένη κατάλληλα την κλίμακα του Y άξονα είναι το παρακάτω:



Σχήμα 39. Υπολογισμένο προφίλ κατόπτρου σε μεγάλη κλίμακα

Βλέπουμε ότι η μέγιστη υψομετρική διαφορά στο υπολογισμένο προφίλ είναι 80nm. Το νούμερο αυτό μπορεί όμως να είναι πλασματικό, καθώς η κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο καθρεπτών φαίνεται να εισάγει μία κλίση στο υπολογισμένο προφίλ, η οποία και φαίνεται στο Σχήμα 36. Κάνοντας linear

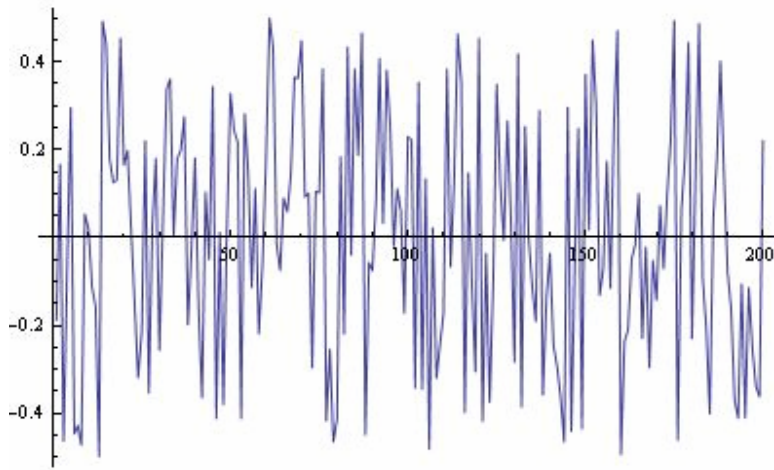
fitting στο υπολογιζόμενο προφίλ (κόκκινη γραμμή) και στη συνέχεια στρέφοντας το προφίλ με κατά το αντίστροφο της υπολογισμένης κλίσης της ευθείας που κάνει fit αυτήν, παίρνουμε το προφίλ στην οριζόντια διεύθυνση. Το προφίλ αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 37, έχει πολύ μικρότερο $RMS = 7\text{nm}$, το οποίο και αποτελεί το ελάχιστο σφάλμα της διάταξής μας.



Σχήμα 40. Roughness περιστρεμμένου προφίλ. $RMS = 7\text{nm}$

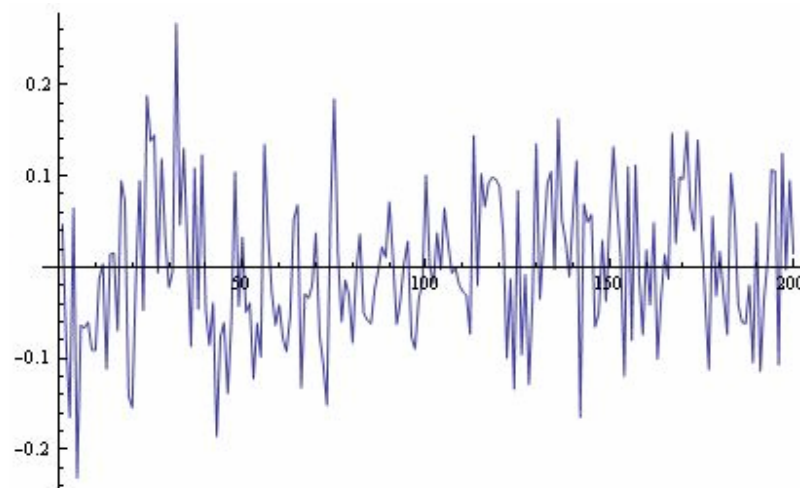
Εδώ πρέπει να πούμε ότι ο κατασκευαστής των κατόπτρων εξαρτάται τοπικά ακρίβεια $\lambda/10$, δηλαδή στο μήκος κύματος το οποίο δουλεύουμε, περίπου 50nm . Το νούμερο αυτό είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το roughness που υπολογίστηκε από τη διάταξη. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι αφού υπολογίζουμε την διαφορά του roughness των δύο καθρεπτών ως προφίλ, εάν θεωρήσουμε ότι το προφίλ του κάθε καθρέπτη ακολουθεί τυχαία κατανομή στα πλαίσια που έχει ορίσει ο κατασκευαστής, η συνέλιξη των δύο κατανομών (διαφορά στο

roughness των δύο κατόπτρων) έχει μικρότερη διακύμανση από τις δύο αρχικές. Αυτό φαίνεται και αν πάρουμε δύο τυχαίες κατανομές όπως την παρακάτω:



Σχήμα 41. Τυχαία κατανομή, Standard Deviation = 0.2763

η κατανομή της συνέλιξης τους (ή αλλιώς η διαφορά στο roughness μεταξύ τους), παρουσιάζει μικρότερο Standard Deviation από τις δύο αρχικές, όπως και φαίνεται παρακάτω:

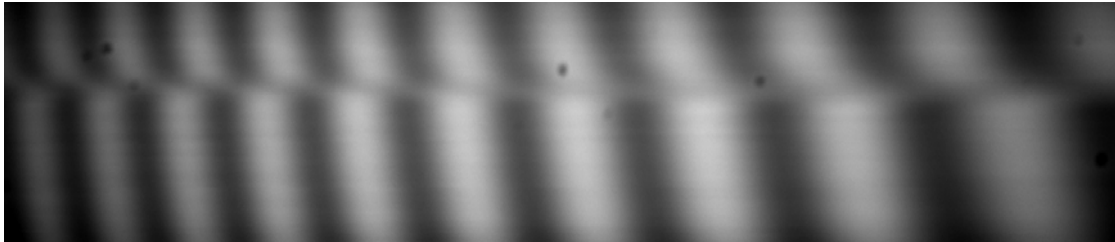


Σχήμα 42. Συνέλιξη δύο τυχαίων κατανομών, Standard Deviation = 0.0826

Βλέπουμε ότι το Standard Deviation έχει πέσει στο 30% των αρχικών, συνεπώς το roughness του κατόπτρου που υπολογίστηκε 7nm είναι μια λογική τιμή, και μάλιστα πολύ καλή.

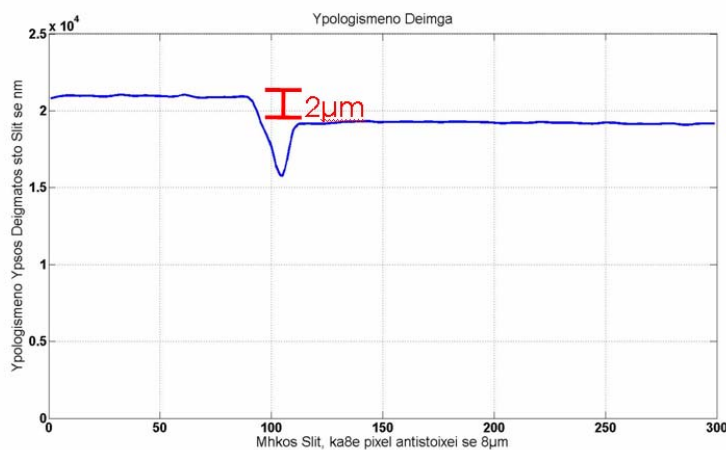
Δείγμα 2^ο: Πολυμερές με σκαλοπάτι ύψους ~2μm

Το δεύτερο δείγμα που μετρήθηκε ήταν ένα πολυμερές με ένα σκαλοπάτι στην επιφάνειά του. Το σκαλοπάτι ύψους 2μm περίπου δημιούργησε μια μεταβολή στο φάσμα, και ένα “σπάσιμο” στους φασματικούς κροσσούς, το οποίο φαίνεται καθαρά στην παρακάτω εικόνα:



Σχήμα 43. Φασματικοί κροσσοί από δείγμα πολυμερούς με σκαλοπάτι ~2μm

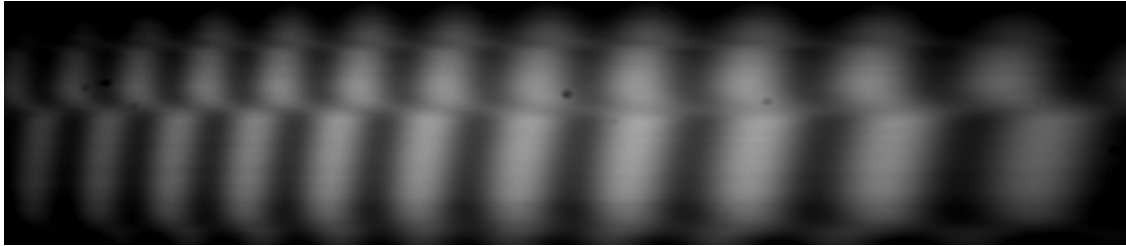
Και το προφίλ που υπολογίστηκε είναι το παρακάτω:



Σχήμα 44. Υπολογισμένο προφίλ πολυμερούς με σκαλοπάτι ~2μm

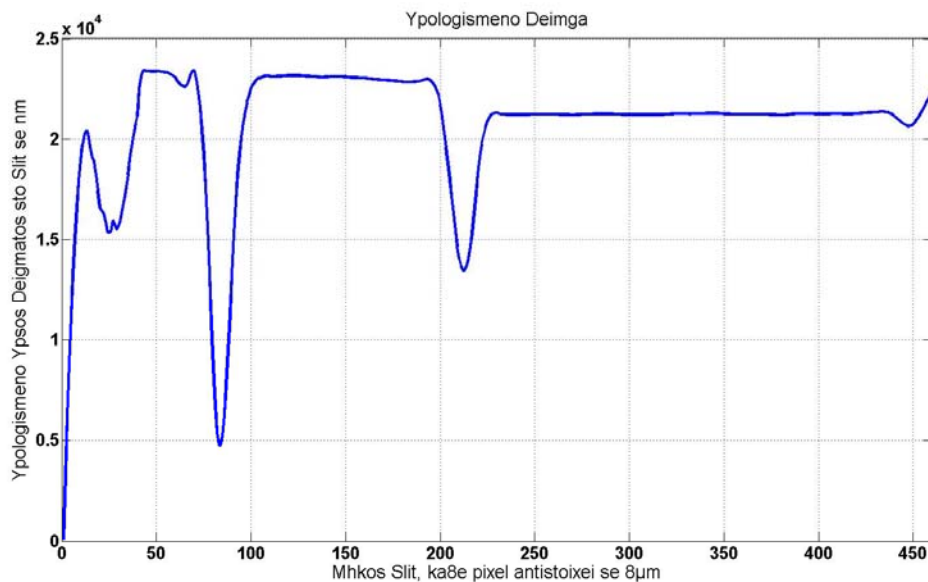
Βλέπουμε ότι όντως το σκαλοπάτι υπολογίστηκε κοντά στο ύψος των 2μm που δίνει ο κατασκευαστής. Η ακριβής διαφορά ύψους ήταν 1,86μm, που βρίσκεται μέσα στα όρια ανοχής του κατασκευαστή.

