ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

UNIVERSITY OF CRETE

Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών

«Φωτοαποδόμηση γηρασμένων βερνικιών με λέιζερ και αξιολόγηση οπτικών μεθόδων τοπολογικού χαρακτηρισμού.»

Της φοιτήτριας :

Αναστασία Κωνσταντίνου

Επιβλέποντες καθηγητές:

κ. Παπάζογλου Δημήτριος,

κα. Πουλή Παρασκευή

Δήλωση Συγγραφικής Ιδιότητας

Εγώ, η «*Αναστασία Κωνσταντίνου*», δηλώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία με τίτλο, «*Φωτοαποδόμηση γηρασμένων βερνικιών με λέιζερ και αξιολόγηση οπτικών μεθόδων τοπολογικού χαρακτηρισμού*», και η δουλειά που παρουσιάζεται σε αυτή είναι δική μου. Επιβεβαιώνω ότι:

- Αυτή η δουλειά πραγματοποιήθηκε ολοκληρωτικά ή κυρίως κατά την υποψηφιότητά μου για τον τίτλο προπτυχιακών σπουδών σε αυτό το πανεπιστήμιο.
- Όπου οποιοδήποτε μέρος αυτής της πτυχιακής εργασίας έχει προηγουμένως κατατεθεί για την απόκτηση πτυχίου ή άλλου τίτλου σε αυτό ή άλλο πανεπιστήμιο, αυτό διατυπώνεται ξεκάθαρα.
- Όπου έχω συμβουλευτεί την δημοσιευμένη δουλειά τρίτων, αυτό αποδίδεται ορθώς.
- Όπου έχω παραθέσει από δουλειά τρίτων, η πηγή δίνεται πάντα. Με εξαίρεση αυτές τις παραθέσεις, αυτή η πτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου προσωπική μου δουλειά.
- Έχω παραθέσει όλες τις κύριες πηγές βοήθειας.
- Όπου αυτή η πτυχιακή εργασία είναι βασισμένη σε συνεργατική δουλειά δική μου και τρίτων, έχω καταστήσει ξεκάθαρο ποια κομμάτια έχουν πραγματοποιηθεί από άλλους και πως συνέβαλα εγώ.

Ημερομηνία _____

Υπογραφή _____

Περιεχόμενα

Περίληψη 6

Κεφάλαιο 1: Συντήρηση πολιτισμικής κληρονομιάς και ανάλυση των υλικών που μελετήθηκαν.....7

1.1. Εφαρμογές των laser για τη συντήρηση έργων τέχνης. 7

1.2. Ζωγραφικά Έργα: Τέχνη και Επιστήμη για τη Διατήρηση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς.....8

1.3. .Βερνίκια και η χρησιμότητά τους στα έργα ζωγραφικής. 9

1.3.1. Βερνίκια που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διεργασίες 11

1.4. Γήρανση βερνικιών τα οποία προέρχονται από φυσικές ρητίνες. 16

Κεφάλαιο 2: Laser και η χρήση του για την αποδόμηση βερνικιών..19

2.1. Η χρήση του KrF excimer LASER για τον καθαρισμό ζωγραφικών έργων. 19

2.1.1. Το KrF excimer laser και οι ιδιότητές του.. 20

2.2. Καθαρισμός στρωμάτων βερνικιών με το φαινόμενο της φωτοαποδόμησης.. 22

Κεφάλαιο 3 : Συμβολομετρία.....25

3.1. Βασικές αρχές της συμβολομετρίας. 25

3.2. Χωρική και χρονική συμφωνία και προϋποθέσεις για να προκληθεί συμβολή. .26

3.3. Το φαινόμενο της συμβολής. 28

3.4. Εφαρμογή της μεθόδου της συμβολομετρίας και η Διάταξη Michelson. 29

3.5. Επιπλέον συμβολομετρικές διατάξεις.....32

3.5.1. Συμβολόμετρο Twyman-Green 32

3.5.2. Συμβολόμετρο κάθετης σάρωσης ή συμβολόμετρο συμφωίας (Vertical scanning or Coherence probe interferometers).....33

Κεφάλαιο 4: Πειραματικές διεργασίες για την φωτοαποδόμηση. 35

4.1. Δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν και πειραματική διάταξη. 35

4.2. Πειραματική διάταξη για την διαδικασία της φωτοαποδόμησης. 35

4.3. Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση και τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων. 36
4.3.1. Φορητό ψηφιακό μικροσκόπιο Dino – Lite 37
4.3.2. Προφιλόμετρο 37
4.4. Πειραματικές διεργασίες φωτοαποδόμησης βερνικιών και ζωγραφικών πινάκων και αποτελέσματα που λήφθηκαν. 39
4.4.1. Αντικείμενα που ακτινοβολήθηκαν και οι συνθήκες ακτινοβόλησης. 40
4.4.2. Αποτελέσματα για το βάθος εγχάραξης. 51

Κεφάλαιο 5 : Πειραματικές διεργασίες για τη συμβολομετρία και αποτελέσματα. 52

5.1. Πειραματική οπτική διάταξη. 52
5.2. Διαδικασία ανάλυσης προφίλ. 54
5.3. Πειραματικά αποτελέσματα. 57
5.3.1. Αποτελέσματα χαρτογράφησης της επιφάνειας. 57
5.3.2. Αποτελέσματα μέτρησης βάθους κρατήρα βερνικιών. 77

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντικές έρευνες. 82

Παράρτημα: 83

Βιβλιογραφία 88

Ευχαριστίες

Θα ήθελα στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές, κ. Παπάζογλου Δημήτριο και κα. Πουλή Παρασκευή που με ενέπνευσαν και με οδήγησαν στον κλάδο της Οπτικής και στην εφαρμογή της για την συντήρηση της Πολιτισμικής Κληρονομιάς. Οι γνώσεις και η καθοδήγησή τους ήταν πολύ σημαντικές για την διεκπεραίωση της πειραματικής διεργασίας αλλά και της ολοκλήρωσης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Θα ήθελα ιδιαιτέρως να ευχαριστήσω την κα. Αλίνα Μελεσσανάκη, την κα. Κωνσταντίνου Μαριλένα και την κα. Δημητρουλάκη Εύα για την υποστήριξή τους και τη βοήθειά τους, όπως και τον κ. Άγγελο Φιλιππίδη, τον κ. Φραγκούλη Νικόλαο αλλά και όλα τα άτομα του εργαστηρίου που προσέφεραν συμβουλές και συνέβαλαν στο οικείο εργαστηριακό περιβάλλον.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου αλλά και τους φίλους μου που με στηρίζουν συνεχώς και μου δίνουν κουράγιο όλο αυτό το διάστημα.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «Φωτοαποδόμηση γηρασμένων βερνικιών με λέιζερ και αξιολόγηση οπτικών μεθόδων τοπολογικού χαρακτηρισμού.» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας του τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών στο Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Λέιζερ (ΙΗΔΛ) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ),στο Ηράκλειο Κρήτης και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2023.

Η εργασία αυτή έχει στόχο την αξιολόγηση του καθαρισμού γηρασμένων/πολυμερισμένων βερνικιών από την επιφάνεια πινάκων με ακτινοβολία λέιζερ. Συγκεκριμένα αποσκοπεί στον τοπολογικό χαρακτηρισμό ακτινοβολημένων επιφανειών δηλαδή, την μέτρηση του βάθους της φωτοαποδόμησης του γηρασμένου προστατευτικού στρώματος βερνικιού, αναπτύσσοντας μια διάταξη και μεθοδολογία μέτρησης που βασίζεται στη συμβολή του φωτός στην προς εξέταση επιφάνεια.

Κεφάλαιο 1: Συντήρηση πολιτισμικής κληρονομιάς και ανάλυση των υλικών που μελετήθηκαν.

1.1. Εφαρμογές των laser για τη συντήρηση έργων τέχνης.

Τα τελευταία χρόνια πολλές σύγχρονες τεχνολογίες έχουν εισαχθεί στο πεδίο της μελέτης και ανάδειξης της Πολιτισμικής Κληρονομιάς με μεγάλη επιτυχία στη συντήρηση και στην ανάλυση αντικειμένων καλλιτεχνικής αξίας. Από αυτές, οι μεθοδολογίες που βασίζονται στα laser, έχουν χαρακτηριστικά επιλεκτικότητας και ευαισθησίας και για αυτό θεωρούνται ιδανικές για ένα τέτοιο ευαίσθητο πεδίο εφαρμογής.

Η χρήση των λέιζερ για τη μελέτη και αποκατάσταση των ζωγραφικών έργων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των έργων και αξίζει να εκτιμηθούν λόγω των πλεονεκτημάτων και των δυνατοτήτων που προσφέρουν. Οι τεχνικές αυτές βοηθούν στην προστασία και διατήρηση των ζωγραφικών έργων με τρόπο που είναι εξαιρετικά σημαντικός διότι είναι μη καταστρεπτικές. Προσφέρουν πλεονεκτήματα που είναι πολύτιμα, δίνοντας τη δυνατότητα να διατηρηθούν τα έργα για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Η πολυπλοκότητα των ζωγραφικών έργων και οι απαιτούμενες πολυδιάστατες διαδικασίες επισημαίνουν την ανάγκη για εξειδικευμένες διαδικασίες που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις μοναδικές απαιτήσεις που προκύπτουν από κάθε έργο. Συνολικά, οι τεχνικές με λέιζερ αποτελούν έναν πολύ σημαντικό και απαραίτητο τομέα για τη διατήρηση και προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς μας, διασφαλίζοντας ότι οι πολύτιμες καλλιτεχνικές δημιουργίες παραμένουν ακέραιες και προσβάσιμες για μελλοντικές γενιές.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία, το φως, η υγρασία αλλά και οι ατμοσφαιρικοί ρύποι, μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την ακεραιότητα των έργων τέχνης. Για αυτό το λόγο είναι επιτακτική η ανάγκη, να παρέχονται στον συντηρητή, εργαλεία με μεγάλη ευαισθησία και επιλεκτικότητα, ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση των έργων και η αισθητική τους αποκατάσταση. Είναι πολύ σημαντικό, να παρέχεται στον συντηρητή η δυνατότητα να παρακολουθεί και να

μπορεί να παρεμβαίνει άμεσα και στοχευμένα κατά τη διαδικασία της συντήρησης. Η χρήση των λέιζερ για την ανάλυση των έργων τέχνης είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει στην επιστήμη της συντήρησης να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στην ανάδειξη των έργων τέχνης, ώστε να παραμένουν αναλλοίωτα με το πέρας του χρόνου. Επιπλέον, η ευελιξία των τεχνικών αυτών και η ποικιλία των πεδίων εφαρμογής τους τις καθιστά πολύτιμα εργαλεία για πολλούς επιστημονικούς σκοπούς.

Τα laser, ως μονοχρωματικές πηγές φωτός, με μικρή διάρκεια παλμού και μεγάλη ένταση, μπορούν να εστιάσουν με μεγάλη ακρίβεια και να επιτρέπουν με αυτόν τον τρόπο την μελέτη και την επεξεργασία των υλικών, με υψηλή επιλεκτικότητα και άμεσο έλεγχο. Οι ιδιότητες αυτές τα καθιστούν εύχρηστα και αποτελεσματικα με πολλές εφαρμογές στον χώρο του καθαρισμού έργων Πολιτισμικής Κληρονομιάς.

1.2. Ζωγραφικά Έργα: Τέχνη και Επιστήμη για τη Διατήρηση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς

Οι πίνακες ζωγραφικής αντιπροσωπεύουν κορυφαία έκφραση της καλλιτεχνικής δημιουργίας και παρουσιάζουν πολλές πτυχές τεχνικών και θεμάτων που αποτυπώνουν τις πολυπλοκότητες της ανθρώπινης εκφραστικότητας. Ως πολιτιστικά και ιστορικά μνημεία, οι ζωγραφικοί πίνακες αποτελούν σημαντικά ερευνητικά αντικείμενα για τη μελέτη των τεχνικών και των υλικών που συνδέονται με την τέχνη της ζωγραφικής. Η γνώση των στοιχείων ενός ζωγραφικού έργου προσφέρει τη δυνατότητα ταυτοποίησης, αξιολόγησης, αλλά και συντήρησής του. Τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από μια μοναδικότητα στην τεχνοτροπία, τη θεματολογία αλλά και τα υλικά τους. Ανεξάρτητα όμως από αυτή τη διαφορετικότητα που παρουσιάζουν στη σύνθεσή τους, τα δομικά τους χαρακτηριστικά είναι κοινά. Τα στοιχεία που επαναλαμβάνονται στα περισσότερα ζωγραφικά έργα τέχνης, διαθέτουν ως πρώτο επίπεδο το λεγόμενο υπόστρωμα, το οποίο μπορεί να ποικίλει και να απαρτίζεται από ασβεστοκονίαμα ενισχυμένο με άχυρα, πέτρα, μέταλλο, κεραμικό, γυαλί, ξύλο, χαρτί, ύφασμα ή και συνδυασμό των παραπάνω. Στο υπόστρωμα, σταθεροποιούνται οι χρωστικές ουσίες οι οποίες είναι διαλυμένες σε κάποιο συνδετικό μέσο οργανικής σύστασης και αυτό το επίπεδο χαρακτηρίζεται ως ζωγραφική επιφάνεια. Τέλος, εφαρμόζεται το βερνίκι, το οποίο είναι ένα διάφανο προστατευτικό στρώμα και αποτελείται από ρητίνες που είναι

διαλυμένες σε αλκοολικά διαλύματα. Χρησιμοποιείται για την ενίσχυση των απεικονίσεων και των χρωστικών αλλά και για την προστασία του έργου.

1.3. Βερνίκια και η χρησιμότητά τους στα έργα ζωγραφικής.

Ρητίνη ορίζεται κάθε ουσία ενός υγρού που θα πήξει σε ένα σκληρό υαλώδες σμάλτο. Οι ρητίνες είναι οργανικές ενώσεις και χωρίζονται στις φυτικές οι οποίες εκκρίνονται από φυτά (φυτικοί χυμοί ή κόλλες), στις ζωικές οι οποίες προέρχονται από έντομα (γομαλάκα) και στις συνθετικές όπου είναι υγρά μονομερή θερμοσκληραινόμενων πλαστικών. Ρητίνες μπορούν να σχηματιστούν και από φυσικά μείγματα, όπως είναι οι ελαιορητίνες (μείγμα ενός λαδιού και ρητίνης). [3]

Ιστορικά η πρώτη γραπτή αναφορά για τη χρήση επικαλυπτικών υλικών έγινε τον από 12^{ο} αιώνα από τον Θεόφιλο, ο οποίος ήταν ένας Γερμανός μοναχός.[4] Τα πρώτα βερνίκια που χρησιμοποιήθηκαν ως υλικά για τη ζωγραφική, προετοιμάζονταν, βράζοντας φυσικές ρητίνες όπως, μαστίχα από τον κορμό του ομώνυμου δέντρου, σανδαράχη από ρητίνη δέντρου σε Αυστραλία και Αφρική ή κολοφώνιο κολοφώνιο από τη ρητίνη πευκοειδών στην Ινδονησία σε ξηραντικά έλαια όπως είναι το λινέλαιο. Τα βερνίκια από έλαια αντικαταστάθηκαν στη συνέχεια με βερνίκια αλκοόλης, τα οποία είναι διαλύματα φυσικών ρητινών σε πτητικό διαλύτη όπως το λάδι ή η τερβινθίνη. Στη συνέχεια, παρουσιάστηκε η φυσική ρητίνη της δάμαρης, η οποία θεωρούταν πιο σταθερή σε σύγκριση με τις προηγούμενες, αφού έπειτα από την εφαρμογή τους και αφού ο διαλύτης εξατμιστεί, τα βερνίκια ρητίνης σκληραίνουν.[5] Τα βερνίκια των προηγούμενων αιώνων έφτασαν μέχρι και σήμερα να έχουν ελάχιστες φθορές, αποδεικνύοντας έτσι την αντοχή τους στο χρόνο. Λόγω των συχνών επεμβάσεων που γίνονταν στου πίνακες ζωγραφικής, αναζητήθηκαν νέα πιο σταθερά βερνίκια όπως αυτά των συνθετικών πολυμερών.

Ο κύριος σκοπός της χρήσης του βερνικιού, είναι να αποτελέσει ένα προστατευτικό στρώμα, άχρωμο και διαφανές, λεπτό, συνεχές και ελαστικό, με μεγάλη διάρκεια ζωής. Τα βερνίκια εφαρμόζονται στους πίνακες ζωγραφικής, είτε για προστασία, διατηρώντας την υγρασία στην επιφάνεια του έργου σε σταθερά επίπεδα, προστατεύοντας το έργο από μηχανικές καταπονήσεις, τη σκόνη αλλά και από την

ορατή και υπεριώδη ακτινοβολία και εμποδίζουν τις επικίνδυνες ατμοσφαιρικές ουσίες να επηρεάσουν την επιφάνεια του έργου.[6] Επιπλέον, έχουν σκοπό την ενίσχυση της αισθητικής του αλλά και τη διατήρηση της αξίας του έργου, δίνοντας λάμψη και ζωντάνια στα χρώματα και στο σύνολο της εικόνας και εξομαλύνοντας μικρές ανομοιογένειες της επιφάνειας. Το λαμπερό αποτέλεσμα που μπορεί να εμφανίζεται σε ένα πίνακα ζωγραφικής, προκύπτει από την υψηλή ανάκλαση που υπάρχει στις λείες επιφάνειες που δημιουργούνται από το βερνίκι το οποίο καλύπτει τις τραχιές επιφάνειες του πίνακα.

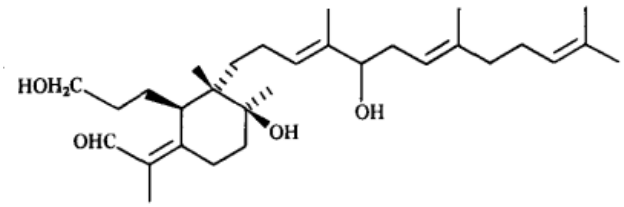
Η επιφάνεια του βερνικιού είναι η πρώτη που έρχεται σε επαφή με τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο και για αυτό το λόγο είναι η πρώτη που υφίσταται τις καταπονήσεις και τις φθορές. Όταν τα βερνίκια εφαρμόζονται σε πίνακες ζωγραφικής, μειώνουν την τραχύτητα του πίνακα δημιουργώντας μια νέα διεπιφάνεια με τον αέρα που είναι πιο ομαλή από τη διεπιφάνεια μεταξύ αέρα- χρώματος.[7] Οι φθορές του βερνικιού σχετίζονται με αυτές της ζωγραφικής επιφάνειας, όπως είναι ο δυσχρωματισμός όπου από διαφανές γίνεται σταδιακά κίτρινο, καφέ, μαύρο και ομιχλώδες, η απώλεια λάμψης, η οξείδωση της επιφάνειας, η δημιουργία ρωγμών και τέλος η παραμόρφωση του έργου.

Τα βερνίκια χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες τα φυσικά και τα συνθετικά. Τα φυσικά βερνίκια προέρχονται από φυσικές πηγές, όπως δέντρα και άλλα φυτά και συνήθως είναι διαυγή. Ένας περιορισμός των φυσικών βερνικιών είναι η δυνατότητα αλλοίωσής τους αφού οι φυσικές ρητίνες οξειδώνονται εύκολα αλλάζοντας όψη, ενώ με την πάροδο του χρόνου και σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν την τάση να σκληραίνουν και να συρρικνώνονται. Σε υψηλές θερμοκρασίες, τα βερνίκια αυτά, μαλακώνουν και δημιουργούν μια πιο ευνοϊκή συνθήκη όπου η σκόνη και οι ρύποι της ατμόσφαιρας προσελκύονται. Η άλλη κατηγορία βερνικιών είναι τα συνθετικά βερνίκια που συντίθενται μέσω τεχνητών διεργασιών, προσφέροντας ένα ευρύ φάσμα αισθητικών, προστατευτικών και ενισχυτικών της ανθεκτικότητας χαρακτηριστικών. Η σανδαράχη και η δάμαρη είναι τα πιο επικρατέστερα βερνίκια προσφέροντας το πλεονέκτημα της εύκολης αφαίρεσής τους στις περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητη η συντήρηση.

1.3.1. Βερνίκια που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διαδικασίες.