Μετρήθηκε ακόμα ένα παρόμοιο δείγμα, με πολλαπλά σκαλοπάτια. Ομοίως με πριν, η εικόνα που καταγράφηκε ήταν η παρακάτω:



Σχήμα 45. Φασματικοί κροσσοί από δείγμα πολυμερούς με πολλαπλά σκαλοπάτια

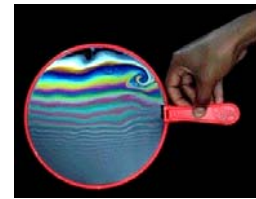
Και όπως αναμενόταν από τα πολλαπλά σπασίματα των φασματικών κροσσών έχουμε πολλαπλά σκαλοπάτια που φαίνονται στο υπολογιζόμενο προφίλ:



Σχήμα 46. Υπολογισμένο προφίλ πολυμερούς με πολλαπλά σκαλοπάτια

Τα μεγάλα κενά ανάμεσα στα σκαλοπάτια, είναι artifacts που παράγονται λόγω της μη ικανοποιητικής χωρικής ανάλυσης του συστήματος για τέτοια αντικείμενα. Στην περίπτωση αυτή πολλά σημεία πάνω στη γραμμή που μετράμε συμπυκνώνονται σε ένα σημείο στο υπολογιζόμενο προφίλ, με αποτέλεσμα να παίρνουμε ένα μέσο όρο ύψους για αυτά τα σημεία.

Δείγμα 3^ο: Σαπουνόφουσκα



Η επιλογή της σαπουνόφουσκας για δείγμα προς μέτρηση δεν αποσκοπεί στην μέτρηση του προφίλ της, παραμόνο στη μέτρηση του πάχους της. Η παρεμβολή της στον έναν αρμό έχοντας τοποθετήσει αντί για δείγμα ένα δεύτερο κάτοπτρο, αυξάνει τον οπτικό δρόμο στον αρμό αυτό κατά

$$OPD = 2(n-1)d$$

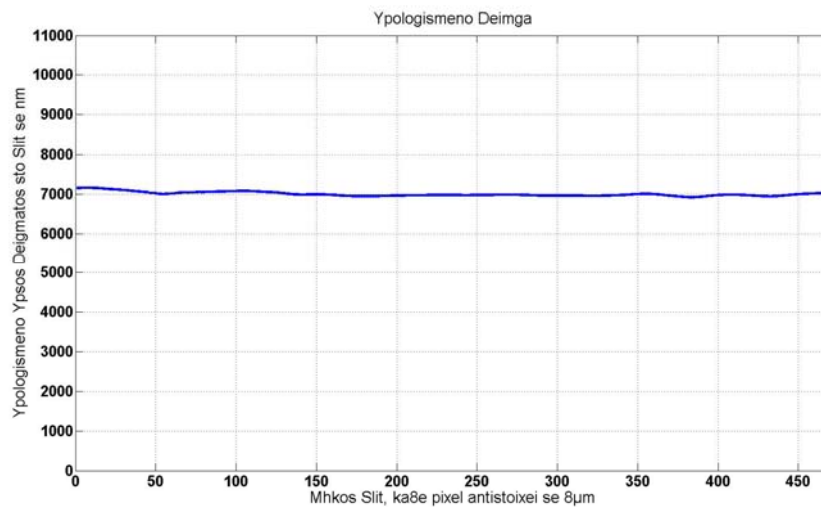
d : πάχος σαπουνόφουσκας

n : δείκτης διάθλασης

σαπουνόφουσκας ~ 1,33

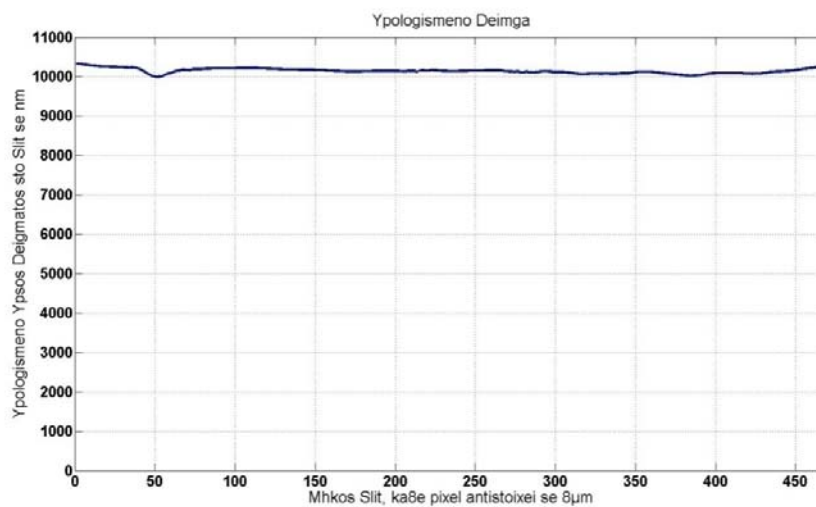
Προκειμένου να μετρήσουμε το πάχος λοιπόν, πρώτα μετρήσαμε την διαφορά οπτικού δρόμου ανάμεσα στα δύο κάτοπτρα, και μετά παρεμβάλαμε την σαπουνόφουσκα τον έναν αρμό και επαναλάβαμε την μέτρηση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Πριν την τοποθέτηση σαπουνόφουσкас:



Σχήμα 47. Υπολογισμένο προφίλ κατόπτρου

Μετά την τοποθέτηση σαπουνόφουσкас:



Σχήμα 48. Υπολογισμένο προφίλ κατόπτρου με την παρεμβολή μιας σαπουνόφουσкас στον έναν αρμό

Άρα αφού η υπολογισμένη διαφορά οπτικού δρόμου που εισάγει η σαπουνόφουσκα είναι $6,36\mu\text{m}$, σύμφωνα με τον προηγούμενο τύπο το πάχος της είναι $9,6\mu\text{m}$. Εξηγώντας πρέπει να πούμε ότι αυτό που υπολογίζουμε με τον αλγόριθμο είναι το z που μεταφράζεται σε προφίλ. Ωστόσο εμείς ζητάμε διαφορά

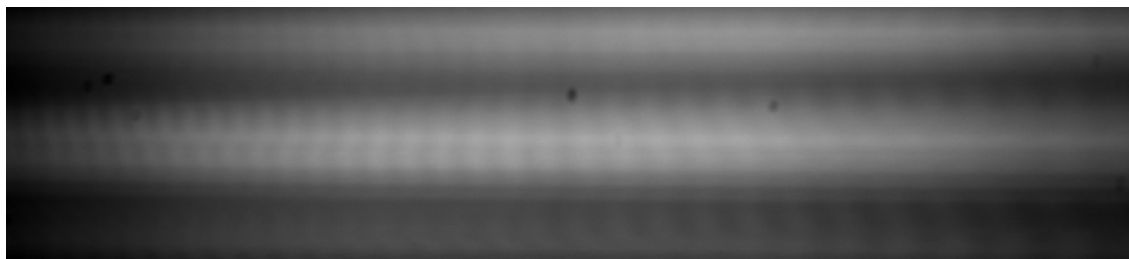
οπτικού δρόμου, συνεπώς πρέπει να πάρουμε υπόψη μας το $2z$ και όχι το $z=3,18\mu\text{m}$ που βρήκαμε.

Εδώ πρέπει να πούμε ότι καθώς περνάει ο χρόνος η σαπουνόφουσκα αρχίζει να λεπτύνει στην κορυφή και να παχαίνει στο κάτω μέρος λόγω του ότι η βαρύτητα προκαλεί την μετακίνηση διαλύματος προς τα κάτω. Το σχήμα που αναμένεται να σχηματιστεί είναι αυτό ενός μηνίσκου. Ωστόσο η μέτρηση που έγινε εδώ μετράει το πάχος της σαπουνόφουσκας 3 δευτερόλεπτα μετά την δημιουργία της, με αποτέλεσμα να μην έχουμε ακόμα σχηματισμό μηνίσκου.

Δείγμα 4^ο: Νόμισμα 10 eurocent

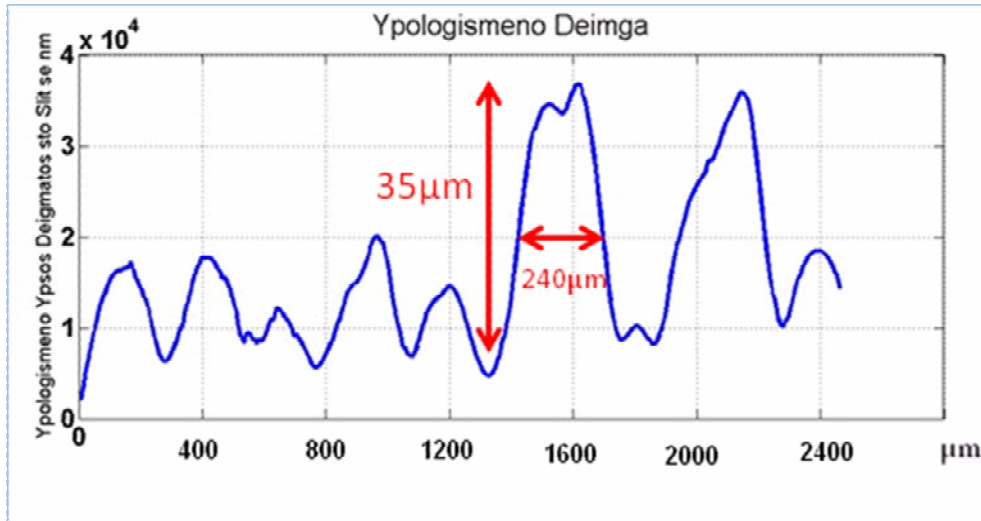
Τελευταίο μετρήθηκε ένα νόμισμα των 10 λεπτών του ευρώ. Και ειδικότερα η γραμμή που σηματοδοτείται στην εικόνα στα δεξιά:

Υπήρχε μεγάλη δυσκολία μέτρησης του προφίλ του νομίσματος λόγω χαμηλής ανακλαστικότητας και σκέδασης. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, όπου οι φασματικοί κροσσοί φαίνονται αμυδρά.