Βερνίκι Μαστίχας

Η ρητίνη της μαστίχας που χρησιμοποιείται ως υλικό για βερνίκια προέρχεται από το υποείδος Pistacia lentiscus L. Var. Chia, που φύεται στο νησί της Χίου, στην Ελλάδα. Η μαστίχα είναι απολύτως άχρωμη. Ο γνωστός αποχρωματισμός της, γίνεται αισθητός εντός ενός έτους, όταν γίνεται ορατό ένα ανοιχτό κίτρινο χρώμα. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, η κίτρινη απόχρωση σκουραίνει και μετατρέπεται σε ένα έντονο κίτρινο-πορτοκαλί χρώμα Τα συστατικά τα οποία αναγνωρίζονται στην ρητίνη αυτή είναι τα τετρα- ή πεντακυκλικών τριτερπενοειδών τιρουκαλλόλη, dipterocarpol, lupeol, fl-amyrin, fl-amyrone, oleanonic αλδεΰδη και γερμανικόλη. Η ρητίνη είναι διαλυτή στις αλκοόλες και τα τερπένια. [8]

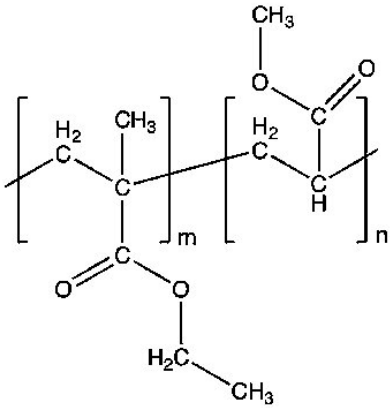


Εικόνα 1.1. Σχηματική απεικόνιση της χημικής δομής της μαστίχας.

Εικόνα 1.2. Απεικόνιση κόκκων μαστίχας.

Paraloid B-72

Η Paraloid B-72 ή B-72 , είναι μια θερμοπλαστική ρητίνη που χρησιμοποιείται για επιφανειακή επίστρωση. Είναι μια ανθεκτική και μη κιτρινίζουσα ακρυλική ρητίνη, η οποία μπορεί να περιγραφεί χημικά ως συμπολυμερές μεθακρυλικού αιθυλεστέρα-ακρυλικού μεθυλεστέρα. Είναι διαλυτή σε ακετόνη, τολουόλιο, αιθανόλη και ξυλένιο, μεταξύ άλλων διαλυτών. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ρητίνης αυτής είναι ότι είναι αρκετά ισχυρή και σκληρή χωρίς να είναι εξαιρετικά εύθραυστη. Είναι πιο εύκαμπτη από πολλές από τις άλλες ρητίνες και αντέχει σε μεγαλύτερες πιέσεις και καταπονήσεις σε σχέση με άλλες. Το μειονέκτημά της χρήσης της είναι ότι όπως και στην περίπτωση άλλων ακρυλικών ρητινών, είναι δύσκολο να εφαρμοστεί ως συγκολλητική ουσία και να χειριστεί με ακρίβεια. Ο καταλληλότερος διαλύτης για τη B-72 είναι η ακετόνη. Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιούνται μίγματα διαλυτών με διάφορες αναλογίες ακετόνης, αιθανόλης και τολουολίου για να μεταβληθεί ο χρόνος επεξεργασίας της ρητίνης και να παραχθούν ελαφρώς διαφορετικές ιδιότητες.[9]



Εικόνα 1.3. Χημική δομή του Paraloid B-72. M : n ¼ 70 : 30.

Εικόνα 1.4. Απεικόνιση κόκκων Paraloid B-72.

Σανδαράχη

Η σανδαράχη είναι μια ανοιχτοκίτρινη φυσική ρητίνη που προέρχεται από το δέντρο Callitris quadrivalvis που είναι ενδημικό της Αυστραλίας και από το δέντρο Tetraclinis articulata είναι ένα αειθαλές κωνοφόρο δέντρο της οικογένειας των κυπαρισσιών Cupressaceae που ενδημεί στη δυτική περιοχή της Μεσογείου. Ανήκει στην κατηγορία των σκληρών ρητινών και συναντάται σε μορφή κόκκων, οι οποίοι είναι σκληροί και εύθραυστοι, με λευκή κονιορτοποιημένη επιφάνεια λόγω της οξείδωσης. Σχηματίζει ένα διαυγές, σκληρό φιλμ που γίνεται πιο σκούρο και κόκκινο με το πέρασμα του χρόνου. Το κύριο συστατικό της σε αναλογία περίπου 70% είναι το πολυκομμουνικό οξύ) ($C_{20}H_{30}O_2$). Όσο πιο πυκνό είναι το διάλυμα τόσο λιγότερο ξηραίνεται το βερνίκι διότι, η εξάτμιση του διαλύτη είναι πιο αργή και έτσι το βερνίκι παραμένει υγρό για μεγαλύτερο διάστημα. Η σανδαράχη είναι διαλυτή σε αιθανόλη, αιθέρα, ακετόνη και αμυλική αλκοόλη (1-πεντανόλη). Η ρητίνη αυτή, λιώνει στους 150 °C περίπου και μετατρέπεται σε άχρωμο ή ελαφρώς κίτρινο υγρό. Χρησιμοποιείται για την παρασκευή βερνικιών με οινόπνευμα και όταν διαλύεται σε λάδι βρίσκει χρήση στην παρασκευή ψημένων βερνικιών. Τα βερνίκια αυτά στεγνώνουν γρήγορα και χρησιμοποιούνται για ρετουσάρισμα και επιστρώσεις μετάλλων.[10]

Εικόνα 1.5. Απεικόνιση κόκκων σανδαράχης.

Γομαλάκα (Shellac)

Η γομαλάκα ή shellac , είναι μια φυσική ρητίνη που προέρχεται από το θηλυκό έντομο Lac το οποίο ζει σε δέντρα των δασών της Ταϊλάνδης και της Ινδίας. Η γομαλάκα είναι μια φυσική βιολογική συγκολλητική ουσία που έχει πολυμερική μορφή και είναι χημικώς παρόμοια με τα συνθετικά πολυμερή. Είναι διαλυτή στα αλκαλικά διαλύματα, καθώς και σε οργανικούς διαλύτες. Όταν διαλύεται σε αλκοόλη αποκτά μεγαλύτερη αντοχή και σκληρότητα. Η γομαλάκα είναι ανθεκτική στην υπεριώδη ακτινοβολία και δεν σκουριάζει με το πέρασμα του χρόνου καθώς υφίσταται γήρανση. Συναντάται σε αποχρώσεις που κυμαίνονται από ανοιχτό ξανθό έως ένα πολύ σκούρο καφέ.[11]

Εικόνα 1.6. Διαφορετικά χρώματα της γομαλάκας στη φυσική της μορφή.

Κολοφώνιο

Το κολοφώνιο, είναι μια στερεή μορφή φυσικής ρητίνης που προέρχεται από πεύκα και ορισμένα άλλα φυτά, κυρίως κωνοφόρα. Παράγεται με θέρμανση φρέσκιας υγρής ρητίνης ώστε εξατμιστούν τα πτητικά υγρά συστατικά τερπενίων. Είναι ημιδιαφανής και το χρώμα της ποικίλλει από κίτρινο έως μαύρο. Σε θερμοκρασία δωματίου το κολοφώνιο είναι εύθραυστο. Αποτελείται από διάφορα ρητινώδη οξέα, κυρίως αβιετικό οξύ. Είναι συνήθως ένα υαλώδες στερεό, αν και μερικές ρητίνες σχηματίζουν κρυστάλλους, όταν διαλύονται σε διάλυμα. Είναι πολύ εύφλεκτο και διαλύεται στην αλκοόλη, τον αιθέρα, το βενζόλιο και το χλωροφόρμιο. [12]

Εικόνα 1.7. Απεικόνιση κόκκων κολοφώνιου.

Δάμαρη

Η δάμαρη ανήκει στις ρητίνες σκληρού βερνικιού και λαμβάνεται από κωνοφόρα και σκληρά δέντρα χαρακτηριστικά της Νοτιοανατολικής και Ανατολικής Ασίας. Τα δέντρα αυτά εκκρίνουν κολλώδη υπό-προϊόντα, και όταν εξατμιστούν τα πτητικά τους συστατικά παράγεται η ρητίνη. Αποτελείται από ένα μίγμα τετρακυκλικών ενώσεων και πεντακυκλικών όπως και πολυμερισμένων υδρογονανθράκων. Η δάμαρη είναι εξαιρετικά αρωματική αλλά χάνει τη μυρωδιά της καθώς σκληραίνει όταν εκτίθεται για να σχηματίσει ένα διαφανές, εύθραυστο φιλμ στο χρώμα του άχυρου. Όταν αναμιγνύεται με τερεβινθέλαιο, σχηματίζει ένα λεπτό βερνίκι που στεγνώνει διαυγές, λείο και σκληρό. Θεωρείται ότι έχει τις καλύτερες ιδιότητες από τις φυσικές ρητίνες

και είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο βερνίκι για εικόνες, παρόλα αυτά το μειονέκτημά της είναι ότι κιτρινίζει έντονα με τη γήρανση.[10]

Εικόνα 1.8. Απεικόνιση κόκκων δάμαρης.

1.4. Γήρανση βερνικιών τα οποία προέρχονται από φυσικές ρητίνες.

Τα βερνίκια λόγω της συνεχής τους έκθεσης σε περιβαλλοντικές συνθήκες παρουσιάζουν φυσική γήρανση στα ανώτερα στρώματά τους, μειώνοντας έτσι τη φωτεινότητα των λευκών και μπλε σημείων και οι σκοτεινές περιοχές φαίνονται πιο ανοιχτές, εξαιτίας του αποχρωματισμού. Επίσης, παρατηρείται δυσχρωματισμός κυρίως προς τις κίτρινες αποχρώσεις, κάτι το οποίο οδηγεί στην υποβάθμιση της αισθητικής εμφάνισης του έργου. Επιπλέον, η γήρανση μπορεί να προκαλέσει και δομική φθορά στο υλικό το οποίο είναι κατασκευασμένο το έργο τέχνης, προκαλώντας «ρωγμές» (cracquelure) στην επιφάνειά του, αλλοιώνοντας έτσι τη δομική ακεραιότητα του έργου.

Στην πραγματικότητα τα φυσικά βερνίκια αλλοιώνονται μέσα στο χρόνο εξαιτίας των αντιδράσεων οξείδωσης που ενεργοποιούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία και τη θερμότητα. Τα προϊόντα αυτών των αντιδράσεων απορροφούν στα μικρά μήκη κύματος της ορατής περιοχής και είναι η αιτία του δυσχρωματισμού που προκαλείται, αλλά και της απώλειας της οπτικής ομοιογένειας λόγω των μικρορωγμών που προκαλούν σκέδαση. Αυτό παρουσιάζεται και στην αριστερή πλευρά του παρακάτω σχήματος.[7]

Για τους παραπάνω λόγους που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στα ζωγραφικά έργα, αρκετές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη γήρανση των ρητινών που χρησιμοποιούνται ως βερνίκια, με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών της γήρανσης αλλά και της επιβράδυνσης αυτής της διαδικασίας.

Εικόνα 1.9. Σχηματική απεικόνιση μιας διατομής ενός πίνακα ζωγραφικής, που καλύπτεται από ημιδιαφανές στρώμα γηρασμένου βερνικιού (αριστερή πλευρά), ακάλυπτο (κέντρο) και καλυμμένο με φρέσκο διαφανές βερνίκι (δεξιά πλευρά).[7]

Η γήρανση των βερνικιών περιγράφεται με ένα μοντέλο που υποθέτει παρόμοιες διαδικασίες γήρανσης στο φως και στο σκοτάδι. Η αυτοοξείδωση συμβαίνει μόνο παρουσία φωτός και το κιτρίνισμα του βερνικιού σε αυτές τις συνθήκες είναι περιορισμένο. Όταν όμως μετά από την γήρανση υπό φως ακολουθεί γήρανση με θερμότητα, τότε το κιτρίνισμα είναι έντονο και αυτό συμβαίνει διότι κατά τη θερμική γήρανση των (οξειδωμένων) βερνικιών, ο αέρας αντικαθίσταται από άζωτο. Έτσι το κιτρίνισμα αποτελεί μια δευτερογενή μη οξειδωτική θερμική διεργασία που λαμβάνει χώρα μεταξύ των προϊόντων αυτοοξείδωσης. Η οξείδωση στο σκοτάδι προκαλεί ρίζες οι οποίες είναι πολύ δραστικές και ενδιάμεσα προϊόντα που ανασυνδυάζονται. Σημαντικές ποσότητες ριζών είναι παρούσες στα βερνίκια, ακόμα και κατά τη διάρκεια της σκοτεινής αποθήκευσης. Δεδομένου ότι η οξείδωση είναι εντονότερη στο φως παρά στο σκοτάδι, το κιτρίνισμα θα πρέπει να είναι πιο έντονο στο φως. Αυτό όμως δε συμβαίνει εξαιτίας της ταυτόχρονης λεύκανσης που συμβαίνει στο φως.

Οι τριτερπενικές ρητίνες οδηγούνται σε μια σειρά αντιδράσεων, αυτές της οξείδωσης, του πολυμερισμού και της αποσύνθεσης των ενσωματωμένων ενώσεων. Για την γήρανση των βερνικιών, η πιο καθοριστική διαδικασία είναι αυτή της οξείδωσης, διότι λόγω μιας αλληλουχίας μηχανισμών αυτό-οξείδωσης μέσω των ελευθέρων ριζών, το βερνίκι αλλοιώνεται.

Η διαδικασία της γήρανσης των τριτερπενικών ενώσεων αποτελείται από πολλά στάδια. Αρχικά, υπάρχει διέγερση των τριτερπενικών ενώσεων, εξαιτίας της συνεχής τους έκθεσης στην ορατή και υπεριώδη ακτινοβολία, πού φέρει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ελευθέρων ριζών, που αντιδρούν με το διαθέσιμο οξυγόνο. Στη συνέχεια σχηματίζονται υπερόξυ ρίζες, οι οποίες οδηγούν στην απόσπαση των ατόμων υδρογόνου από τα άλλα μόρια και με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται υδροϋπεροξείδια , τα οποία προκαλούν καινούργιες ρίζες και μια νέα αλυσίδα αντιδράσεων που διαδίδεται. Με την επανασύνδεση των δύο ριζών ολοκληρώνεται η αλυσίδα αντιδράσεων. Η διάσπαση όμως, του ομοιοπολικού δεσμού με τον ίσο διαμερισμό ηλεκτρονίων, σε κάθε τμήμα του μορίου για τους δεσμούς υπεροξειδίων που είχαν παραχθεί, προβαίνει στη δημιουργία νέων ριζών και με αυτόν τον τρόπο συνεχίζεται η διαδικασία της αυτό-οξείδωσης, παρά το γεγονός ότι έχουν επανασυνδεθεί οι ρίζες. Η διάσπαση συμβαίνει είτε λόγω φωτός, είτε θερμότητας, βασιζόμενη στην ενέργεια, δημιουργώντας αλκόξυ ρίζες, που αντιδρούν με αιθέρες, κετόνες και αλκοόλες.

Η ύπαρξη ακόρεστων κετόνων που δημιουργούνται κατά την αυτό-οξείδωση, και απορροφούν στο ιώδες τμήμα του φάσματος, προκαλούν τον δυσχρωματισμό. Επίσης όταν μετακινούμαστε από την επιφάνεια ενός πίνακα ζωγραφικής προς τα ζωγραφικά στρώματα, ο πολυμερισμός μειώνεται. Έχει παρατηρηθεί όμως, ότι η οξείδωση και το κιτρίνισμα των φυσικών ρητινών δεν αρχίζει μετά την εφαρμογή του βερνικιού αλλά από πριν διότι, οι ρητίνες του εμπορίου που θεωρούνται «φρέσκες», βρίσκονται ήδη σε προχωρημένο στάδιο οξείδωσης και περιέχουν ήδη μεγάλες ποσότητες ριζών. Έτσι μόλις η ρητίνη διαλυθεί για να εφαρμοστεί ως βερνίκι, οι ασταθείς ενώσεις που ευθύνονται για την αυτό-οξείδωση, θα διαχυθούν και θα επηρεάσουν ολόκληρη τη ρητίνη το οποίο θα οδηγήσει στην επιτάχυνση της οξείδωσης του υλικού.

Κεφάλαιο 2: Laser και η χρήση του για την αποδόμηση βερνικιών

2.1. Η χρήση του KrF excimer LASER για τον καθαρισμό ζωγραφικών έργων.

Η φθορά η οποία αντιμετωπίζουν τα βερνίκια λόγω της γήρανση είναι εμφανής με το πέρασμα του χρόνου και παρουσιάζεται είτε με αλλαγή χρώματος των επιφανειακών στρωμάτων, είτε με ρωγμές, που αλλοιώνουν την αισθητική του έργου. Η αφαίρεση αυτών των στρωμάτων, καθίσταται απαραίτητο στάδιο για την συντήρηση και την ανάδειξη των ζωγραφικών έργων. Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η διαφύλαξη των έργων από διαβρωτικούς μηχανισμούς, που καταστρέφουν την ακεραιότητά τους, η αισθητική αναβάθμισή τους αλλά και η διευκόλυνση στις μελέτες που γίνονται για αυτά. Τα laser, μπορούν με γρήγορο, ασφαλή και ελεγχόμενο τρόπο να συνδράμουν στον καθαρισμό των ζωγραφικών έργων πιο αποτελεσματικά από τις συμβατικές τεχνικές καθαρισμού, οι οποίες είναι χρονοβόρες και απαιτούν μεγάλη επιδεξιότητα. Για αυτό το λόγο έχουν αναδειχθεί ως ευέλικτα και εύχρηστα εργαλεία για τον καθαρισμό έργων τέχνης, τα τελευταία χρόνια.

Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται οι πίνακες ζωγραφικής, τα οποία είναι κυρίως οργανικής προέλευσης, απορροφούν ισχυρά στο υπεριώδες τμήμα του φάσματος του φωτός και επιτρέπουν την φωτοαποδόμισή τους με ελεγχόμενο και ασφαλή τρόπο και με διακριτική ικανότητα της τάξης μερικών χιλιοστών του χιλιοστού (5-20 micrometers) ανά παλμό ακτινοβόληση.[13] [Zafiropoulos 1998, Georgiou 1998, Pouli 2010].

2.1.1. Το KrF excimer laser και οι ιδιότητές του.

Ο ορισμός της λέξης laser προέρχεται από το ακρωνύμιο «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» το οποίο μεταφράζεται ως «Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας». Μια τυπική διάταξη laser αποτελείται από μια το ενεργό υλικό και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο κατόπτρων, όπου το ένα είναι ημιπερατό και το άλλο ολικής ανάκλασης και τα οποία καθορίζουν την κοιλότητα. Τα μόρια ή τα άτομα του ενεργού υλικού, διεγείρονται σε πιο υψηλές ενεργειακές καταστάσεις από αυτή της θεμελιώδους και με την αποδιέγερσή τους, η οποία έχει διάρκεια μερικά nanosecond, προκαλούνται φωτόνια τα οποία εκπέμπονται σε όλες τις διευθύνσεις. Μερικά από τα αυτά διαδίδονται στον άξονα της κοιλότητας του laser, ανακλώνται συνεχώς μεταξύ των κατόπτρων και προκαλούν την εξαναγκασμένη αποδιέγερση του ενεργού υλικού. Το αποτέλεσμα είναι η εκκίνηση μιας αλυσιδωτής αντίδρασης παραγωγής φωτονίων και με αυτόν τον τρόπο το σύστημα που έχει δημιουργηθεί ξεκινάει να συμπεριφέρεται ως ενισχυτής φωτός. Τα φωτόνια τα οποία προκύπτουν εκπέμπονται στη διεύθυνση του άξονα της κοιλότητας και το φαινόμενο παίρνει διαστάσεις χιονοστιβάδας. Στη συνέχεια το σύστημα έρχεται σε ισορροπία και η δέσμη του laser εγκαταλείπει την οπτική κοιλότητα από την πλευρά που είναι τοποθετημένο το ημιπερατό κάτοπτρο της κοιλότητας.

Τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει η ακτινοβολία laser είναι η κατευθυντικότητα, η μονοχρωματικότητα και η συμφωνία. Η κατευθυντικότητα προκύπτει από το ότι μόνο τα κύματα που διαδίδονται πάνω στον άξονα της κοιλότητας μπορούν να διαδοθούν εκτός αυτής. Η ιδιότητα της μονοχρωματικότητας προέρχεται από το γεγονός ότι μέσα στην κοιλότητα του laser ενισχύεται μόνο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με την κατάλληλη συχνότητα και έτσι τα φωτόνια έχουν την ίδια συχνότητα, άρα το ίδιο μήκος κύματος. Τέλος, η συμφωνία χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την χωρική και τη χρονική, που σχετίζονται με αλλαγή της φάσης των κυμάτων. Αναφερόμαστε στην χωρική συμφωνία, όταν για κάθε χρονική στιγμή δύο σημείων, η διαφορά φάσης του κυματομετώπου είναι μηδενική, ενώ κατά την χρονική συμφωνία δύο σημεία τα οποία βρίσκονται κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης της φωτεινής δέσμης έχουν σταθερή διαφορά φάσης.

Το KrF excimer laser ανήκει στην κατηγορία των laser αερίου, που αποτελούν τα lasers διεγερμένων διμερών και η ορολογία αυτή προκύπτει από τη συντομογραφία excited dimer laser.[14] Η χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση σε αυτά τα laser, δεν υπάρχει στην πραγματικότητα, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός διεγερμένου διμερούς από το σχηματισμό ενός συνδυασμού δύο ατόμων, που μπορεί να υπάρξει μόνο σε διεγερμένη κατάσταση και όταν αποβάλλεται η ενέργεια διέγερσης, διασπάται. Η δέσμη αυτών των laser παράγεται από μίγμα ευγενούς αερίου όπως το κρυπτό, το ξένο ή το αργό και ενός αλογόνου αερίου όπως το χλώριο ή το φθόριο. Με μία ηλεκτρική εκκένωση του μίγματος, μπορούν να παραχθούν μόρια που προέρχονται από την ένωση ενός διεγερμένου ατόμου και ενός ατόμου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Το διεγερμένο διμερές, έχει διάρκεια περίπου 10 ns, τα οποία είναι αρκετά ώστε να λειτουργήσει το laser στο υπεριώδες. Όταν αποβληθεί το φωτόνιο από το διμερές, τα άτομα διαχωρίζονται. [15]

Τα excimer laser, έχουν αρκετά σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η υψηλή ενέργεια ανά παλμό, οι υψηλές ενέργειες φωτονίων που δίνουν τα χαμηλά μήκη κύματος της υπεριώδους περιοχής του φάσματος, η μεγάλη ομοιογένεια του προφίλ της δέσμης αλλά και η μικρή χρονική διάρκεια παλμών. Για αυτό, θεωρούνται ιδανικά για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό έλεγχο. Τα excimer laser, εκπέμπουν σε διάφορα μήκη κύματος στο υπεριώδες (193, 248, 308 nm) με διάρκεια παλμού φωτός στα 10 ns.

Το KrF excimer laser, είναι ένα laser διεγερμένου διμερούς και τα αέρια με τα οποία λειτουργεί είναι το κρυπτό και το φθόριο και εκπέμπει στα 248 nm. Η αποτελεσματική φωτοαποδόμηση των στρωμάτων βερνικιών στους πίνακες γίνεται διότι, οι ομάδες των ατόμων που υπάρχουν στα μόρια των χημικών ενώσεων των βερνικιών αλλά και τα προϊόντα που δημιουργούνται από τη γήρανσή τους, απορροφούν ισχυρά στο υπεριώδες, επιτρέποντας μεγάλη ενέργεια να απορροφάται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια.

2.2. Καθαρισμός στρωμάτων βερνικιών με το φαινόμενο της φωτοαποδόμησης.

Η αφαίρεση του βερνικιού από πίνακες ζωγραφικής, είναι μια συνήθης διαδικασία συντήρησης, που εφαρμόζεται από τους συντηρητές πολιτιστικής κληρονομιάς. Περιλαμβάνει την απομάκρυνση σκόνης και ρύπων από τις επιφάνειες των ζωγραφικών έργων και την αφαίρεση των γηρασμένων βερνικιών. Σκοπός αυτών των εργασιών είναι η αποκατάσταση της αισθητικής του έργου, φέρνοντάς το κοντά στην αρχική του κατάσταση. Η διαδικασία του καθαρισμού, με τη χρήση ήπιων διαλυτών ή και μηχανικών μέσων όπως το νυστέρι, μπορεί να είναι χρονοβόρα αλλά και μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα, όπως το να γίνει διείσδυση χημικών διαλυμάτων στα βαθύτερα στρώματα του πίνακα. Σε πολύ λίγες περιπτώσεις, οι παραδοσιακές μέθοδοι μπορούν να επιτύχουν έναν απόλυτα ελεγχόμενο και επιλεκτικό καθαρισμό, για αυτό το λόγο συνιστάται η εφαρμογή laser, για την απομάκρυνση των αλλοιωμένων στρωμάτων, που στηρίζεται στο φαινόμενο της φωτοαποδόμησης, με τη χρήση laser που εκπέμπει στο υπεριώδες. Ένας τέτοιος αποτελεσματικός καθαρισμός, μπορεί να προσφέρει στους συντηρητές καλύτερα και πιο γρήγορα αποτελέσματα, όσο αφορά το κομμάτι της συντήρησης ενός έργου τέχνης.

Με τον όρο φωτοαποδόμηση (laser ablation), περιγράφεται η διαδικασία της απομάκρυνσης υλικού από μια στερεή επιφάνεια με τη χρήση ισχυρής δέσμης laser. Για να έχουμε επιτυχημένη φωτοαποδόμηση θα πρέπει να αφαιρείται συγκεκριμένο πάχος βερνικιού χωρίς να επηρεάζεται το υπόστρωμα. Για αυτό θα πρέπει να είναι προσεκτική η επιλογή του μήκους κύματος με το οποίο θα ακτινοβολεί το laser, οι παλμοί οι οποίοι θα εφαρμοστούν αλλά και η πυκνότητα ενέργειας.

Η σύσταση και το είδος του υλικού που είναι προς αφαίρεση καθορίζει το μήκος κύματος το οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να έχουν γίνει οι κατάλληλες μελέτες του υλικού που θα ακτινοβοληθεί. Είναι σημαντική η προσεκτική επιλογή της πυκνότητας ενέργειας (Fluence) που θα χρησιμοποιηθεί. Για να γίνει αποτελεσματικός και ασφαλής καθαρισμός θα πρέπει η τιμή της πυκνότητας ενέργειας που θα εφαρμοστεί να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή στην οποία αφαιρείται το ανεπιθύμητο στρώμα. Η πυκνότητα ενέργειας (F) ορίζεται ως το πηλίκο

της ενέργειας παλμού προς το εμβαδόν της επιφάνειας αλληλεπίδρασης [16] και ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της είναι :

$$F = \frac{E}{S} \left(\frac{J}{m^2}\right) \quad \textbf{(1)}$$

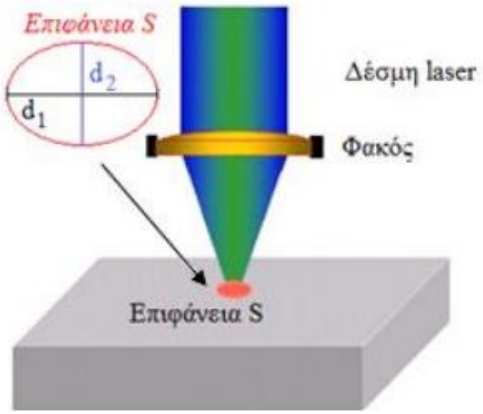
Το εμβαδόν της επιφάνειας αλληλεπίδρασης S (spot size), όπου προσπίπτει η δέσμη, έχει ελλειπτικό σχήμα και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$S = \pi \cdot R_1 \cdot R_2 = \frac{\pi}{4} \cdot d_1 \cdot d_2 \quad \textbf{(2)}$$

Όπου :

d_1 : Ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης.

d_2 : Ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης.



Εικόνα 2.1. Απεικόνιση ακτινοβόλησης ακτίνας laser σε δείγμα.

Επίσης, για να επιτευχθεί ομοιογενής καθαρισμός θα πρέπει να προσαρμοστεί και ο αριθμός παλμών που θα εφαρμοστεί, ανάλογα με το πάχος και τη μορφολογία του στρώματος/ φιλμ που θα πρέπει να αφαιρεθεί. Όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες της φωτοαποδόμησης, μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της αφαίρεσης του υλικού που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρα στο υπόστρωμα. Από τις παραμέτρους που έχουν επιλεχθεί αλλά και από τις ιδιότητες του υλικού, το βάθος εγχάραξης (etching depth), δηλαδή το πάχος του υλικού που έχει αφαιρεθεί, κυμαίνεται από μερικά δεκάδες νανόμετρα (nm), έως και μερικά μικρόμετρα (μm).

Η φωτοαποδόμηση αποσκοπεί στην αφαίρεση του εξωτερικού στρώματος του βερνικιού, που έχει πάχος μερικά δεκάδες μικρόμετρα, διατηρώντας όμως ένα λεπτό στρώμα λιγότερου αλλοιωμένου βερνικιού που χρησιμοποιείται ως ασπίδα προστασίας των ζωγραφικών στρωμάτων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια αφού γνωρίζουμε το πάχος το οποίο αφαιρείται με τη χρήση ενός παλμού επομένως υπολογίζεται ο αριθμός των παλμών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ανά σημείο για την αφαίρεση συγκεκριμένου πάχους βερνικιού. Η αφαίρεση τόσο λεπτών στρωμάτων, απαιτεί ελεγχόμενη προσέγγιση, για αυτό το λόγο, ο καθαρισμός πραγματοποιείται με ένα σύστημα σάρωσης που ελέγχεται με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και ενός λογισμικού που είναι σχεδιασμένο ειδικά για αυτόν το σκοπό.

Κεφάλαιο 3 : Συμβολομετρία

3.1. Βασικές αρχές της συμβολομετρίας.

Η ανάγκη για την ανάλυση του βάθους των κρατήρων των ακτινοβολημένων βερνικιών αλλά και της μελέτης των επιφανειών τους, χωρίς οι διαδικασίες αυτές να είναι καταστρεπτικές, μας οδήγησε στη χρήση οπτικών μεθόδων για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Με τη χρήση του φαινομένου της συμβολής του φωτός, μπορούν να μετρηθούν οι εντάσεις της ακτινοβολίας του φωτός, από τις οποίες εξαρτώνται και τα ύψη των επιφανειών. Έχοντας μια μονοχρωματική πηγή, η οποία ταλαντώνεται συνεχώς σε μια συχνότητα, με σταθερή ένταση και προσθέτοντας ένα ακόμα κύμα με ίδια συχνότητα και πόλωση που δεν είναι κάθετη στο αρχικό, προκύπτει ένα κύμα από την επαλληλία των συνισταμένων κυμάτων. Η ένταση του φωτός που προκύπτει, εξαρτάται από το άθροισμα των δύο μεμονωμένων εντάσεων αλλά και από τη διαφορά φάσης των δύο συνισταμένων κυμάτων, δηλαδή την χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο κυμάτων που συμβάλουν και πιο συγκεκριμένα, η διαφορά του οπτικού δρόμου τους (OPD) επί τον κυματάριθμό τους. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω τύπος υπολογισμού της έντασης[38] :

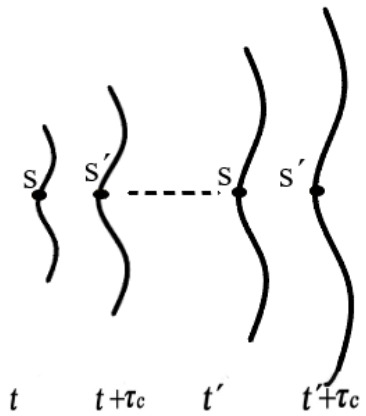
$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(k \cdot OPD) \quad \textbf{(3)}$$

Όταν δύο κύματα που έχουν ίδια αρχική φάση, και ανακλώνται από δείγμα το οποίο αποτελείται από δύο περιοχές με διαφορετικά ύψη, στην περιοχή όπου η επιφάνεια έχει μεγαλύτερο υψόμετρο, θα αναγκάσει το εισερχόμενο κύμα, να διανύσει πιο μικρή οπτική διαδρομή σε σχέση με την άλλη περιοχή όπου έχει πιο χαμηλό ύψος. Προκύπτει έτσι ένα σκαλοπάτι φάσης, λόγω της διαφοράς ύψους μεταξύ των δύο περιοχών της επιφάνειας. Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί τοπολογικός χαρακτηρισμός του δείγματος θα πρέπει το ανακλώμενο κύμα να συμβάλει με ένα κύμα αναφοράς και να παραχθεί σήμα συμβολής. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του συμβολομέτρου, το οποίο εξάγει πληροφορίες για τη διαφορά φάσης αλλά και για την τοπολογία του δείγματος. Η ορατότητα των κροσσών που προκύπτουν από τη συμβολή

εξαρτάται από τον οπτικό δρόμο που διανύει το κύμα. Πιο συγκεκριμένα, η αντίθεση μειώνεται καθώς αυξάνεται ο οπτικός δρόμος του κύματος (OPD) και αυτό συμβαίνει λόγω της χρονικής συμφωνίας της πηγής. [17]

3.2. Χωρική και χρονική συμφωνία και προϋποθέσεις για να προκληθεί συμβολή.

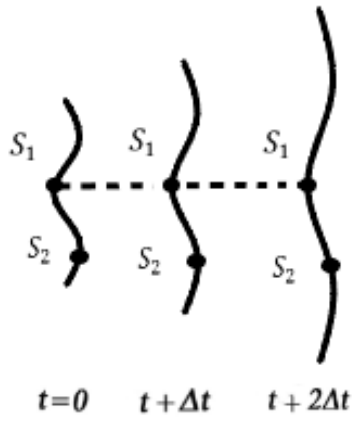
Η συμφωνία (χωρική και χρονική) του φωτός ορίζεται ως ο βαθμός συσχετισμού των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών σε δύο ή και περισσότερα σημεία ενός μετώπου κύματος που διαδίδεται. [18] Η χρονική συμφωνία συνδέεται με το φασματικό εύρος των κυματοσυρμών που εκπέμπονται από την πηγή.



Εικόνα 3.1. Σχηματική απεικόνιση χρονικής συμφωνίας.

Για να οριστεί η χρονική συμφωνία (temporal coherence), θεωρούμε ότι μια πηγή παράγει μέτωπο κύματος που διαδίδεται στο χώρο. Παίρνοντας ένα σημείο S του μετώπου κύματος για τη χρονική στιγμή t και S΄για τη χρονική στιγμή $t + \tau_c$ (Εικόνα 3.1.), αν για αυτή τη χρονική διάρκεια η διαφορά φάσης μεταξύ των διαταραχών των δύο σημείων είναι ίδια για οποιαδήποτε τιμή του τ_c , τότε το μέτωπο κύματος είναι χρονικά σύμφωνο και το τ_c ορίζεται ως χρόνος συμφωνίας. Αν ο όρος αυτός πολλαπλασιαστεί με την ταχύτητα διάδοσης στο μέσο τότε ορίζεται το μήκος συμφωνίας l_c, που εκφράζει το χωρικό διάστημα στο οποίο η φάση του κύματος είναι σταθερή. Οι πηγές laser χαρακτηρίζονται από μεγάλο χρόνο συμφωνίας.

Η χωρική συμφωνία (spatial coherence), σχετίζεται με τις χωρικές διαστάσεις των πηγών που εκπέμπουν τα προς εξέταση μέτωπα κύματος.



Εικόνα 3.2. Σχηματική απεικόνιση χωρικής συμφωνίας.

Για να προσδιοριστεί η χωρική συμφωνία, θεωρούμε ξανά την ύπαρξη πηγής που παράγει μέτωπο κύματος που διαδίδεται στο χώρο.

Για τη χρονική στιγμή t=0 , πάνω στο ίδιο μέτωπο κύματος ορίζουμε δύο σημεία S_1 και S_2. Αν για κάθε χρονική στιγμή t>0 , η διαφορά φάσης των δύο σημείων είναι μηδενική τότε έχει επιτευχθεί πλήρης χωρική συμφωνία μεταξύ του S_1 και S_2. Αν ισχύει το ίδιο για κάθε ζεύγος σημείων, τότε το μέτωπο κύμα θα είναι χωρικά σύμφωνο. [18]

Ο βαθμός συμφωνίας (degree of coherence), είναι θεμελιώδης παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται το φαινόμενο της συμβολής. Η ποιότητα απεικόνισης καθορίζεται από τη συμφωνία του φωτός χρονική και χωρική, όπως και από τα φαινόμενα περίθλασης, μεταξύ των οπτικών συστημάτων. Για παράδειγμα, η ευκρίνεια κατά την απεικόνιση ενός δείγματος από ένα οπτικό όργανο, όπως είναι το συμβολόμετρο, το οποίο φωτίζεται με σύμφωνο φως, για παράδειγμα από μια πηγή laser, δε θα είναι ίδια με το αν φωτιστεί με ψευδομονοχρωματικό φως, ακόμα και αν οι δύο πηγές έχουν το ίδιο μήκος κύματος.

3.3. Το φαινόμενο της συμβολής.

Η συμβολή δύο αρμονικών κυμάτων, τα οποία δεν είναι κάθετα πολωμένα μεταξύ τους, δημιουργεί μια ένταση που είναι στην πραγματικότητα το άθροισμα των δύο μεμονωμένων εντάσεων μαζί με μια ημιτονοειδή διαμόρφωση, η οποία εξαρτάται από των οπτικό δρόμο που διασχίζουν τα δύο κύματα που συμβάλουν αλλά και από το μήκος κύματός τους.

Η εξίσωση της συμβολής [17], [39] προκύπτει από ένα πολωμένο αρμονικό κύμα το οποίο ορίζεται από την εξίσωση:

$$E(r,t) = e(r) \cdot e^{i[g(r) - i\omega + \varphi_0]} \quad \textbf{(4)}$$

Όπου :

$e(r)$: Το διάνυσμα της πόλωσης.

Ω : Η γωνιακή συχνότητα

$g(r) = k \cdot r$: Η φάση εξαιτίας της διάδοσης του κύματος στο χώρο.

$\mathrm{K} = |\mathrm{k}|\hat{\mathrm{k}} = \frac{2\pi}{\lambda}\hat{\mathrm{k}}$: Το κυματοδιάνυσμα.

$\mathrm{R} = \mathrm{x}\hat{\mathrm{x}} + \mathrm{y}\hat{\mathrm{y}} + \mathrm{z}\hat{\mathrm{z}}$: Το διάνυσμα θέσης (έχει αρχή το σημείο της πηγής).

φ_0: Η αρχική φάση.

Η επαλληλία δύο τέτοιων κυμάτων, είναι ουσιαστικά το άθροισμα των δύο συνιστάμενων κυμάτων ($E_{tot} = E_1 + E_2$).

Η ένταση ορίζεται ως :

$$I \equiv \frac{c \cdot \varepsilon_0}{2} E_{tot} E_{tot}^* \quad \textbf{(5)}$$

και η συνολική ένταση των κυμάτων που αλληλεπικαλύπτονται υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\mathrm{I} = \mathrm{I}_1 + \mathrm{I}_2 + \mathrm{c}\varepsilon_0 \mathrm{R}\left\{\mathrm{e}_1 \cdot \mathrm{e}_2^*(\mathrm{r}) \mathrm{e}^{\mathrm{i}[\mathrm{g}_1(\mathrm{r}) - \mathrm{g}_2(\mathrm{r})]}\right\} \quad \textbf{(6)}$$

όπου ο τρίτος όρος είναι ο όρος της συμβολής.