Σχήμα 49. Φασματικοί κροσσοί από νόμισμα 10cent

Ωστόσο ο αλγόριθμος μπόρεσε και υπολόγισε το προφίλ της επιλεγμένης γραμμής πάνω στο νόμισμα, που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 50. Υπολογισμένο προφίλ νομίσματος 10cent

Οι κλίμακα των αξόνων έχει τροποποιηθεί ώστε να είναι φανερές οι γραμμές πάνω στο νόμισμα. Όπως προκύπτει από το παραπάνω σχήμα, οι γραμμές πάνω στο νόμισμα έχουν πλάτος ~ 240 μm και ύψος μόλις 35 μm. Οι παραπάνω μετρήσεις συμφωνούν μέσα στα πλαίσια του πειραματικού σφάλματος με αντίστοιχες μετρήσεις με χρήση παχύμετρου.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Βελτιώσεις

Εν κατακλείδι θα ήθελα να αναφερθώ στα συμπεράσματα που έβγαλα από αυτήν την εργασία, και να αναφερθώ σε πιθανές βελτιώσεις και αλλαγές που θα μπορούσαν να γίνουν μελλοντικά.

Συμπεράσματα - Επιδόσεις:

Το προφιλόμετρο που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο σε συνδυασμό με το αλγόριθμο υπολογισμού προφίλ υλοποιημένο στην MATLAB, μπορούν να μετρήσουν επιτυχώς το προφίλ μιας γραμμής (2 διαστάσεις) ενός δείγματος, χωρίς καμία σάρωση και με τη χρήση μόνο ενός φασματικού συμβολογράφου. Είναι δυνατή η δυναμική μέτρηση του προφίλ μιας επιφάνειας που αλλάζει στο χρόνο, η χρονική ανάλυση της οποίας περιορίζεται μόνο από τον ρυθμό με τον οποίο μπορεί η κάμερα να καταγράψει εικόνες και ανάλογα με την κάμερα και το μέγεθος της περιοχής του αισθητήρα που χρησιμοποιούμε μπορεί να φτάσει και τα 200 frames per second.

Η ακρίβεια της μεθόδου είναι της τάξης των nm και εξαρτάται από την ανακλαστικότητα του δείγματος. Το εύρος στο οποίο μπορεί κανείς να μετρήσει επιτυχώς προφίλ είναι για την συγκεκριμένη διάταξη που αναπτύχθηκε από 0 έως 80μm. Είναι δυνατή η μέτρηση επιφανειών όπως ο οφθαλμός με μικρή ανακλαστικότητα (2,3%) με χρήση ενός κατόπτρου αντίστοιχης ανελαστικότητας, μιας ισχυρής πηγής και μιας πιο ευαίσθητης κάμερας.

Το συνολικό κόστος της διάταξης είναι πολύ χαμηλό, λόγο του ότι δεν χρησιμοποιεί ακριβά εξαρτήματα όπως πηγές laser και πιεζοηλεκτρικά. Η κάμερα είναι κάτι που δεν μπορεί να λείπει από κανένα οπτικό προφιλόμετρο, και η πηγή φωτός είναι μια απλή λάμπα πυρακτώσεως.

Βελτιώσεις:

Η σημαντικότερη βελτίωση που θα μπορούσε να γίνει είναι βελτίωση της χωρικής ανάλυσης. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τα πολλά artifacts που εμφανίζονται στους υπολογισμούς, όπως στην περίπτωση του δείγματος πολυμερούς με ster. Όπως έχω ήδη αναφέρει η κακή χωρική ανάλυση οδηγεί σε μία άθροιση πολλών σημείων για να την μέτρηση του ύψους μιας περιοχής τελικά στο υπολογιζόμενο προφίλ. Αυτό φαίνεται κυρίως αν κανείς παρατηρήσει τους άξονες στο διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζονται τα υπολογιζόμενα προφίλ. Ενώ ο άξονας y που μας δίνει το ύψος του κάθε σημείου στο δείγμα βαθμονομείται σε nm και μπορεί να είναι από 0 έως 80000 , αντιθέτως ο άξονας x, που μας δείχνει σε ποιο σημείο της γραμμής του δείγματος βρισκόμαστε, βαθμονομείται σε μm και συνήθως φτάνει μέχρι το 3000. Αυτό σημαίνει 3mm δηλαδή 3.000.000nm, ενώ όπως είπαμε ο y άξονας φτάνει μέχρι 80.000nm, είναι εμφανείς η διαφορά στην κλίμακα και το γεγονός ότι υπάρχουν τεράστια περιθώρια βελτίωσης. Κάτι τέτοια θα μπορούσε να γίνει εάν μεγεθύνουμε το είδωλο του δείγματος πάνω στο slit, με κάποιο τηλεσκοπικό οπτικό σύστημα. Ένας άλλος πιο περίπλοκος τρόπος είναι να αλλάξουμε το φράγμα περίθλασης και το να μεγαλώσουμε το CCD sensor και κατ' επέκταση να αλλάξουμε την κάμερα με την οποία καταγράφουμε του φασματικούς κροσσούς.