Κανονικοποιώντας το διάνυσμα της πόλωσης προκύπτει η εξίσωση της συμβολής:

$$I=I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot P(r) \cdot cos[\Delta g(r) + \varphi(r)] \quad \textbf{(7)}$$

Όπου :

$P(r)$: Ο παράγοντας πόλωσης

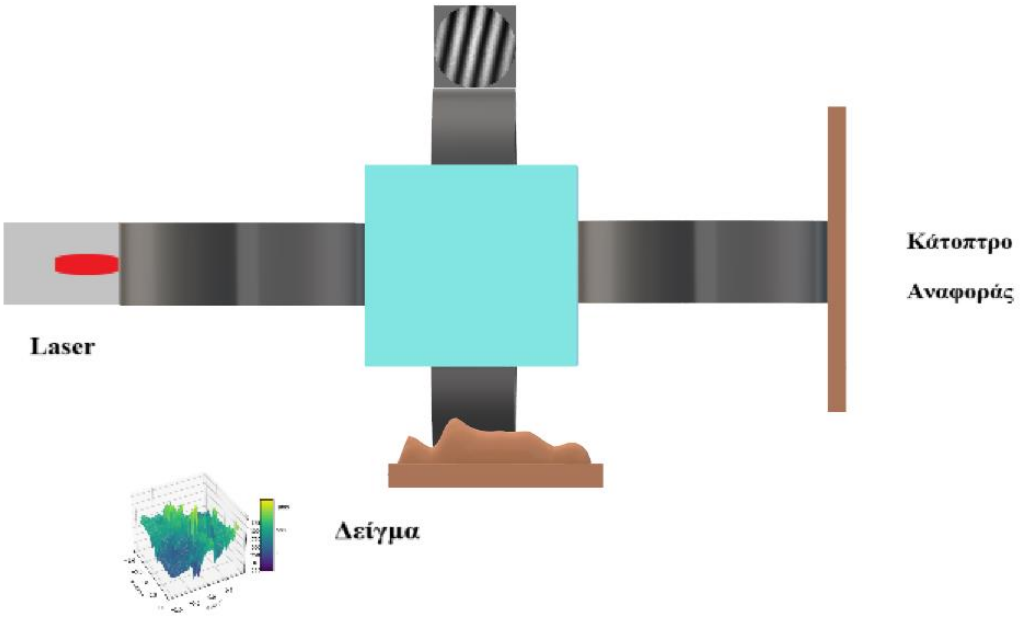
$\Delta g(r)=g_1(r) - g_2(r)$: Η διαφορά φάσης

$\varphi(r) = arg[\hat{e}_1(r) \cdot \hat{e}_2^*(r)]$

3.4. Εφαρμογή της μεθόδου της συμβολομετρίας και η Διάταξη Michelson.

Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση και να βρεθεί το προφίλ της επιφάνειας ενός αγνώστου δείγματος, είναι απαραίτητο ένα αντικείμενο με ιδανικό επίπεδο που θα χρησιμοποιηθεί ως επιφάνεια αναφοράς για παράδειγμα ένα επίπεδο κάτοπτρο. Για κάθε σημείο του δείγματος μετράται μια τιμή ύψους και συγκρίνεται με την τιμή στο αντίστοιχο σημείο της επιφάνειας αναφοράς. Για να εκτελεστεί αυτή η μέτρηση χρησιμοποιείται μια οπτική συσκευή που κατασκευάζεται για να εκτελεστεί το φαινόμενο της συμβολής. Μια τέτοια συσκευή είναι και το συμβολόμετρο. Η οπτική συμβολομετρία παρέχει πολύ ακριβείς μετρήσεις, αφού ακόμα και πολύ μικρές μεταβολές του οπτικού δρόμου, παράγουν μετρήσιμες μεταβολές στην ένταση. Με τη χρήση ενός συμβολομέτρου Michelson, μιας οπτική διάταξη που πήρε το όνομά της από τον εφευρέτη της, τον Άλμπερτ Αβραάμ Michelson, μπορούν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σχετικά με την κατανομή του ύψους μιας επιφάνειας δείγματος, που προκύπτουν από τη μέτρηση του οπτικού δρόμου κάθε σημείου του δείγματος σε σχέση με τον οπτικό δρόμο που διένυσε ένα κύμα αναφοράς. Η διάταξη για μια τέτοια μέτρηση, απαρτίζεται από μια πηγή που εκπέμπει φως προς ένα διαχωριστή δέσμης, ο οποίος με τη σειρά του διαχωρίζει την αρχική δέσμη φωτός σε δύο διαφορετικές. Η πρώτη περνάει από το διαχωριστή δέσμης, στη συνέχεια προσπίπτει στο δείγμα και γυρνάει πίσω στο διαχωριστή δέσμης, ενώ η δεύτερη περνάει από το διαχωριστή δέσμης, στη συνέχεια προσπίπτει στο κάτοπτρο αναφοράς

και επιστρέφει στο διαχωριστή δέσμης. Όταν αυτές οι δέσμες ξανασυναντιούνται στο διαχωριστή δέσμης, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και δημιουργούν το φαινόμενο της συμβολής, το οποίο αποτυπώνεται στη συνέχεια σε μια κάμερα. [19] Τα δύο αυτά ανακλώμενα κύματα συμβάλουν και παρέχουν πληροφορίες για την επιφάνεια του δείγματος, αφού το ύψος της επιφάνειας του δείγματος επηρεάζει τον οπτικό δρόμο που διανύουν τα συνιστάμενα κύματα πριν συμβάλουν και με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλουν την αντίθεση αλλά και την πυκνότητα των κροσσών που δημιουργούνται από τη συμβολή. Ως εκ τούτου, μπορεί να υπολογιστεί το ύψος της επιφάνειας. Στην εργασία αυτή, ακολουθείται η εφαρμογή του φαινομένου της συμβολομετρίας με τη χρήση μονοχρωματικού laser.



Εικόνα 3.3. Σχηματική απεικόνιση τυπικής διάταξης συμβολομέτρου Michelson.

Χρησιμοποιώντας την γενική εξίσωση της συμβολής :

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot P(r) \cdot \gamma_{12}(\tau) \cdot \cos[\Delta g(r) + \varphi(r) + \Delta\varphi_0] \qquad \textbf{(8)}$$

Υποθέτοντας ότι οι δύο δέσμες που συμβάλουν έχουν μηδενική αρχική διαφορά φάσης και την ίδια πόλωση, τότε η φάση του όρου της συμβολής εξαρτάται μόνο από το διάνυσμα $\Delta g(r) = k_1 r_1 - k_2 r_2$, που περιλαμβάνει την κατεύθυνση και τη θέση των δύο ακτινών και με αυτόν τον τρόπο παίρνουμε πληροφορίες για τον οπτικό δρόμο που

διανύουν. Στα συμβολόμετρα Michelson τα διανύσματα k_1 και k_2, έχουν το ίδιο πλάτος, αφού αναφέρονται στο ίδιο μήκος κύματος. Το διάνυσμα φάσης μπορεί να γραφτεί και ως :

$$\mathrm{k_1 r_1 - k_2 r_2 = k\hat{k}_1 r_1 - k\hat{k}_2 r_2 = k(r_1 - r_2) = k(z_1 - z_2) = k \cdot OPD} \qquad \textbf{(9)}$$

και αν αντικαταστήσουμε την παραπάνω σχέση στην γενική εξίσωση συμβολής θα προκύψει:

$$\mathrm{I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot P(r) \cdot \gamma_{12}(\tau) \cdot \cos[k \cdot OPD]} \qquad \textbf{(10)}$$

Αποδεικνύεται ότι η δομή ενός συμβολογραφήματος εξαρτάται από την πηγή, την επιφάνεια του δείγματος αλλά και την κλίση μεταξύ του επιπέδου του δείγματος και του επιπέδου αναφοράς. [17]

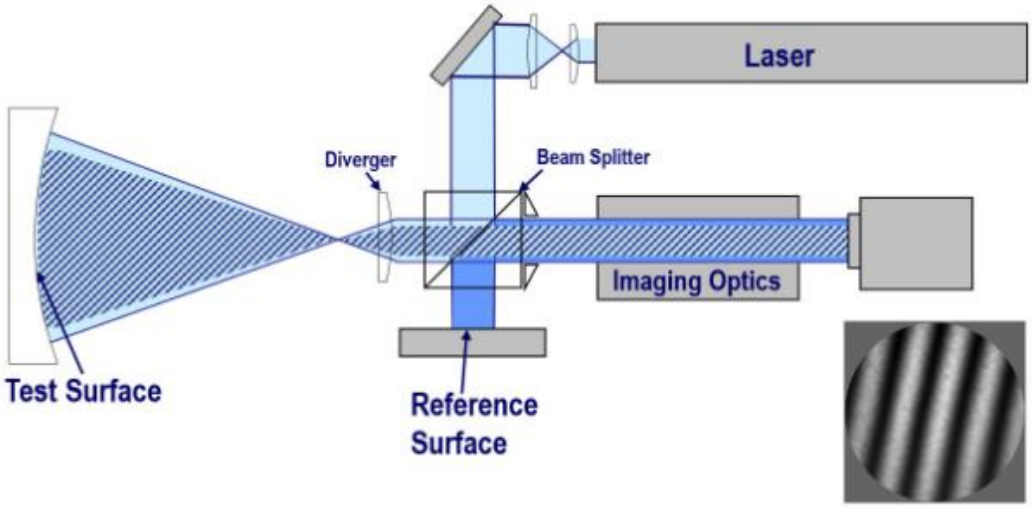
Μια απλή περίπτωση είναι το δείγμα αλλά και η επιφάνεια αναφοράς να είναι επίπεδα κάτοπτρα, όπου προκύπτουν διάφορα μοτίβο συμβολής ανάλογα με το αν το κύμα που τα φωτίζει είναι σφαιρικό ή επίπεδο, αλλά και από την κλίση που έχουν τα επίπεδα μεταξύ τους. Το διάνυσμα της διαφοράς φάσης Δg καθορίζει την κατεύθυνση και το σχήμα της κατανομής της συμβολής. Πιο συγκεκριμένα οι κροσσοί συμβολής που προκύπτουν πάνω σε έναν άξονα που είναι κάθετος στο διάνυσμα k_1 και k_2 ποικίλουν αφού, η περίοδος της μεταβολής της έντασης των κροσσών (Λ), εξαρτάται από το μήκος κύματος της πηγής (λ_0) , αλλά και της γωνίας που σχηματίζουν τα δύο μέτωπα κύματα όταν συμβάλουν, λόγω της κλίσης των κατόπτρων (θ).

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2\sin(\theta/2)} \qquad \textbf{(11)}$$

3.5. Επιπλέον συμβολομετρικές διατάξεις. [20]

3.5.1. Συμβολόμετρο Twyman-Green .

Το συμβολόμετρο Twyman green είναι μια διάταξη συμβολόμετρου με λέιζερ που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του σχήματος της επιφάνειας και της ποιότητας του εκπεμπόμενου μετώπου κύματος. Η δέσμη κατευθύνεται προς το διαχωριστή δέσμης, όπου και χωρίζεται. Η μια δέσμη κατευθύνεται προς ένα κάτοπτρο αναφοράς και η άλλη κατευθύνεται προς την επιφάνεια του δείγματος. Το μέτωπο κύματος μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να ταιριάζει με την κοίλη ή κυρτή καμπυλότητα της επιφάνειας του συστήματος με τη χρήση αποκλίνοντα φακού. Όταν οι δύο ανακλώμενες δέσμες ξανά περνούν από τον διαχωριστή δέσμης, επανασυνδυάζονται, σχηματίζοντας ένα το διάγραμμα της συμβολής. Αυτό προκύπτει από τις αλλαγές της φάσης που προκαλούνται από τη διαφορά φάσης μεταξύ της επιφάνειας δοκιμής και της επιφάνειας αναφοράς. Ο αισθητήρας καταγράφει αυτό το μοτίβο συμβολής.



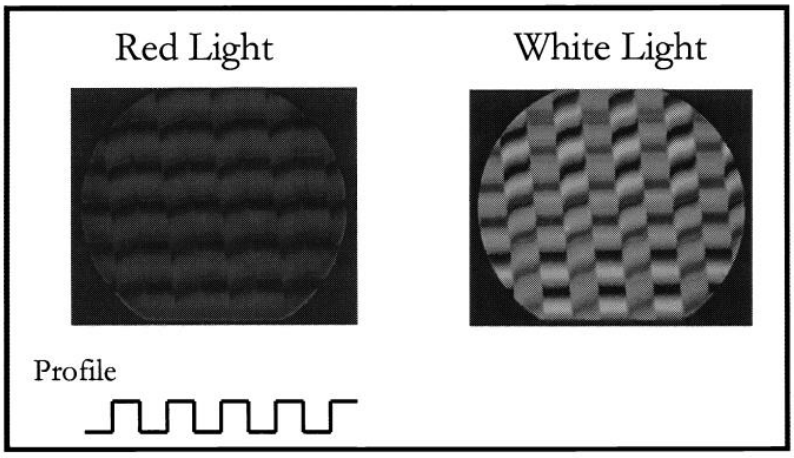
Εικόνα 3.4. Σχηματική απεικόνιση τυπικής διάταξης συμβολομέτρου Twyman-Green.

Η συμβολομετρία αλλαγής φάσης συνδυάζει διάφορα δεδομένα για τη μέτρηση του ύψους όλων των σημείων της επιφάνειας του δείγματος αλλά και για την ακριβή χαρτογράφησή της. Με τη συστηματική μετατόπιση φάσης που επιτυγχάνεται με τη μετακίνηση του κατόπτρου αναφοράς παρέχονται πολλαπλές εικόνες με δεδομένα. Η συμβολομετρία Twyman - Green έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως το ότι οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν ακόμα και σε δύσκολες τοποθεσίες διότι, ο οπτικός σχεδιασμός που αποτελείται από μια μικρή κεφαλή μέτρησης δίνει τη δυνατότητα στο να χρησιμοποιηθεί αυτή η τεχνική ακόμα και σε στενούς χώρους. Επίσης, μπορούν να

πραγματοποιηθούν μετρήσεις πολύ ανακλαστικών επιφανειών παρά τους κραδασμούς χωρίς απομόνωση, κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό ιδιαίτερα για τις μετρήσεις σε μεγάλες διαδρομές.

3.5.2. Συμβολόμετρο κάθετης σάρωσης ή συμβολόμετρο συμφωνίας (Vertical scanning or Coherence probe interferometers)

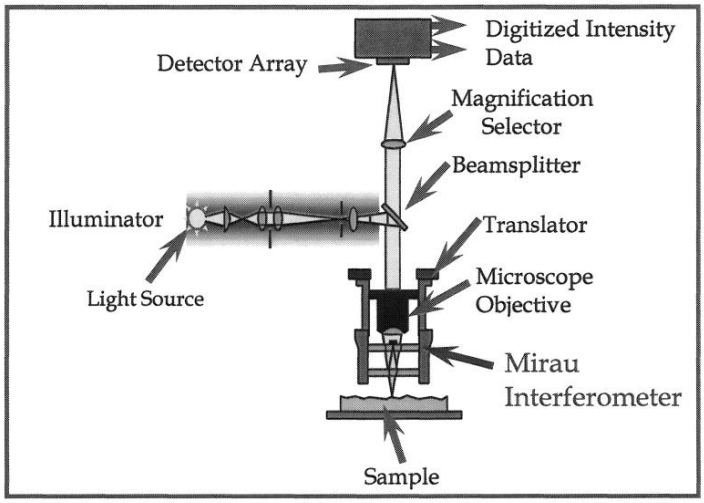
Η συμβολομετρία αλλαγής φάσης παρέχει μεγάλη ακρίβεια όμως έχει περιορισμένο δυναμικό εύρος γιατί η διαφορά φάσης μεταξύ δύο γειτονικών σημείων δεδομένων πρέπει να είναι μικρότερη από λ/4. Μια τεχνική που αντιμετωπίζει αυτούς τους περιορισμούς είναι η εκτέλεση της μέτρησης με τη χρήση δύο ή περισσότερων μηκών κύματος . Μέσω της εξίσωσης $\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$, δίνεται η μέγιστη υψομετρική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων δεδομένων. Επιλέγοντας προσεκτικά δύο μήκη κύματος είναι δυνατόν να αυξηθεί σημαντικά το εύρος της μέτρησης σε σχέση με αυτό που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός μόνο μήκους κύματος. Με τη χρήση μιας λευκής πηγής φωτός, περιορίζεται η ασάφεια στον αριθμό των κροσσών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα .



Εικόνα 3.5. Απεικόνιση κροσσών με μονοχρωματική πηγή (αριστερά) και με πηγή λευκού φωτός (δεξιά) .

Με τη χρήση του λευκού φωτός μπορούμε να παρατηρήσουμε τους κροσσούς ακόμα και αν η διαφορά φάσης είναι μεγαλύτερη από λ/4. Στην κάθετη σάρωση χρησιμοποιείται μια λευκή πηγή φωτός. Λόγω του μεγάλου φασματικού εύρους της πηγής, το μήκος συμφωνίας είναι μικρό και οι κροσσοί μπορούν να ληφθούν μόνο όταν οι δύο διαδρομές του συμβολόμετρου ταιριάζουν. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτού του τύπου μέτρησης είναι ότι μόνο μία επιφάνεια μετράται κάθε φορά και απαιτείται μεγάλος αριθμός μετρήσεων για τον υπολογισμό και τον προσδιορισμό μιας μεγάλης επιφάνειας. Με αυτή την τεχνική όμως, παίρνουμε πληροφορίες για το εμβαδό και για τραχιές επιφάνειες με ακρίβεια νανομέτρου, γρήγορα και χωρίς επαφή.

Για τη συμβολομετρία κάθετης σάρωσης, χρησιμοποιείται ένα συμβολόμετρο Mirau δύο ακτινών. Ως πηγή φωτός χρησιμοποιείται ένας λαμπτήρας αλογόνου βολφραμίου. Το φως που αντανακλάται από τη δοκιμαστική επιφάνεια, συμβάλει με το φως που αντανακλάται από την επιφάνεια αναφοράς. Αυτό που προκύπτει από τη συμβολή απεικονίζεται σε ένα CCD ανιχνευτή και διαβάζεται από τον υπολογιστή. Το συμβολόμετρο Mirau μετατοπίζεται και κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης, η απόσταση του φακού από την επιφάνεια αναφοράς παραμένει σταθερή. Εισάγοντας μια μετατόπιση φάσης σε έναν μόνο βραχίονα και καταγράφοντας ταυτόχρονα το μοτίβο συμβολής που παράγεται, είναι δυνατόν να εκτελεστεί είτε συμβολομετρία μετατόπισης φάσης είτε συμβολομετρία κάθετης σάρωσης.



Εικόνα 3.6. Σχηματική απεικόνιση διάταξης της συμβολομετρίας κάθετης σάρωσης .

Το συμβολόμετρο Mirau χρησιμοποιείται για μεγεθύνσεις μεταξύ 10 -50 X, ενώ το συμβολόμετρο Michelson χρησιμοποιείται για χαμηλές μεγεθύνσεις.

Κεφάλαιο 4: Πειραματικές διεργασίες για την φωτοαποδόμηση.

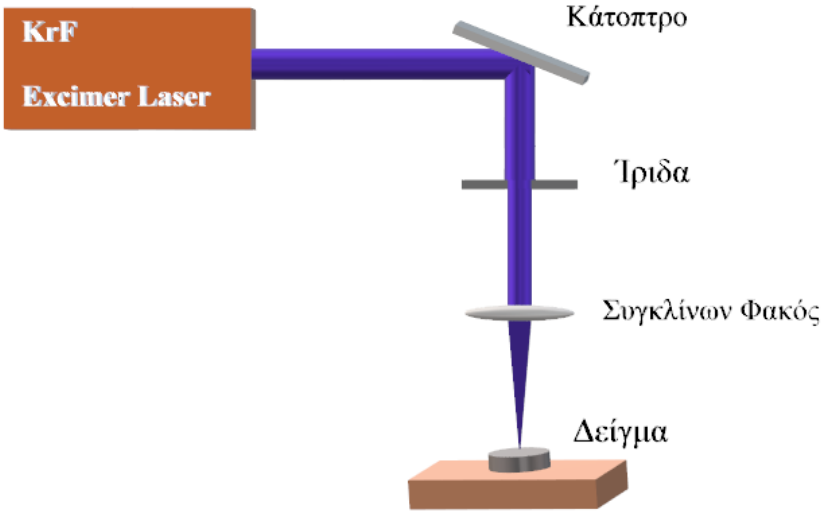
4.1. Δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν και πειραματική διάταξη.

Η αισθητική εμφάνιση, η δομική ακεραιότητα αλλά και η φυσικοχημική υπόσταση των ζωγραφικών έργων που εκτίθενται στα μουσεία, επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν. Η γήρανση των ανώτερων στρωμάτων του βερνικιού και η αλλοίωσή τους, είναι οι συνέπειες της έκθεσής τους, που φανερώνονται με το πέρασμα του χρόνου. Τα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διαδικασίες αυτής της εργασίας, κατασκευάστηκαν με γνώμονα την προσομοίωση των συνθηκών αυτών που επικρατούν μέσα σε ένα μουσειακό χώρο. Η φωτοαποδόμησή τους πραγματοποιήθηκε με τη χρήση KrF excimer laser, όπου η διάταξη του θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης συμπληρωματικές τεχνικές για την παρατήρηση των επιφανειών, όπως το Dino-Lite αλλά και για την αξιολόγηση του βάθους των κρατήρων που δημιουργήθηκαν μετά τη φωτοαποδόμηση, όπως είναι το προφιλόμετρο.

Τα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την διαδικασία της αποδόμησης αποτελούνταν από λεπτά στρώματα βερνικιού μαστίχας, δάμαρης, Paraloid B-72 , σανδαράχης, γομαλάκας και κολοφώνιου, που είχαν τοποθετηθεί πάνω σε δισκία quartz, διαμέτρου περίπου 5 cm, ώστε το υλικό το οποίο βρίσκεται κάτω από το φιλμ βερνικιού να μην απορροφά στο υπεριώδες. Τα δείγματα αυτά, γηράνθηκαν τεχνητά με τη διαδικασία που περιγράφεται στο παράρτημα, ώστε να παραπέμπουν στις συνθήκες έκθεσης που επικρατούν σε μουσειακό περιβάλλον για χρονική διάρκεια δέκα χρόνων περίπου και είχαν διαφορετικά πάχη.

4.2. Πειραματική διάταξη για την διαδικασία της φωτοαποδόμησης.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές διαδικασίες για την φωτοαποδόμηση των βερνικιών παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (4.1.).



Εικόνα 4.1. Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα KrF Excimer laser, Lambda Physik, LXP 205SD, το οποίο έχει διάρκεια παλμού ίση με 30 ns και εκπέμπει στο μήκος κύματος των 248 nm. Οι τιμές της πυκνότητας ενέργειας που απαιτούνται για την φωτοαποδόμηση προσαρμόζονται και η ένταση της δέσμης ελέγχεται με τη χρήση εξασθενητή (attenuator), αλλάζοντας την κλίση του κατάλληλα. Οι τιμές της ενέργειας μετρούνται με τη χρήση ενός ενεργόμετρου και το spot size αποτυπώνεται σε επιφάνεια φιλμ PVC, το οποίο τοποθετείται στη θέση του δείγματος και στη συνέχεια υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 2. Τέλος, η δέσμη laser κατευθύνεται κάθετα προς το δείγμα με την βοήθεια οπτικών και εστιάζεται σε αυτό μέσω ενός συγκλίνοντα φακού με εστιακή απόσταση $f = +20\ mm$.

4.3. Τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση και τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων.

Οι συμπληρωματικές τεχνικές είναι απαραίτητες για την μελέτη των περιοχών που έχουν ακτινοβοληθεί ώστε να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με το εμβαδόν του κρατήρα που δημιουργήθηκε από τη φωτοαποδόμηση αλλά και του βάθους που προκλήθηκε από την αφαίρεση του υλικού. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιήθηκαν διάφορα συστήματα όπως είναι το φορητό ψηφιακό μικροσκόπιο Dino – Lite και το προφιλόμετρο.

4.3.1. Φορητό ψηφιακό μικροσκόπιο Dino – Lite

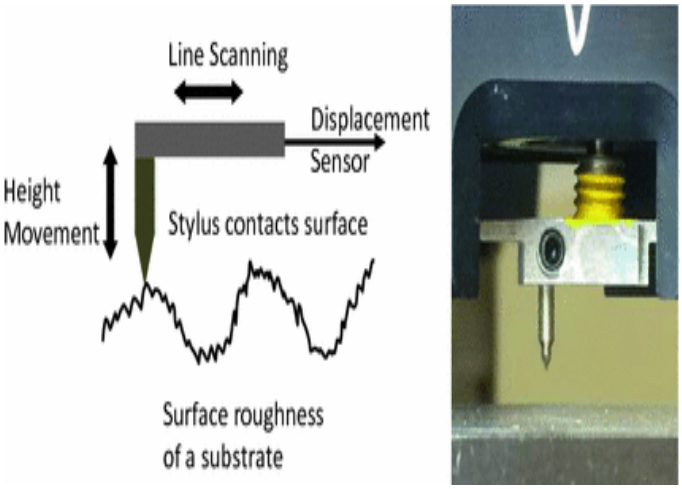
Με το φορητό ψηφιακό μικροσκόπιο Dino – Lite (Εικόνα 4.2.) , πραγματοποιήθηκε η μελέτη των περιοχών των δειγμάτων, που ακτινοβολήθηκαν με laser. Η μεγέθυνση που έχει το μικροσκόπιο αυτό είναι από × 50 μέχρι και × 200 παρέχοντας περισσότερες πληροφορίες και έχει ειδικό φωτισμό χρησιμοποιώντας LED με εκπομπή στο ορατό αλλά και LED με εκπομπή στα 400 nm, στο κοντινό υπεριώδες. Ο λόγος που το Dino-Lite έχει διαφορετικούς φωτισμούς είναι για τη βελτιστοποίηση της οπτικής απόδοσης και τη δυνατότητα προβολής διαφόρων υλικών και δειγμάτων. Το LED με εκπομπή στο ορατό είναι χρήσιμο για την προβολή αντικειμένων με χρώματα που είναι ορατά με το ανθρώπινο μάτι. Βοηθάει στο να διακρίνονται οι λεπτομέρειες και τα χρώματα των δειγμάτων με μεγάλη ευκρίνεια. Το LED με εκπομπή στα 400 nm , αναδεικνύει χαρακτηριστικά σε υλικά που δεν είναι ορατά με το ανθρώπινο μάτι και φθορίζουν.

Εικόνα 4.2. Φορητό ψηφιακό μικροσκόπιο Dino – Lite

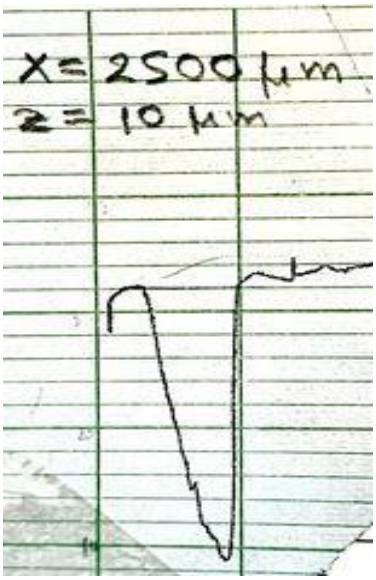
4.3.2. Προφιλόμετρο

Το προφιλόμετρο είναι ένα εργαλείο μέτρησης που προσδιορίζει την επιφάνεια ενός αντικειμένου. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του βάθους των κρατήρων που δημιουργούνται μετά τη διαδικασία της φωτοαποδόμησης. Αποτελείται από ένα αιχμηρό άκρο (ακίδα) που έρχεται σε επαφή με το δείγμα, σαρώνει την επιφάνεια κατά μήκος του κρατήρα και καταγράφει το προφίλ του δείγματος δίνοντας μετρήσεις σχετικά με το βάθος. Με αυτή τη μέθοδο μπορούν να μετρηθούν βάθη κρατήρων έως και 250 μm. Καθώς η ακίδα σαρώνεται την επιφάνεια, η κατακόρυφη μετατόπιση που καταγράφει τη μορφολογία της επιφάνειας στο εσωτερικό του κρατήρα, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα με τη χρήση ηλεκτρομηχανικού μετατροπέα. Το άκρο της ακίδας είναι συνήθως κατασκευασμένο από διαμάντι, αλλά και άλλα υλικά, όπως οξείδιο του αλουμινίου, που χρησιμοποιούνται συχνά ανάλογα με το υλικό της επιφάνειας που είναι προς μέτρηση. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την μέτρηση, είναι το σχήμα και το μέγεθος του άκρου της ακίδας. Το προφιλόμετρο παρέχει υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις, όσον αφορά την κατακόρυφη μετατόπιση, όμως το μειονέκτημα του οργάνου είναι ότι μπορεί λόγω της επαφής που έχει με τα δείγματα, να προκαλέσει επιφανειακή παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της σάρωσης.

Εικόνα 4.3. Προφιλόμετρο Perthometer.



Εικόνα 4.4. Απεικόνιση της διάταξης του προφιλομέτρου.



Εικόνα 4.5. Μέτρηση κρατήρα που λήφθηκε με προφιλόμετρο.

4.4. Πειραματικές διεργασίες φωτοαποδόμησης βερνικιών και ζωγραφικών πινάκων και αποτελέσματα που λήφθηκαν.

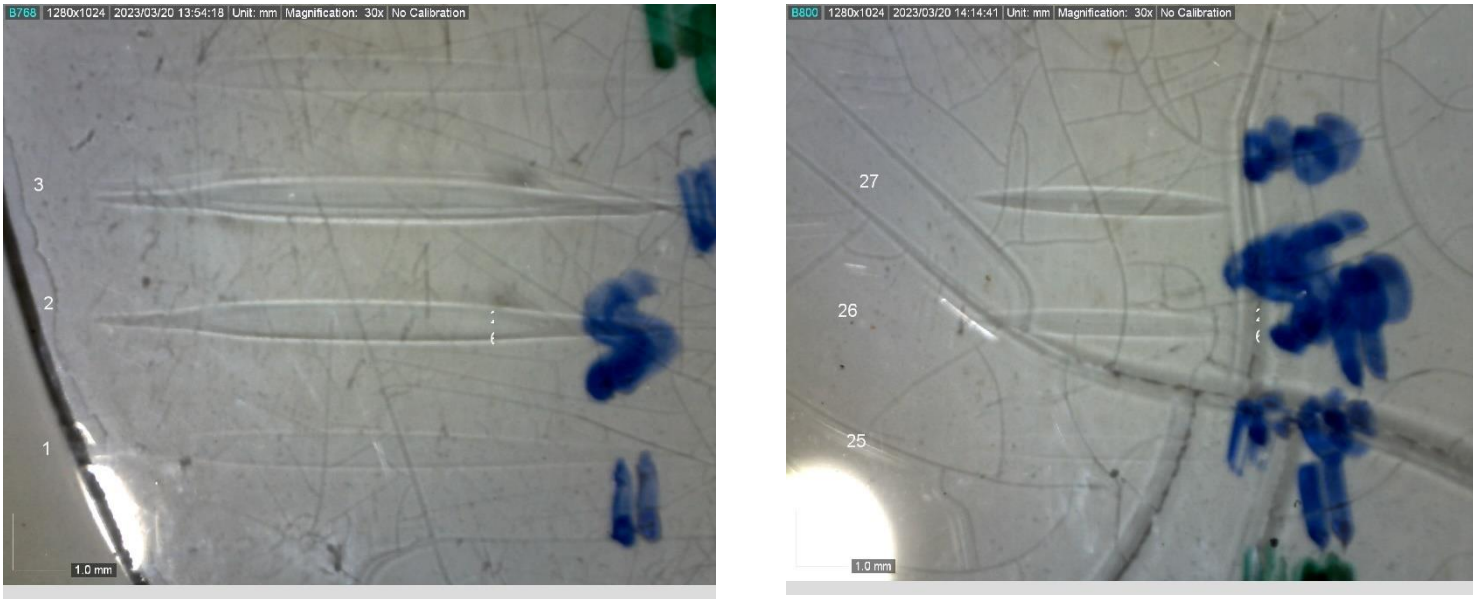
Η φωτοαποδόμηση πραγματοποιήθηκε σε δείγματα βερνικιών με διαφορετικό πάχος, αλλά και σε πίνακες οι οποίοι είχαν στο εξωτερικό τους στρώμα βερνίκι και η ακτινοβόληση γινόταν με ένα πέντε δέκα και σε μερικές περιπτώσεις περισσότερους παλμούς ώστε να δημιουργηθούν διαφορετικά βάθη κρατήρων, ξεκινώντας από μεγάλες πυκνότητες ενέργειας laser μέχρι τις πολύ χαμηλές, όπου δεν επηρέαζε το υλικό. Η ακτινοβόληση των παλμών γινόταν σε διαφορετικά σημεία πάνω στο δείγμα. Για μια επιτυχημένη φωτοαποδόμηση πρέπει να υπάρχει ισχυρή απορρόφηση δηλαδή, μεγάλη ενέργεια να απορροφάται σε μικρό βάθος, ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική αφαίρεση του υλικού.

4.4.1. Αντικείμενα που ακτινοβολήθηκαν και οι συνθήκες ακτινοβόλησης.

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Dammar 2

Εικόνα 4.6. Δείγμα Dammar 2 που ακτινοβολήθηκε.

Πίνακας 1. Συνθήκες ακτινοβόλησης Dammar 2 :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.60	1, 5, 10
2	2.20	1, 5, 10
3	1.95	1, 5, 10
4	1.70	1, 5, 10
5	1.50	1, 5, 10
6	1.20	1, 5, 10
7	0.90	1, 5, 10
8	0.55	1, 5, 10
9	0.30	1, 5, 10
10	0.20	1, 5, 10
11	0.10	1, 5, 10

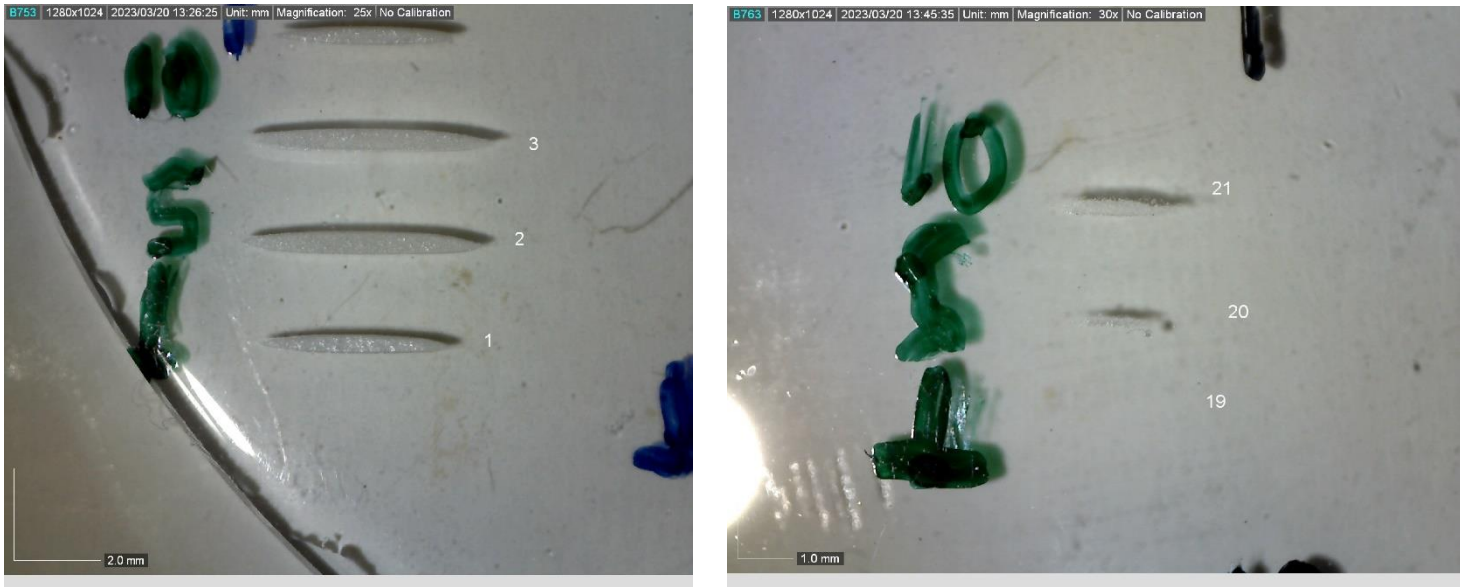


Εικόνα 4.7. Δείγμα Dammar 2 που ακτινοβολήθηκε αριστερά με F=2.60 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω)) και στα δεξιά ακτινοβολήθηκε με F=0.30 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω).

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Paraloid B72

Εικόνα 4.8. Δείγμα Paraloid B72 που ακτινοβολήθηκε.

Πίνακας 2. Συνθήκες ακτινοβόλησης Paraloid B72 :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.50	1, 5, 10
2	2.40	1, 5, 10
3	2.15	1, 5, 10
4	1.80	1, 5, 10
5	1.55	1, 5, 10
6	1.30	1, 5, 10
7	1.00	1, 5, 10
8	0.80	1, 5, 10
9	0.50	1, 5, 10

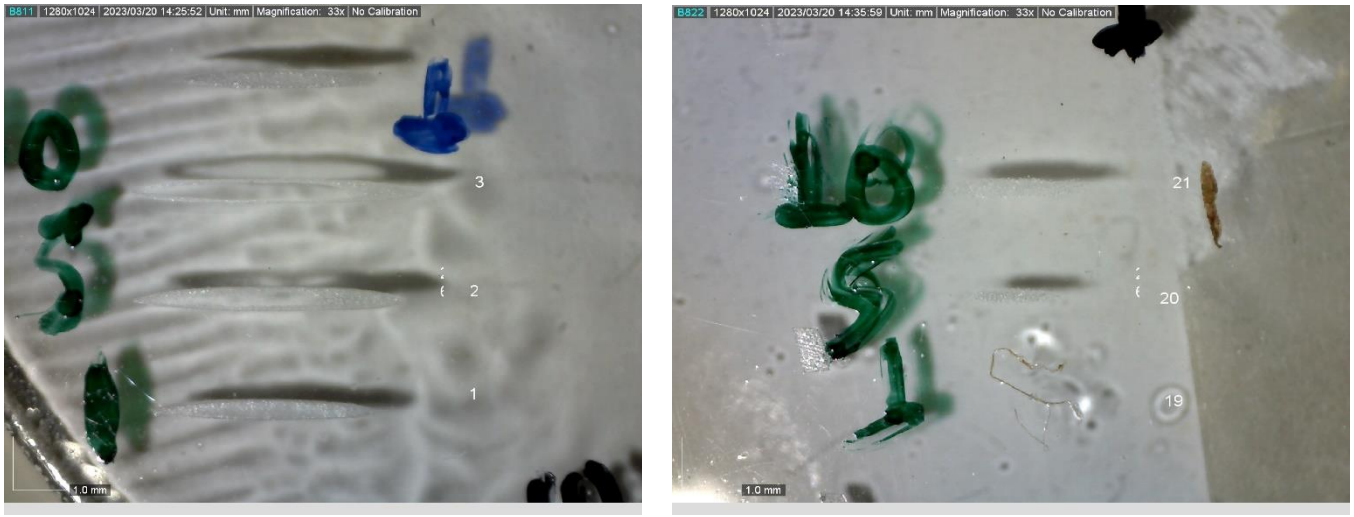


Εικόνα 4.9. Δείγμα Paraloid B72 που αριστερά ακτινοβολήθηκε με F=2.50 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω) και στα δεξιά ακτινοβολήθηκε με F=1.00 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω).

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Σανδαράχη

Εικόνα 4.10. Δείγμα σανδαράχης που ακτινοβολήθηκε

Πίνακας 3. Συνθήκες ακτινοβόλησης Σανδαράχης :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.50	1, 5, 10
2	2.35	1, 5, 10
3	2.20	1, 5, 10
4	1.90	1, 5, 10
5	1.60	1, 5, 10
6	1.30	1, 5, 10
7	1.10	1, 5, 10
8	0.85	1, 5, 10
9	0.50	1, 5, 10
10	0.30	5, 10

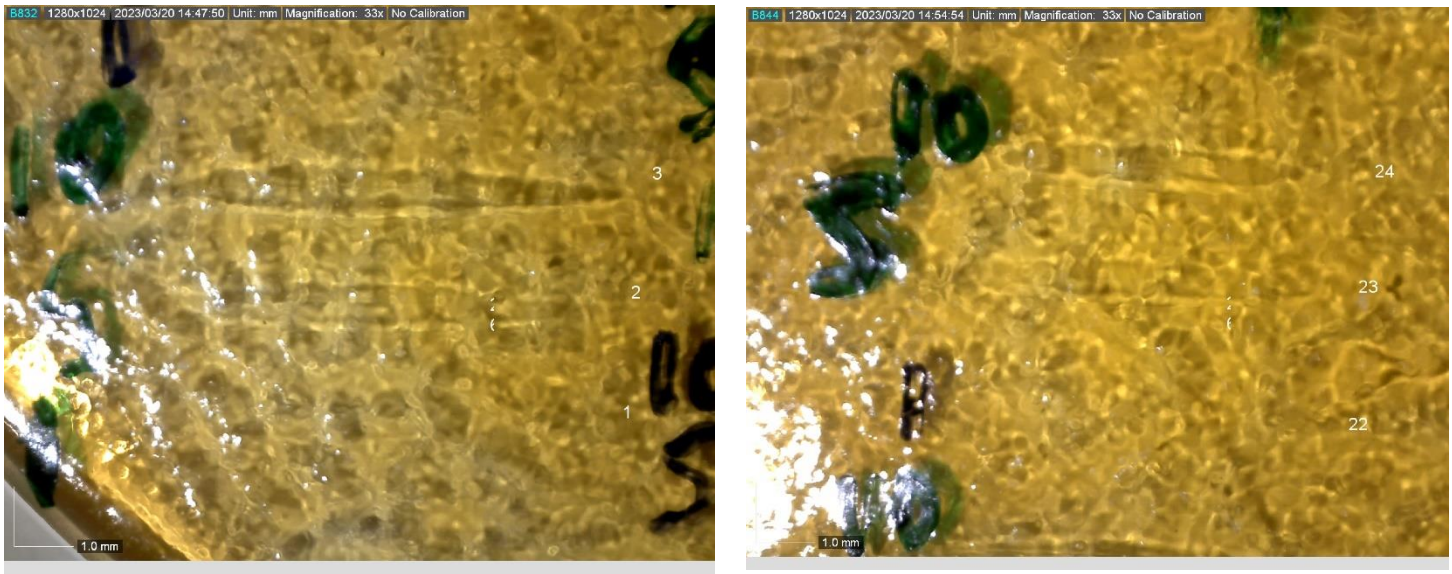


Εικόνα 4.11. Δείγμα Σανδαράχης που αριστερά ακτινοβολήθηκε με F=2.50 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω) και στα δεξιά ακτινοβολήθηκε με F=1.10 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω).