Μία επιπλέον δυνατότητα θα μπορούσε να ήταν η ενσωμάτωση σάρωσης σε βάθος για την μέτρηση προφίλ ακόμα πιο απότομων επιφανειών ή ακόμα και για την μέτρηση της μεταβολή του δείκτη διάθλασης σε διαφανεί μέσα όπως ο κερατοειδής. Η προσθήκη αυτή θα μπορούσε να γίνει με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών και κατάλληλου λογισμικού του πακέτου LABVIEW. Ωστόσο η χαμηλή ανακλαστικότητα του κερατοειδή, και των ινών κολλαγόνου στο εσωτερικό του παραμένει σημαντικό πρόβλημα, ακόμα με χρήση φακών μικροσκοπίου όπως στην συνεστιακή μικροσκοπία.

Εκτός από τη συμβολόμετρο Michelson θα μπορούσε κανείς να φτιάξει το ίδιο προφιλόμετρο και με ένα Mirau. Το Mirau έχοντας όλα του τα μέρη σε έναν

άξονα είναι πολύ πιο σταθερό από το Michelson, και έτσι μπορεί να μας οδηγήσει σε μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα, χωρίς να ανησυχούμε τόσο για δονήσεις από το περιβάλλον. Το Mirau ωστόσο έχει πολύ μεγαλύτερες απώλειες όσων αφορά το φωτισμό, και στην πράξη ενώ πολύ πιο εύκολα παρατηρήθηκαν πραγματικοί κροσσοί, δεν ήταν δυνατόν να γίνει ίδιο και για τους φασματικούς. Αυτό συνέβη γιατί στους πραγματικούς κροσσούς (αυτούς που βλέπουμε σε ένα πέτασμα) σε κάθε σημείο του ανιχνευτή μας όλες οι φασματικές συνιστώσες αθροίζονται και μας δίνουν μια συνολική κατανομή στην ένταση. Αντιθέτως στην περίπτωση των φασματικών κροσσών, σε κάθε σημείο του ανιχνευτή μας απεικονίζεται μόνο μία φασματική συνιστώσα με αποτέλεσμα να έχουμε σημαντικά μικρότερο φωτισμό., Συνεπώς χρειαζόμαστε πολύ μεγαλύτερη ισχύ στην πηγή φωτισμού, ή μεγαλύτερη ευαισθησία στον ανιχνευτή για να «δούμε» φασματικούς κροσσούς.

Παράρτημα:

1. Αλγόριθμος Υπολογισμού Profile

```
1. clear all
2. %
3. %+ smoothing sto result
4. %Epeksigiseis stus akxones (diorθomenes)
5. %Ba8monomisi X axis
6. %Cropping sto cos ta simeia pu einai pano apo 1 kai kato tou -1
7. %DIORθOMENH Ekdosi me 2D Eikones I1 kai I2
8. %
9. %
10. %
11. %
12. %-----
13. %-----
14. %GAUSSIAN CONVOLUTION KAI PHASE UNWRAPING STHN EIKONA GIA KA8E
    GRAMI
15. %-----
16. %
17. %
18. %
19. %Akriveia sto unwrapping tol%
20. tol=0.0001;
21.
22. %
23. %band pu kovete apo pano kai apo kato sti wrapped fasi
24. %oso perisotero θorivo exo toso megalitero prepei na einai to band
25. %oso ligotetero θorivo exo toso mikrotero prepei na einai to band
26. band=pi/3.;
27.
28. %
29. %Paragontas Smoothing
30. sm=0.02;
31.
32.
33.
34.
35.
36. %INPUT
37.
38. flola=double(imread('lol1.bmp','bmp'));
39. fl1a=double(imread('lref1.bmp','bmp'));
40. fl2a=double(imread('lsurf1.bmp','bmp'));
41. flamb=double(imread('lamb1.bmp','bmp'));
42.
43. flol=flola-flamb;
44. fl1=fl1a-flamb;
45. fl2=fl2a-flamb;
46.
47.
48. %
49. %Kaθorismos stepsj kai stepsi me vasi tis analyseis ton eikonon apo to CCD
```



```

50. %
51. sizeof=size(flol);
52. stepsj=sizef(1);
53. stepsi=sizef(2);
54.
55. %
56. %Ka8orismos I kai k
57. %platos fasmatos se mhkos kimatos se nm "platosl", me kentriko l "kentrikol"
58. aristerol=530.018;
59. %platosl=84.912;
60. diamerisil=32./526.; %pixel apo peak se peak 526 ---- 578 - 546 = 32nm apo peak se
    peak
61. for i=1:stepsi
62. % l(i)=((kentrikol-((stepsi/2)*diamerisil))+i*diamerisil);
63. l(i)=aristerol+i*diamerisil;
64. k(i)=1./l(i); %Kymatari8mos se 1/nm
65. end
66.
67.
68. %
69. %NORMALIZATION
70. for j=1:stepsj
71. for i=1:stepsi
72. fcos(j,i)=(flol(j,i)-fl1(j,i)-fl2(j,i))/(2.*real(sqrt(fl1(j,i)*fl2(j,i))));
73. end
74. end
75.
76.
77. %kovo akres
78. for j=1:stepsj
79. for i=1:stepsi
80. if (fcos(j,i)>1.)||((fcos(j,i)<-1.)
81. fcos(j,i)=nan;
82. end
83. end
84. end
85.
86. %
87. %SMOOTHING
88. % for j=1:stepsj
89. % fconv0(j,:)=smooth(l,fcos(j,:),sm,'rloess');
90. % end
91. fconv0=fcos;
92.
93.
94. %normalization mean timis sto 0
95. for j=1:stepsj
96. fconv1(j,:)=(fconv0(j,:));%-(max(fconv0(j,:)+min(fconv0(j,:)/2.)));
97. end
98.
99. %normalization pano sto 1 kai kato sto -1
100. for j=1:stepsj
101. fconv(j,:)=fconv1(j,:)/max(fconv1(j,:)); %sto 1
102. fconv(j,:)=fconv1(j,:)/min(fconv1(j,:)); %sto -1
103. % fconv(j,:)=fconv1(j,:)+(1.-max(fconv1(j,:)));
104. end