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Γομαλάκα (shellac)

Εικόνα 4.12. Δείγμα Γομαλάκας που ακτινοβολήθηκε

Πίνακας 4. Συνθήκες ακτινοβόλησης Γομαλάκας :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.80	1, 5, 10
2	2.60	1, 5, 10
3	2.50	1, 5, 10
4	2.20	1, 5, 10
5	2.00	1, 5, 10
6	1.60	1, 5, 10
7	1.40	1, 5, 10
8	1.00	1, 5, 10
9	0.80	1, 5, 10
10	0.50	1, 5, 10



Εικόνα 4.13. Δείγμα Γομαλάκας που αριστερά ακτινοβολήθηκε με F=2.80 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω) και στα δεξιά ακτινοβολήθηκε με F=1.00 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω).

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Μαστίχα

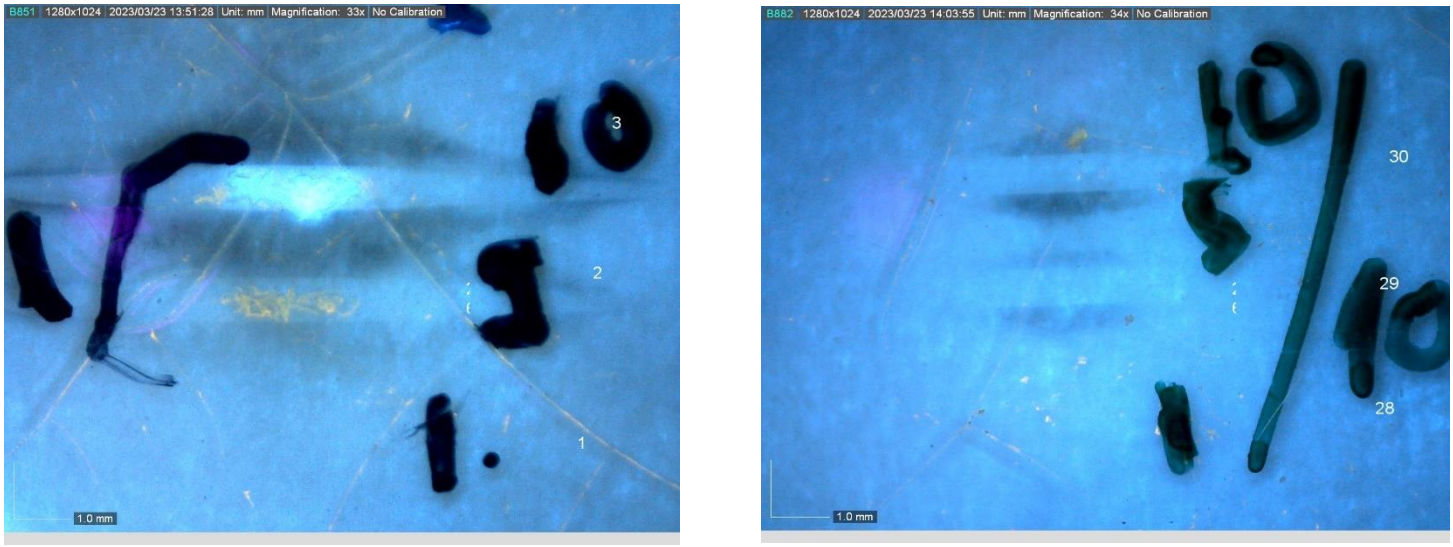
Εικόνα 4.14. Δείγμα Μαστίχας που ακτινοβολήθηκε

Πίνακας 5. Συνθήκες ακτινοβόλησης Μαστίχας :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	1.70	1, 5, 10
2	1.70	1, 5, 10
3	1.55	1, 5, 10
4	1.30	1, 5, 10, 15, 20
5	1.60	20, 5, 10
6	1.50	10, 20, 25, 30, 40, 50
7	1.90	10, 20, 25, 30, 40, 50

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Κολοφώνιο

Εικόνα 4.15. Δείγμα Κολοφώνιου που ακτινοβολήθηκε.

Πίνακας 6. Συνθήκες ακτινοβόλησης Κολοφωνίου :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.85	**1, 5, 10**
2	2.55	1, 5, 10
3	2.30	1, 5, 10
4	2.10	1, 5, 10
5	1.85	1, 5, 10
6	1.70	1, 5, 10
7	1.40	1, 5, 10
8	1.10	1, 5, 10
9	0.90	1, 5, 10
10	0.50	1, 5, 10
11	0.40	1, 5, 10
12	0.20	1, 5, 10
13	0.10	1, 5, 10



Εικόνα 4.16. Δείγμα Κολοφωνίου που αριστερά ακτινοβολήθηκε με F=2.85 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω) και στα δεξιά ακτινοβολήθηκε με F=0.10 J/cm2 με 1,5 και 10 παλμούς (από κάτω προς τα πάνω).

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Πίνακας WPO1 (με βερνίκι δάμαρης και μαστίχας)

Εικόνα 4.17. Πίνακας WP01 που ακτινοβολήθηκε.

Πίνακας 7. Συνθήκες ακτινοβόλησης πίνακα WP01 (Βερνίκι Δάμαρης) :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.70	1, 5, 10, 15
2	2.50	1, 5, 10, 15
3	2.20	1, 5, 10
4	1.80	1, 5, 10, 15
5	1.55	1, 5, 10
6	1.30	1, 5, 10
7	1.10	1, 5, 10
8	0.80	1, 5, 10
9	0.50	1, 5, 10
10	0.30	5, 10

Πίνακας 8. Συνθήκες ακτινοβόλησης πίνακα WP01 (Βερνίκι Μαστίχας) :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	2.50	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30
2	2.60	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30
3	2.40	1, 5, 10, 15
4	2.20	1, 5, 10, 15
5	1.90	1, 5, 10, 15
6	1.60	1, 5, 10, 15
7	1.40	1, 5, 10, 15
8	1.00	1, 5, 10, 15
9	0.60	1, 5, 10, 15

Αντικείμενο που ακτινοβολήθηκε: Πίνακας «Αγία Βαρβάρα» .

Εικόνα 4.18. Πίνακας «Αγία Βαρβάρα» που ακτινοβολήθηκε.

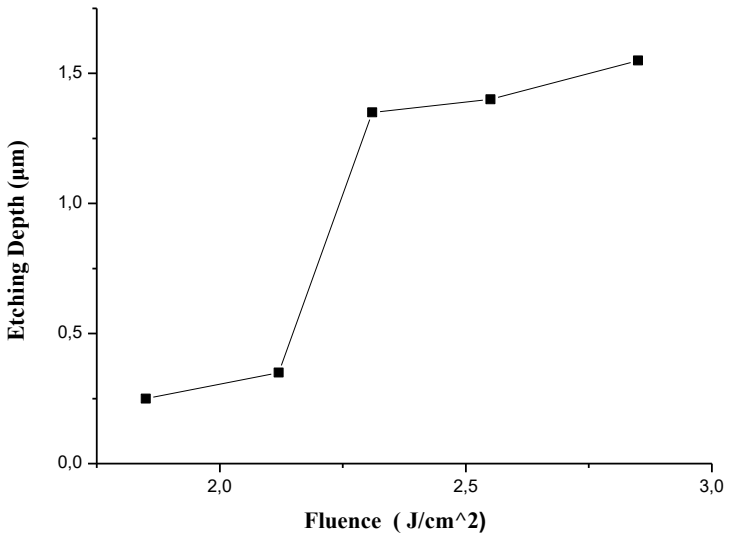
Πίνακας 9. Συνθήκες ακτινοβόλησης πίνακα «Αγία Βαρβάρα» :		
	Πυκνότητα Ενέργειας (J/cm2)	**Παλμοί**
1	1.43	1, 5, 10, 15, 20, 25
2	1.20	1, 5, 10
3	1.03	1, 5, 10, 15, 20
4	0.85	1, 5, 10, 15
5	0.64	1, 5, 10
6	0.46	1, 5, 10, 15
7	0.35	1, 5, 10
8	0.17	1, 5, 10
Scanning	1.18	-

Παρατηρείται πως όταν η ακτινοβόληση γίνεται με τη χρήση δέκα παλμών (N=10), η αποδόμηση του υλικού είναι εμφανέστερη καθώς το βάθος του κρατήρα που

δημιουργείται από την φωτοαποδόμηση με τη χρήση του laser, είναι πιο ευδιάκριτο. Επιπλέον, όσο μειώνεται η τιμή της πυκνότητας της ενέργειας του laser (F), η αποδόμηση του υλικού γίνεται αμελητέα.

4.4.2. Αποτελέσματα για το βάθος εγχάραξης.

Για την μελέτη του ρυθμού εγχάραξης, πραγματοποιήθηκε το φαινόμενο της φωτοαποδόμησης με τη χρήση ενός παλμού και με πυκνότητα ενέργειας του laser από 2.85 $\frac{J}{cm^2}$ έως 1.85 $\frac{J}{cm^2}$. Κάθε ακτινοβόληση του παλμού πραγματοποιήθηκε σε διαφορετικό σημείο της επιφάνειας του δείγματος. Το βάθος του κρατήρα που δημιουργήθηκε λόγω της φωτοαποδόμησης, μετρήθηκε με τη χρήση του προφιλομέτρου. Στο διάγραμμα βάθους εγχάραξης ανά παλμό που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μελέτη της φωτοαποδόμησης του βερνικιού κολοφωνίου συναρτήσει διαφόρων ενεργειών.



Εικόνα 4.19. Διάγραμμα βάθους εγχάραξης ανά παλμό συναρτήσει της πυκνότητας ενέργειας του laser για δείγμα βερνικιού κολοφωνίου.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως όσο ελαττώνεται η πυκνότητα ενέργειας του laser (F), το βάθος εγχάραξης (D) γίνεται αμελητέο.

Κεφάλαιο 5 : Πειραματικές διεργασίες για τη συμβολομετρία και αποτελέσματα.

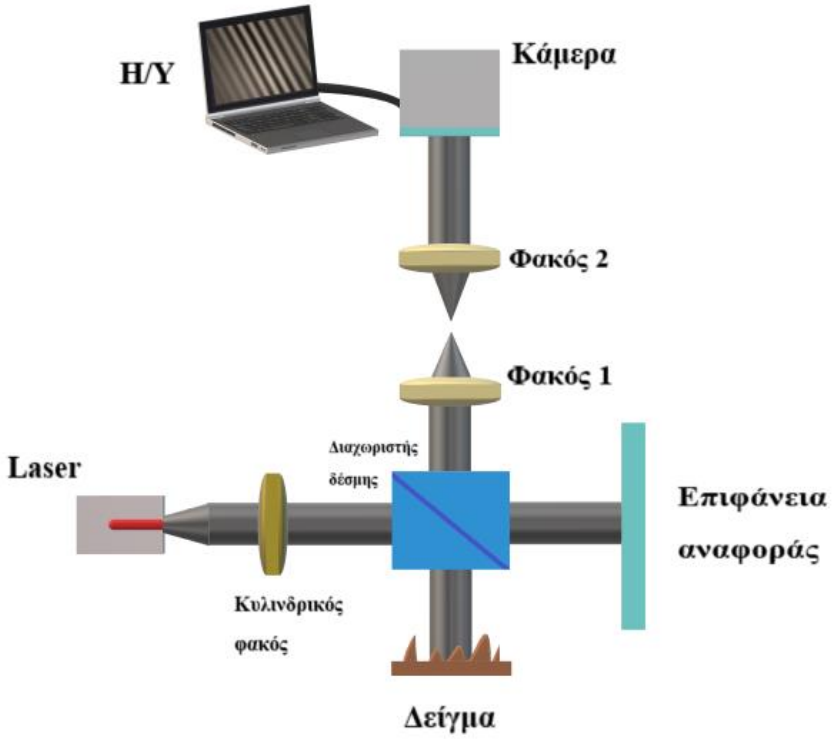
5.1. Πειραματική οπτική διάταξη.

Η διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, είναι μια διάταξη συμβολομέτρου Michelson. Με τη χρήση μιας κάμερας, που είναι τοποθετημένη στην έξοδο το συμβολομέτρου, καταγράφονται οι κροσσοί συμβολής, όταν η διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ του δείγματος και της επιφάνειας αναφοράς είναι μικρότερη από το μήκος συμφωνίας της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται. Για να εντοπιστούν οι κροσσοί συμβολής θα πρέπει πρώτα να εστιάσουμε. Για να γίνει αυτό απεικονίζουμε αρχικά την επιφάνεια αναφοράς και στη συνέχεια εστιάζουμε το δείγμα μετακινώντας τον βραχίονά του. Ένας άλλος τρόπος εστίασης είναι το να γίνει εστίαση του laser, το οποίο το χρησιμοποιούμε σαν φωτεινή πηγή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το να απομονώσουμε την κάμερα τοποθετώντας μπροστά ένα λευκό χαρτί στο οποίο θα απεικονίζονται οι αντανακλάσεις του laser από την επιφάνεια αναφοράς και του δείγματος. Μόλις επιτευχθεί η εστίαση, η διαφορά οπτικού δρόμου μεταξύ της επιφάνειας αναφοράς και του δείγματος είναι κοντά στο μηδέν και έτσι το μόνο που χρειάζεται είναι να αφαιρεθεί η λευκή επιφάνεια και να γίνει μια μικρή ρύθμιση της κλίσης του δείγματος και της θέσης του, ώστε να εμφανιστούν οι κροσσοί συμβολής.

Για την απεικόνιση του δείγματος χρησιμοποιείται ένα τηλεκεντρικό σύστημα δύο φακών, όπου δέχεται παράλληλες ακτίνες, όπως παράλληλες είναι και οι ακτίνες που παράγει, με στόχο όλη η επιφάνεια του δείγματος να εμφανίζεται με την ίδια μεγέθυνση. Στην διάταξη όπου πραγματοποιήθηκε η πειραματική διαδικασία και οι δύο φακοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν φωτογραφικοί. Ο φακός ο οποίος βρίσκεται πιο κοντά στη κάμερα έχει εστιακή απόσταση ίση με 25 mm, ενώ ο φακός ο οποίος βρίσκεται πιο κοντά στο διαχωριστή δέσμης έχει εστιακή απόσταση ίση με 50 mm με αποτέλεσμα η μεγέθυνση να είναι ίση με $\frac{25}{50} = \frac{1}{2}$ και έτσι η εικόνα που παρουσιάζεται είναι συρρικνωμένη.

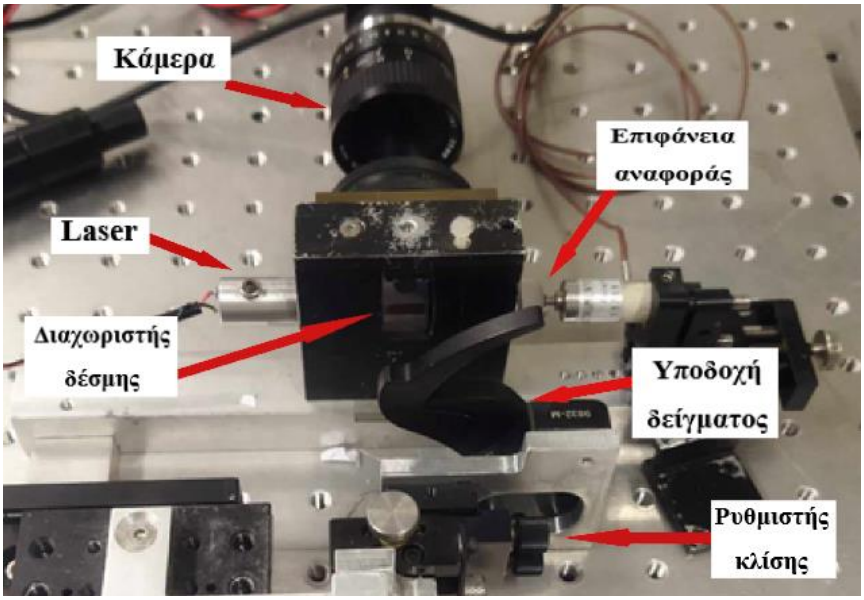
Το δείγμα τοποθετείται σε μια θέση που έχει μικρομηχανισμούς τοποθέτησης και προσαρμογής της κλίσης και έτσι υπάρχει η δυνατότητα της μετακίνησης αλλά και περιστροφής του δείγματος σε όλους τους τρισδιάστατους άξονες (x, y, z, όπου z είναι ο άξονας κάθετος στο τραπέζι το οποίο έχει τοποθετηθεί η συσκευή). Στην παρακάτω εικόνα (5.1) απεικονίζεται σχηματικά η διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές διαδικασίες. Αποτελείται από μια φωτεινή πηγή, στην παρούσα εργασία η πηγή ήταν ένα μονοχρωματικό laser το οποίο είχε εκπομπή φωτός στα 670 nm. Η δέσμη που προκύπτει εστιάζεται μέσω ενός κυλινδρικού φακού και κατευθύνεται προς το διαχωριστή δέσμης. Εκεί η δέσμη χωρίζεται στα δύο με την μια να κατευθύνεται προς την επιφάνεια αναφοράς και την άλλη στην επιφάνεια του αντικειμένου το οποίο είναι προς μελέτη. Στη συνέχεια οι δέσμες αυτές επιστρέφουν πίσω στο διαχωριστή δέσμης, όπου και ξαναενώνονται και στη συνέχεια κατευθύνονται προς το σύστημα

φακών όπου από εκεί μέσω της κάμερας και με τη χρήση ενός φορητού υπολογιστή απεικονίζονται οι κροσσοί συμβολής.



Εικόνα 5.1. Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

Στην παρακάτω εικόνα (5.2) απεικονίζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Η υποδοχή δείγματος, χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των δειγμάτων που είναι προς μελέτη και είναι συνδεδεμένη με ένα μηχανισμό ο οποίος προσαρμόζει την κλίση, που με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με ένα μηχανισμό τοποθέτησης στον άξονα z.



Εικόνα 5.2. Πειραματική διάταξη.

5.2. Διαδικασία ανάλυσης προφίλ.

Για την ανάλυση των προφίλ των επιφανειών των δειγμάτων που μελετήθηκαν και την τοπογραφία τους, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μετασχηματισμού Fourier. [21]. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί με βάση την κλίση του μετώπου κύματος του συμβολόμετρου χρησιμοποιώντας πληροφορίες που δίνονται από τη διαφορά φάσης. Μέσω αυτής, μπορεί να γίνει αντιληπτό το ύψος και το βάθος που υπάρχει στην επιφάνεια του δείγματος.

Για να βρεθεί η μέγιστη ορατότητα της συμβολής, πρέπει να εντοπιστεί η μέγιστη ένταση I_{max} , μέσα από τη δημιουργία του φαινομένου της συμβολής, που πραγματοποιείται με τις αλλαγές του οπτικού δρόμου οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Από την εξίσωση 8, τα $\Delta g(r) + \Delta\varphi_0$, ενσωματώνουν την διαφορά οπτικού δρόμου και με την προσθήκη μιας μετατόπισης Δz, σε έναν από τους δύο βραχίονες, η φάση του διαγράμματος συμβολής θα μετατοπιστεί στον άξονα των z και θα έχει ως αποτέλεσμα η διαφορά οπτικού δρόμου να γίνει ίση με 2Δz. Αυτό σημαίνει ότι όταν ένα βραχίονας μετατοπίζεται κατά Δz, το γράφημα της συμβολής μετατοπίζεται κατά 2Δz. Η σχέση της μετατόπισης φάσης και της προστιθέμενης μετατόπισης Δz προκύπτει από την εξίσωση :

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{2\,\Delta z}{\lambda} \qquad \textbf{(12)}$$

Για την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης, θα πρέπει η μετατόπιση να είναι μικρότερη από το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής που χρησιμοποιείται. Στις πειραματικές διαδικασίες της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε μια πηγή laser που εκπέμπει στα 670 nm.