```

```

105.
106.
107.
108.      %
109.      %H fasi tou cos einai acos(cos(fasi))=fasi
110.      fasi1=real(acos(fconv));
111.
112.      %Normalization kato sto 0
113.      for j=1:stepsj
114.          fasi2(j,:)=(fasi1(j,:)-min(fasi1(j,:)));
115.      end
116.
117.      %Normalization pano sto pi
118.      for j=1:stepsj
119.          fasi(j,:)=fasi2(j,:)*(pi/max(fasi2(j,:)));
120.      end
121.
122.
123.      % %
124.      % %
125.      % %
126.      % %PHASE UNWRAPING -- UNWRAPED PHASE: g
127.      % %
128.      % %
129.      % %
130.
131.
132.      %Sximatismos wrapped cut fasis
133.      for j=1:stepsj
134.          for i=1:stepsi
135.              if (fasi(j,i)<=band)||((fasi(j,i)>=pi-band)
136.                  cutfasi(j,i)=nan;
137.              else
138.                  cutfasi(j,i)=fasi(j,i);
139.              end
140.          end
141.      end
142.      %
143.      %
144.      %YPOLOGISMOS
145.      %
146.      %
147.      %Ypologismos arxikoy slope
148.      for j=1:stepsj
149.          doff=0;
150.          done=0;
151.          for i=1:stepsi-1
152.              if ((cutfasi(j,i)~=nan)&&(cutfasi(j,i+1)~=nan)&&(done==0))
153.                  if (cutfasi(j,i)-cutfasi(j,i+1))>tol
154.                      slope=-1;
155.                      ucutfasi(j,1)=cutfasi(j,i);
156.                      done=1;
157.                      break
158.                  else
159.                      slope=1;
160.                      ucutfasi(j,1)=cutfasi(j,i);

```

```

161.         done=1;
162.         break
163.     end
164. end
165. end
166.
167. %
168. %
169. %UNWRAPPING
170.     for i=2:stepsi
171.         if (cutfasi(j,i)==nan)
172.             ucutfasi(j,i)=nan;
173.             break
174.         end
175.         if (slope==1)%&&(cutfasi(j,i)~=inf)&&(cutfasi(j,i-1)~=inf)
176.             %Anevenontas pefto se peak
177.             ucutfasi(j,i)=doff+cutfasi(j,i);
178.             if (fasi(j,i)>=pi-band)
179.                 slope=-1;
180.                 doff=doff+pi;
181.                 ucutfasi(j,i)=doff+(pi-fasi(j,i));
182.             end
183.         end
184.         if (slope==-1)%&&(cutfasi(j,i)~=inf)&&(cutfasi(j,i-1)~=inf)
185.             %Katevenontas pefto se peak
186.             ucutfasi(j,i)=(pi-cutfasi(j,i))+doff;
187.             if (fasi(j,i)<=band)
188.                 slope=1;
189.                 doff=doff+pi;
190.                 ucutfasi(j,i)=fasi(j,i)+doff;
191.             end
192.         end
193.     end
194.     ucutfasi(j,1)=ucutfasi(j,2); %arxikoposi akru
195. end
196. %
197. %
198. %
199. %LINEAR FITTING
200. %Robust linear regression gia ypologismeni unwrapped fasi g
201. %
202.     for j=1:stepsj
203.         if (max(fasi(j,:))-min(fasi(j,:)))<=band %Ypologismos gia Leies Komatia
204.             %thh Epifaneias
205.             robfit2=robustfit(k(:),fasi(j,:));
206.             zm(j)=-((robfit2(2))/(4.*pi));
207.             % zm(j)=mean((fasi(j,:)/(4.*pi)));
208.         else
209.             robfit=robustfit(k(:),ucutfasi(j,:)); %Ypologismos grammikis paremvolis gia
210.             %ka8e grammh j, gia oles tis stiles
211.             zm(j)=-((robfit(2))/(4.*pi)); %Ka8orismos anaglyfou apo tin klisi tis
212.             %fashs gia ola ta diaforetika k(i) gia to idio shmeio sto slit
213.         end
214.     end
215. end

```

```

212.
213.     zm1=smooth(zm,0.06,'rloess');
214.
215.     % %PLOTS
216.     % subplot(2,2,1); surf(flol,'linestyle','none','XDataSource','I');Title('Iol apo CCD -
arxeio');Xlabel('Mhkos Kymatos me antistoixia 0.0625nm ana pixel');Ylabel('Shmeia
Deigmatos sto Slit se nm');view([0 90]);
217.     %                                     subplot(2,2,2);
surf(fcos,'linestyle','none','XDataSource','k');colormap(jet);Title('Normalized Cos()=(Iol-I1-
I2)/(2*sqrt(I1*I2))');Xlabel('Kymatari8mos');ylabel('Shmeia Deigmatos sto Slit se nm');
218.     % subplot(2,2,3); surf(fasi,'linestyle','none','XDataSource','k');Title('Phase
(Wrapped) after Normalization and Convolution');Xlabel('Kymatari8mos');Ylabel('Shmeia
Deigmatos sto Slit');
219.     % subplot(2,2,4); surf(ucutfasi,'linestyle','none','XDataSource','k');Title('Unwrapped
Phase');Xlabel('Kymatari8mos');Ylabel('Shmeia Deigmatos sto Slit se nm');
220.     figure; plot(zm1);Title('Ypologismeno Deimga');Ylabel('Ypologismeno Ypsos
Deigmatos sto Slit se nm');Xlabel('Mhkos Slit, ka8e pixel antistoixei se 8µm');%axis([xmin
xmax ymin ymax])