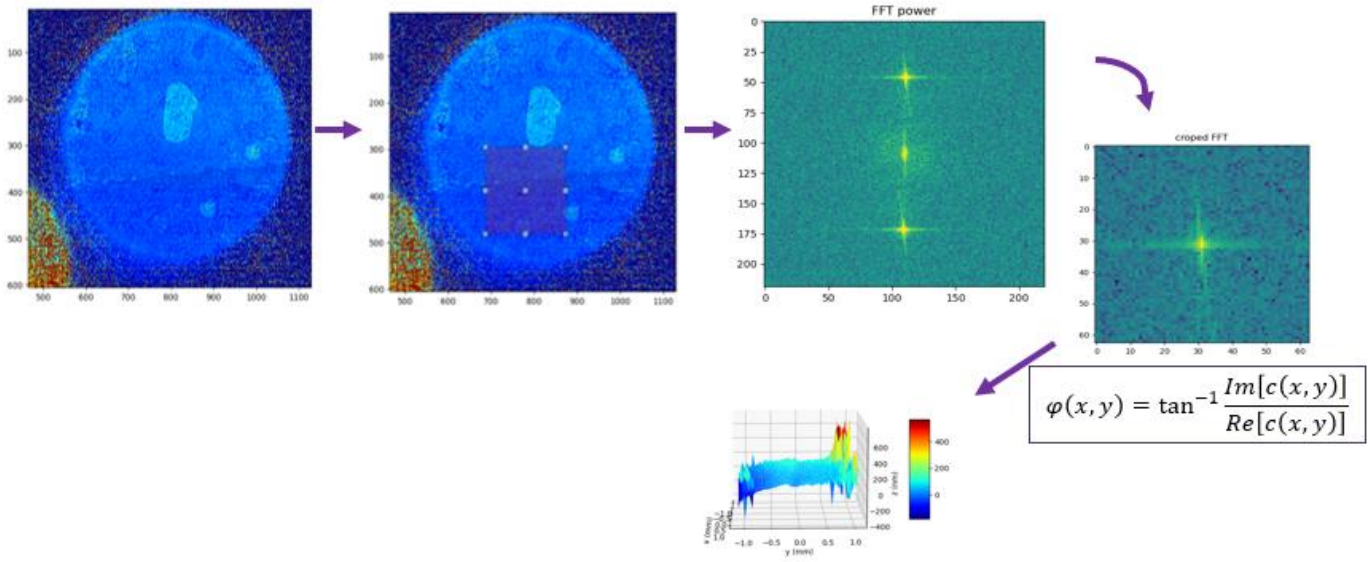
Για τον υπολογισμό της διαφοράς φάσης θα πρέπει να συγκριθούν δύο διαδοχικά γραφήματα συμβολής. Τα γραφήματα αυτά είναι ημιτονοειδή και για αυτό το λόγο κάθε χωρική μετατόπιση προκαλεί μετατόπιση της ημιτονοειδούς χωρικής συχνότητας της φάσης που προκύπτει από την ανάλυση Fourier.

$$F\{g(z-\Delta z)\} = e^{-i\,2\pi\,f\Delta z}\,G(f) \qquad \textbf{(13)}$$

Όπου Δz: η μετατόπιση της συνάρτησης g

και G : ο μετασχηματισμός Fourier του g.

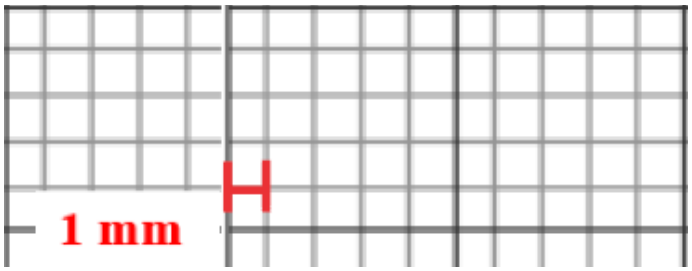
Η διαδικασία ανάλυσης του προφίλ για τον προσδιορισμό της μορφολογίας του δείγματος έγινε με την επιλογή ενός σημείου της επιφάνειας αυτού. Εκεί λαμβάνονται τα δύο μέγιστα των εντάσεων των κροσσών που περιλαμβάνουν την ημιτονοειδή πληροφορία και παρουσιάζονται ως κηλίδες, συμμετρικές ως προς τη μηδενική χωρική ένταση. Επιλέγεται ένα από τα δύο μέγιστα όπου εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier όπου η συνολική μετατόπιση της φάσης μετατρέπεται σε συνολική διαφορά οπτικού δρόμου και δίνονται πληροφορίες σχετικά με τη μορφολογία της προς εξέτασης επιφάνειας.



Εικόνα 5.3. Διαδικασία ανάλυσης προφίλ με τη χρήση μετασχηματισμού Fourier.

Για την βαθμονόμηση του εγκάρσιου άξονα της οπτικής διάταξης με τη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε μια κλίμακα αναφοράς, ακρίβειας χιλιοστού αποτυπωμένη σε μια χάρτινη επιφάνεια. Η εικόνα αυτής της κλίμακας αποτυπώθηκε από το τρέχον οπτικό σύστημα και υπολογίστηκε ότι 3 mm = 3000 μm αντιστοιχούν σε 297.532 pixel επομένως ένα μm/pixel αντιστοιχεί σε 10.08 μm/pixel.

$$\frac{\pi\rho\alpha\gamma\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{o}\ \mu\acute{\varepsilon}\gamma\varepsilon\theta o\varsigma}{\alpha\pi\acute{o}\sigma\tau\alpha\sigma\eta\ \sigma\varepsilon\ pixel} = \frac{3000\ \mu m}{297.532\ pixel} = 10.08\ \mu m/pixel$$



Εικόνα 5.4. Η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για την εγκάρσια βαθμονόμηση της οπτικής διάταξης

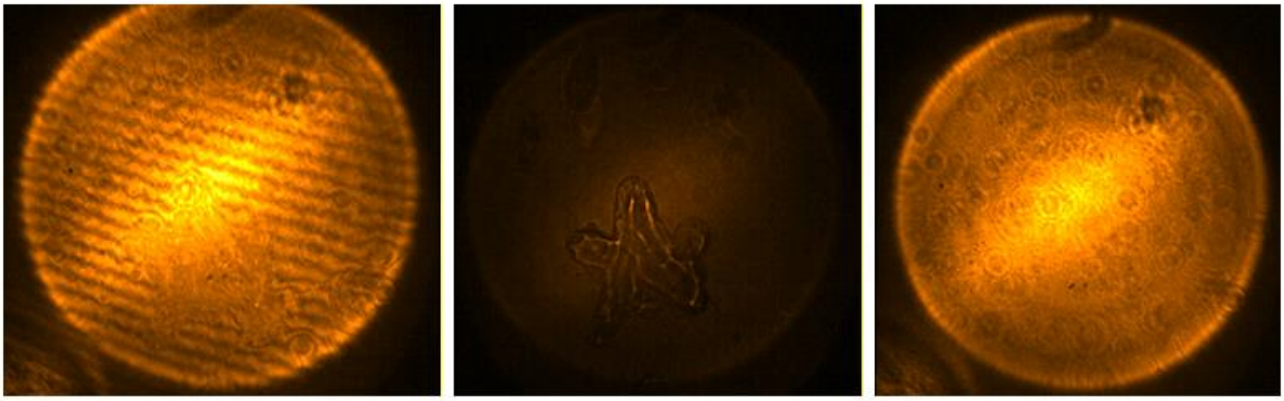
5.3. Πειραματικά αποτελέσματα.

5.3.1. Αποτελέσματα χαρτογράφησης της επιφάνειας.

Τα δείγματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ήταν ζωγραφισμένες γυάλινες επιφάνεια με τη χρήση μαρκαδόρου και κάτοπτρα ζωγραφισμένα με τη χρήση μαρκαδόρου.

Δείγμα 1:

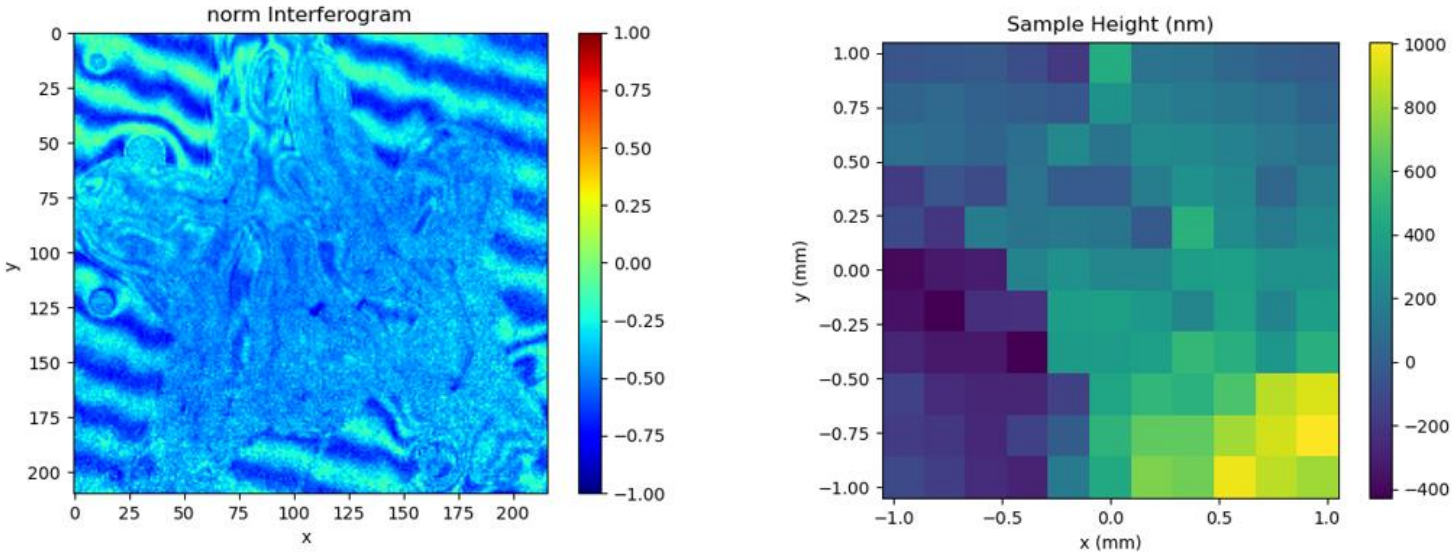
Το επιλεγμένο δείγμα είναι μια γυάλινη επιφάνεια στην οποία απεικονίζεται ένα αστέρι το οποίο έχει ζωγραφιστεί με τη χρήση μαρκαδόρου πάχους 3mm. Το δείγμα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 5.5.1. Στα αριστερά παρουσιάζεται το δείγμα κατά τη διάρκεια της συμβολής, στο κέντρο βρίσκεται η επιφάνεια του δείγματος και δεξιά η επιφάνεια που χρησιμοποιείται ως αναφορά.

Μέτρηση 1η

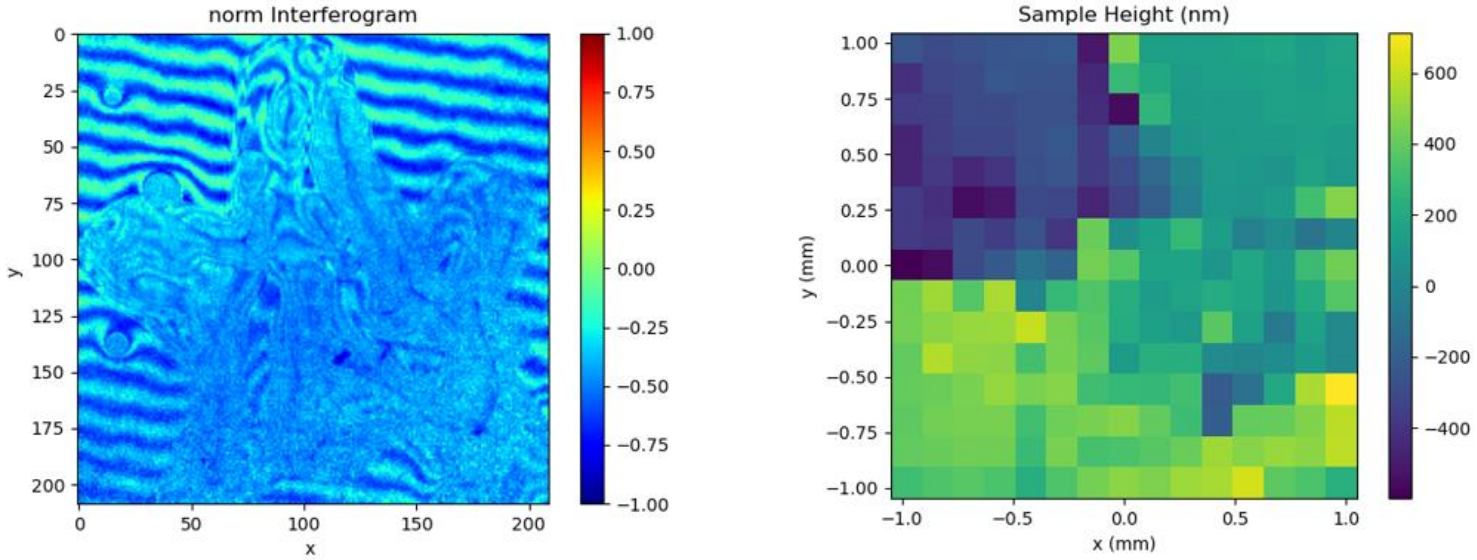
Περίοδος Κροσσών: Λ=191.29090909090908 μm/pixel



Εικόνα 5.5.2. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 2η

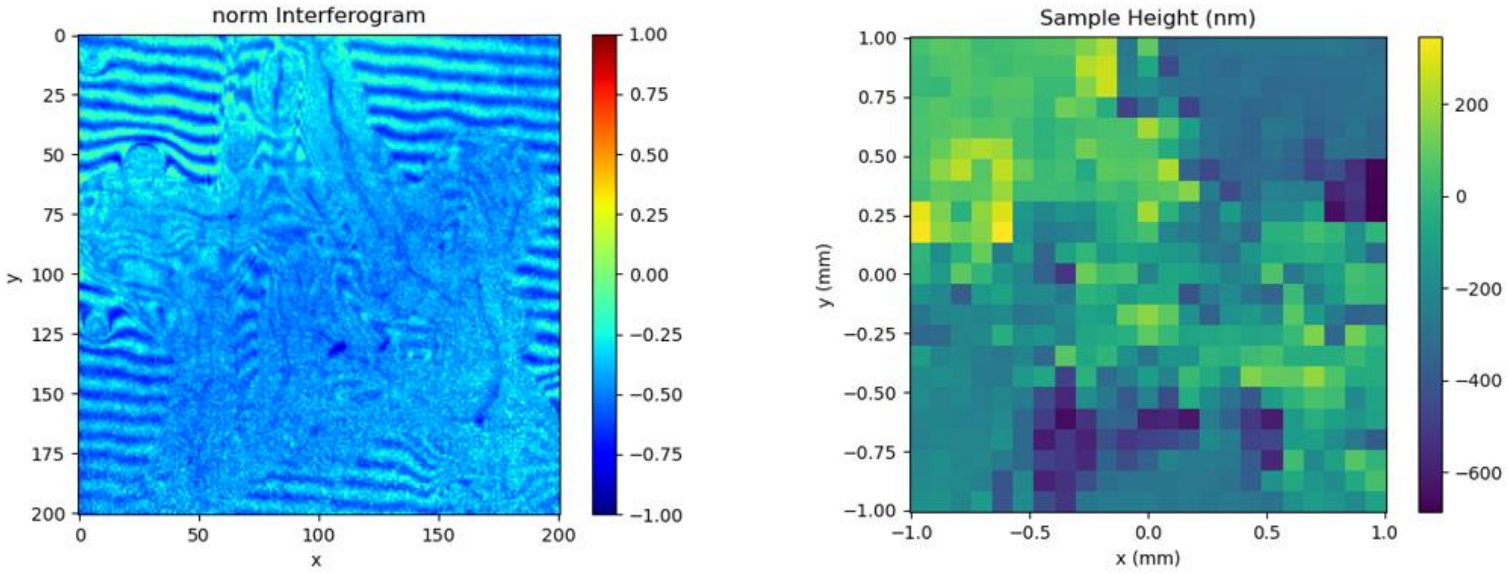
Περίοδος Κροσσών: Λ= 139.612 μm/pixel



Εικόνα 5.5.3. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 3η

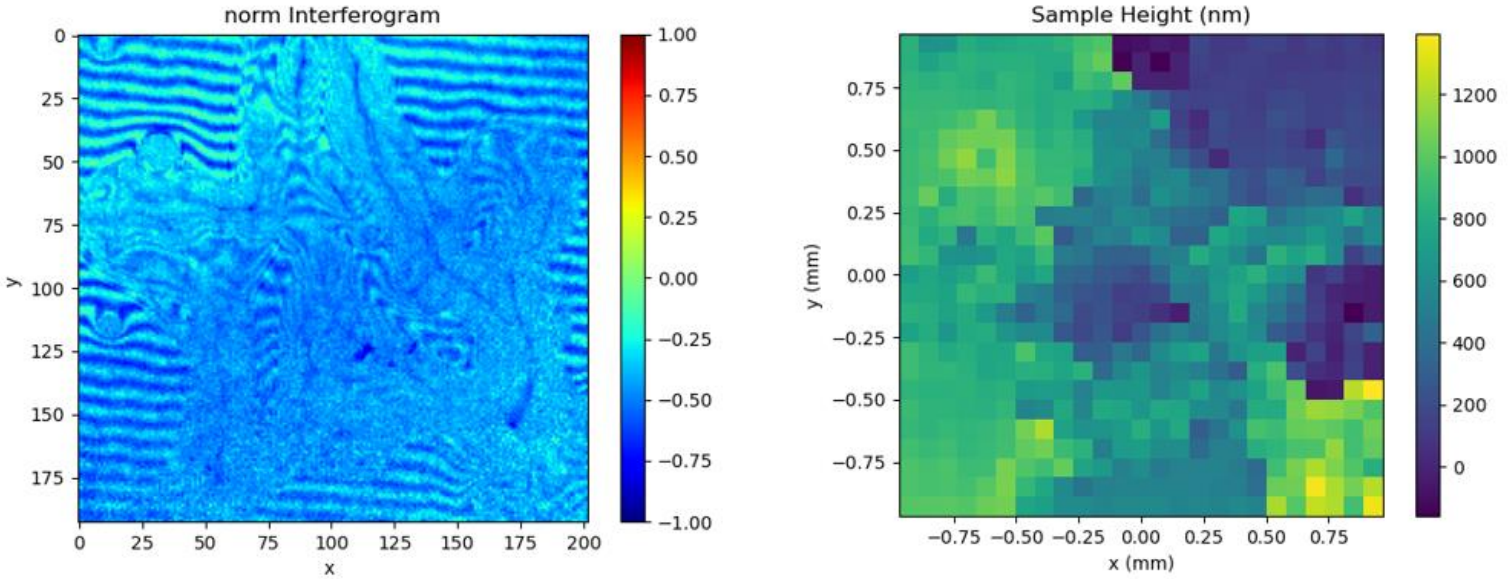
Περίοδος Κροσσών: Λ= 87.56608695652172 μm/pixel