```

2. Αλγόριθμος Simulation Συμβολής

```

1. clear
2. %
3. %Eksosi me 2D eikones I1 kai I2
4. %
5. %-----
6. %DHMIOURGIA EIKONAS ME MODEL
7. %-----
8.
9. %Ta vimata,h alios oi diamerisi mikon kymatos: aksonas x einai
10. %stepsi--Diey8ynsi X Metraei to i
11. %Mhkos Kymatos i->l(i)->stepsi
12. stepsi=1000;
13.
14.
15. %ta simeia tou slit pou anagnorizo sto ccd einai spepsj--Diey8ynnisi Y
16. %Metraei to j
17. %Mhkos Kymatos j->z(j)->stepsj
18. stepsj=1000;
19.
20.
21. %
22. %8orybos se pososto sto CCD
23. noise=0.;
24.
25. %
26. %O pinakas pu antistoixei sto CCD einai jxi
27. %
28. %Diamerisi gia gaussian kampylh
29. A=(stepsi-stepsi/2):(stepsi+stepsj/2)-1;
30. %Dhmiourgia gaussian kampylis
31. E=exp(-4*log(2)*((A-stepsi)/(stepsj/2)).^2);

```

```

32.
33. %Ka8orismos I1 kai I2 san gaussian kampyles (periptosi BS: 50-50)
34. %1-D kampyles I1 kai I2
35. I1a=E;
36. I2a=E;
37. %2D kampyles I1 kai I2
38. for j=1:stepsj
39.     I1b(j,:)=I1a(1,:);
40.     I2b(j,:)=I2a(1,:);
41. end
42.
43. %Eisagogh 8oryboy stis Ireference kai Isurface
44. for i=1:stepsi
45.     for j=1:stepsj
46.         I1(j,i)=I1b(j,i)+noise*rand/100.;
47.     end
48. end
49.
50. for i=1:stepsi
51.     for j=1:stepsj
52.         I2(j,i)=I2b(j,i)+noise*rand/100.;
53.     end
54. end
55.
56.
57. %Dhmiourgia anaglyfou slit
58. for j=1:stepsj
59.     if abs(j-stepsj/2)<=stepsj/4
60.         %z(j)=50.+500.*cos(2*pi*j/3.);           %va8os
61.         z(j)=0.;
62.     else
63.         z(j)=2000.;
64.         %z(j)=2000.+500.*cos(2*pi*j/3.);       %ypsos
65.         %z(j)=rand*1000.;
66.     end
67. end
68.
69. %Diamerish #steps mikon kymatos se nanometra
70. for i=1:stepsi
71.     l(i)=((550-stepsi/2)+i);
72.     k(i)=1./l(i);           %Kymatari8mos se 1/nm
73. end
74.
75.
76. %Ypologismos lol(j,i) meta apo symvoli I1(j,i) me I2(j,i) sto j shmeio tou
77. %slit gia mikos kimatos l(i). Apotelesma einai enas pinakas jxi
78. for i=1:stepsi
79.     for j=1:stepsj
80.         lol(j,i)=(I1(j,i)+I2(j,i)+2*sqrt(I1(j,i)*I2(j,i))*cos(4*pi*z(j)*k(i)))+noise*rand/100.;
81.     end
82. end
83.
84. %Saving Data
85. imwrite(lol,'lol.bmp','bmp');
86. imwrite(I1/4.,'Iref.bmp','bmp');
87. imwrite(I2/4.,'Isurf.bmp','bmp');

```

Αναφορές

- [1] 'High-resolution Profilometry by using phase calculation algorithms for spectroscopic analysis of white-light interferograms', Patric Sandoz, Gilbert Tribillon and Herve Perrin
- [2] 'Profilometry by zero-order interference fringe identification', Patrick Sandoz and Gilbert Tribillon
- [3] 'Unambiguous Profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry', Patrick Sandoz, Robert Devillers and Arturo Plata
- [4] 'An algorithm for Profilometry by white-light phase-shifting interferometry', Patrick Sandoz
- [5] 'Potential of a wavelength sampling approach for Profilometry by phase shifting interferometry', Patrick Sandoz, Jose Calatroni and Gilbert Tribillon
- [6] 'Interferometric profiler for rough surfaces' Paul J. Caber
- [7] 'New Interferometric Profiler for Smooth an Rough Surfaces', Paul J. Caber, StephenJ. Martinek, Robert J. Niemann
- [8] 'Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with Fourier transform spectroscopy', Matthew Hart, David G Vass, and Mark L. Begbie
- [9] 'Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry', Patrick Sandoz
- [10] 'Surface profiling by means of double spectral modulation', Jose E. Calatroni, Patrick Sandoz, and Gilbert Tribillon
- [11] 'Optics', Eugene Hecht
- [12] 'Principle of Optics', M. Born and E. Wolf