Εικόνα 5.5.4. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 4η

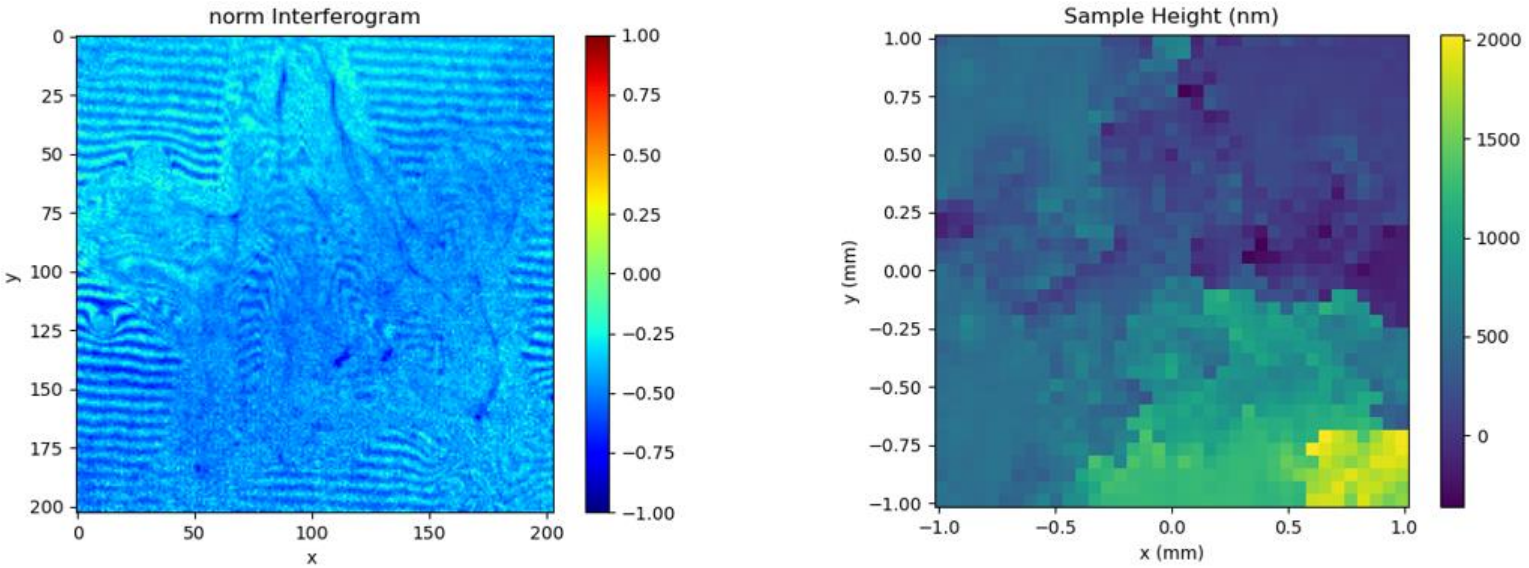
Περίοδος Κροσσών: Λ= 77.3544 μm/pixel



Εικόνα 5.5.5. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 5η

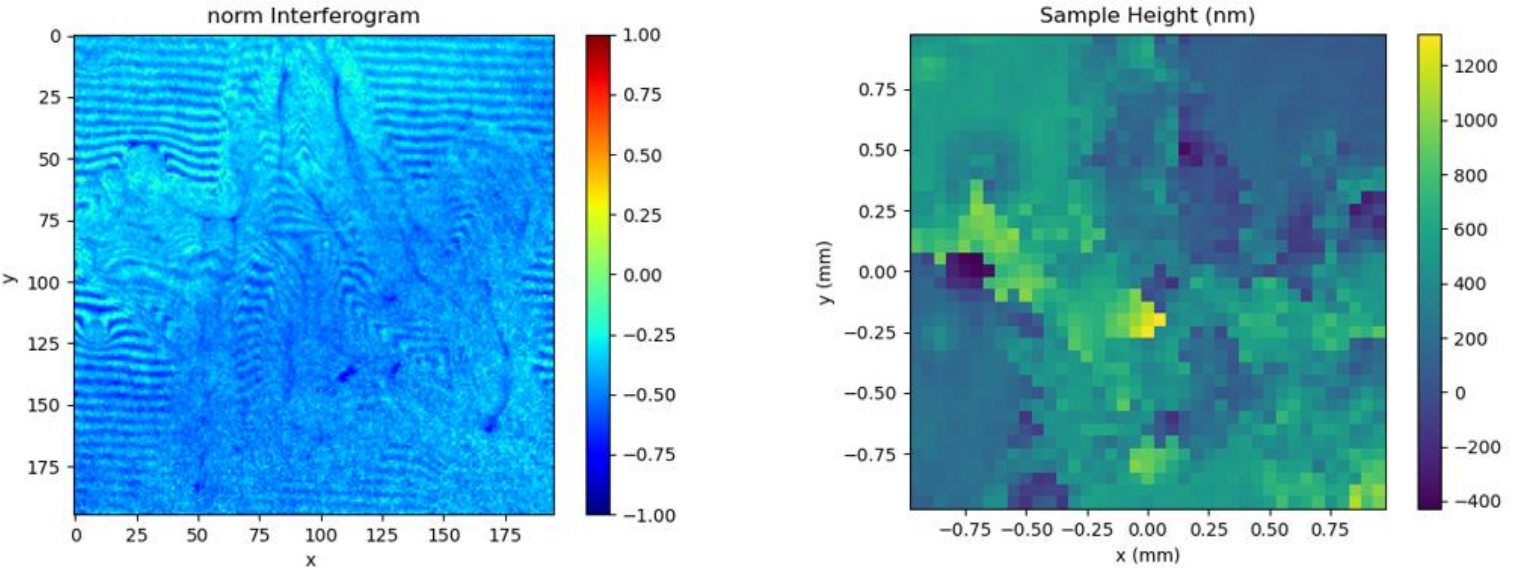
Περίοδος Κροσσών: Λ= 54.97459459459459 μm/pixel



Εικόνα 5.5.6. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 6η

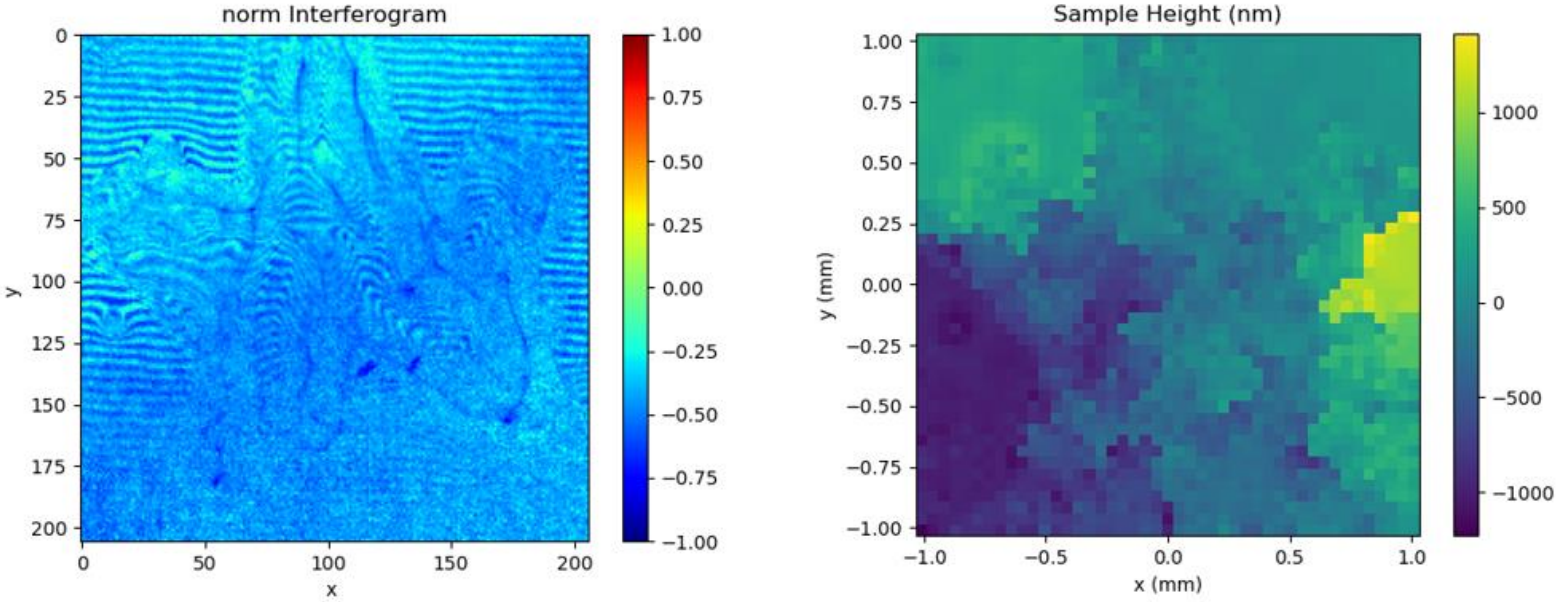
Περίοδος Κροσσών: Λ= 50.099999999999994 μm/pixel



Εικόνα 5.5.7. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 7η

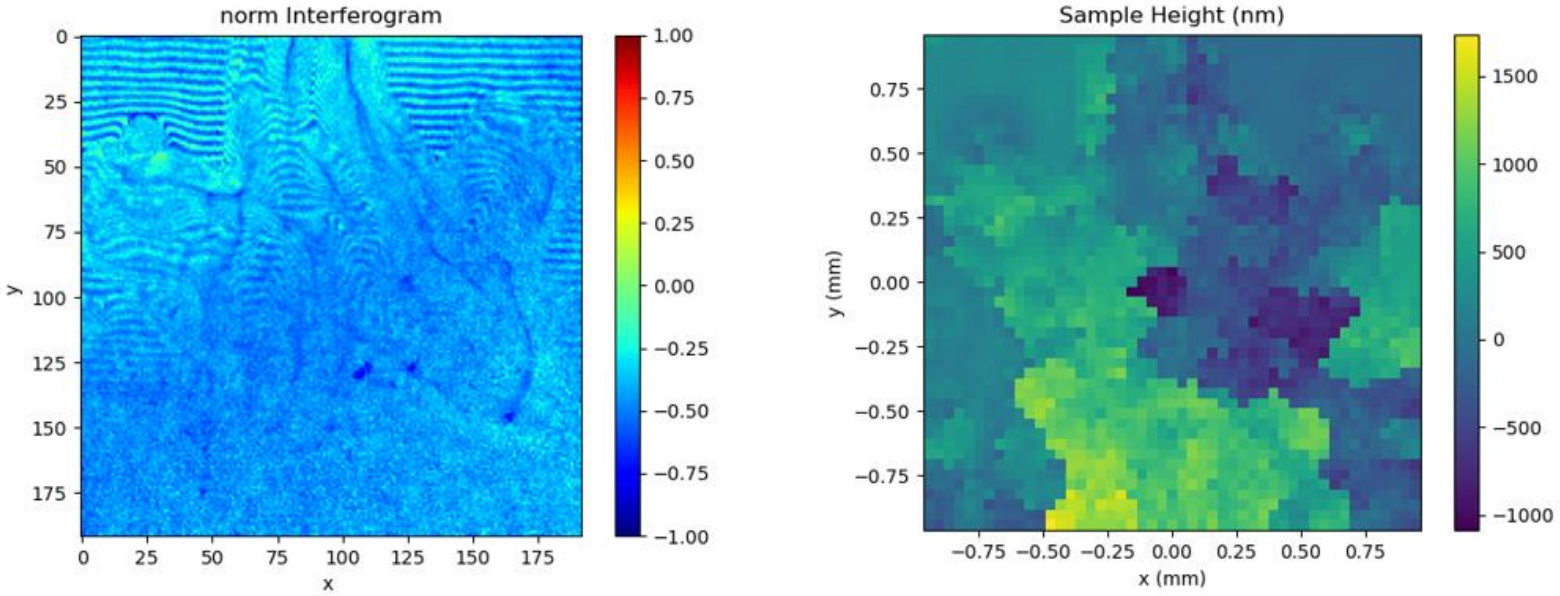
Περίοδος Κροσσών: Λ= 45.86933333333333 μm/pixel



Εικόνα 5.5.8. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 8η

Περίοδος Κροσσών: Λ= 39.262040816326525 μm/pixel



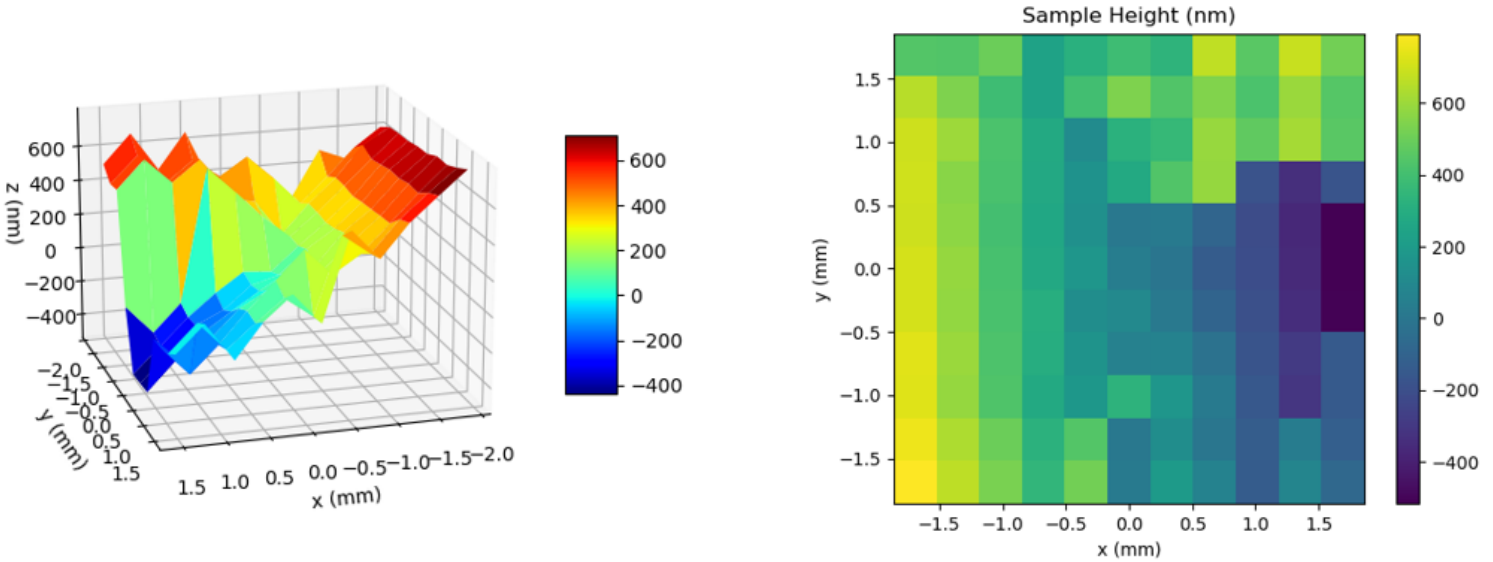
Εικόνα 5.5.9. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Δείγμα 2:

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι μια γυάλινη επιφάνεια στην οποία απεικονίζεται ένα τετράγωνο το οποίο έχει ζωγραφιστεί με τη χρήση μαρκαδόρου με πάχος 3mm. Το δείγμα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Μέτρηση 1η

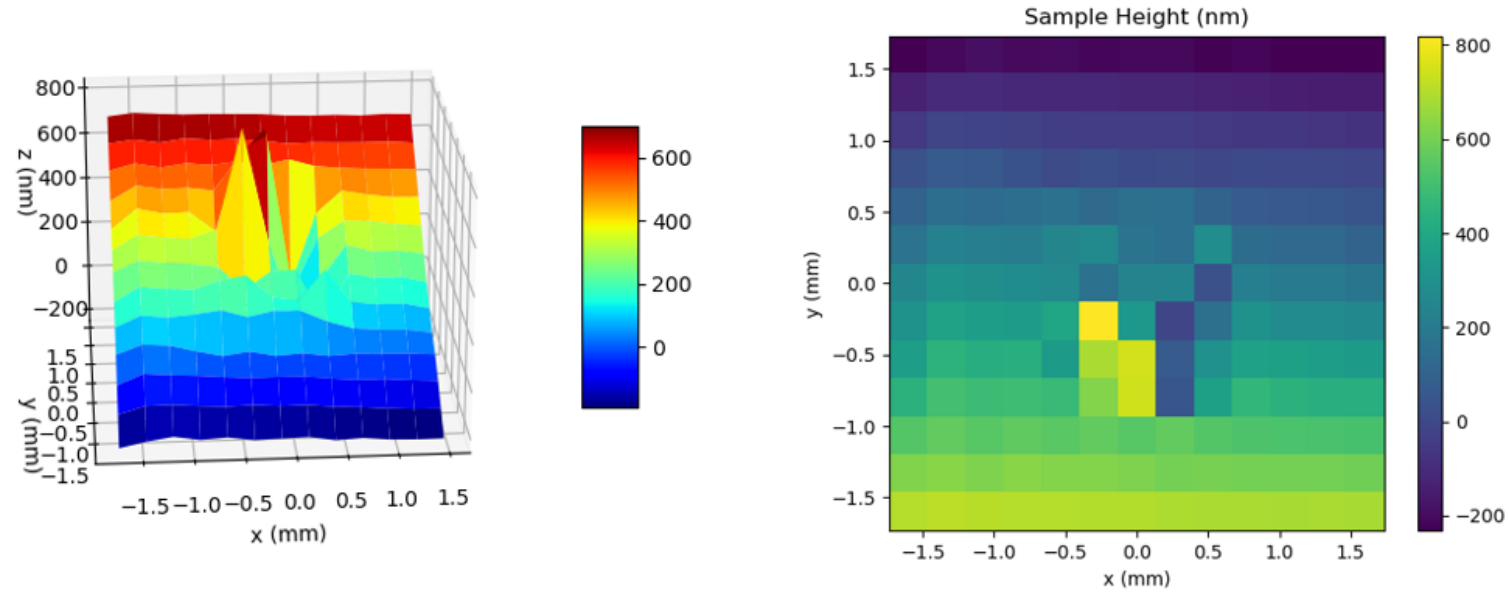
Περίοδος Κροσσών: Λ= 337.9472727272727 μm/pixel



Εικόνα 5.6.1. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 2η

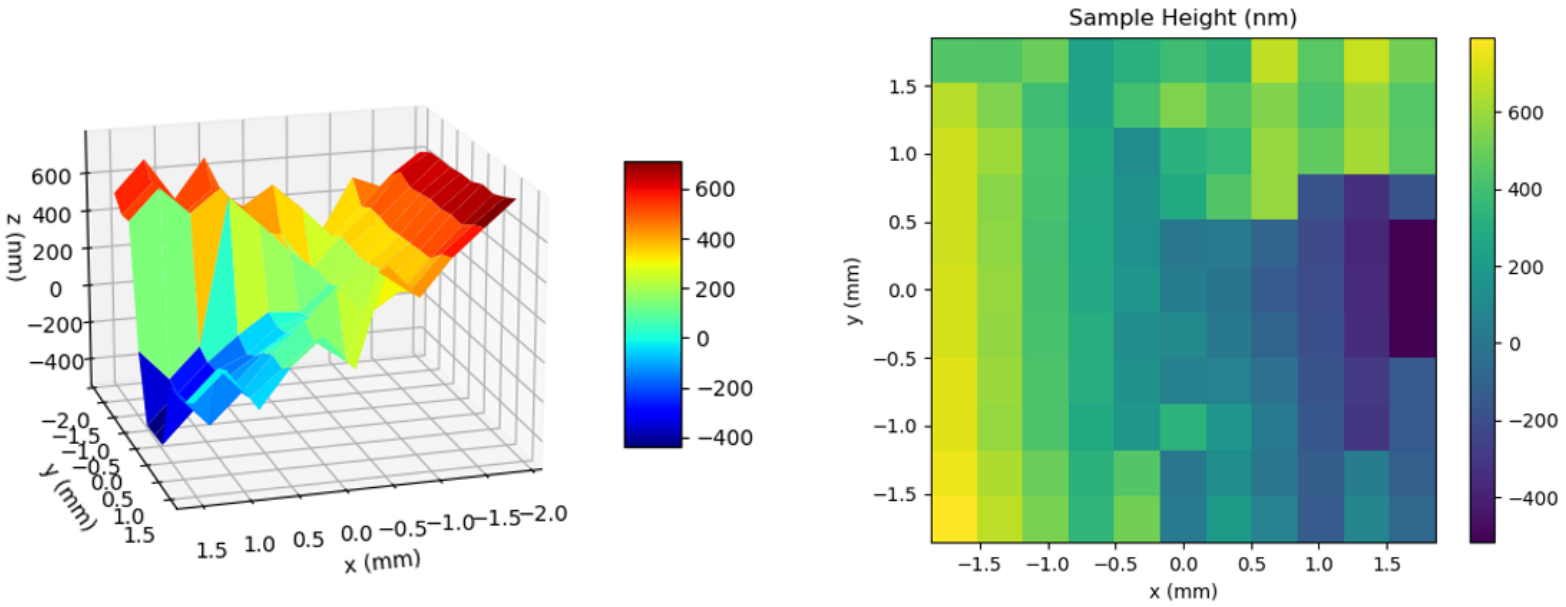
Περίοδος Κροσσών: Λ= 266.68615384615384 μm/pixel



Εικόνα 5.6.2. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 3η

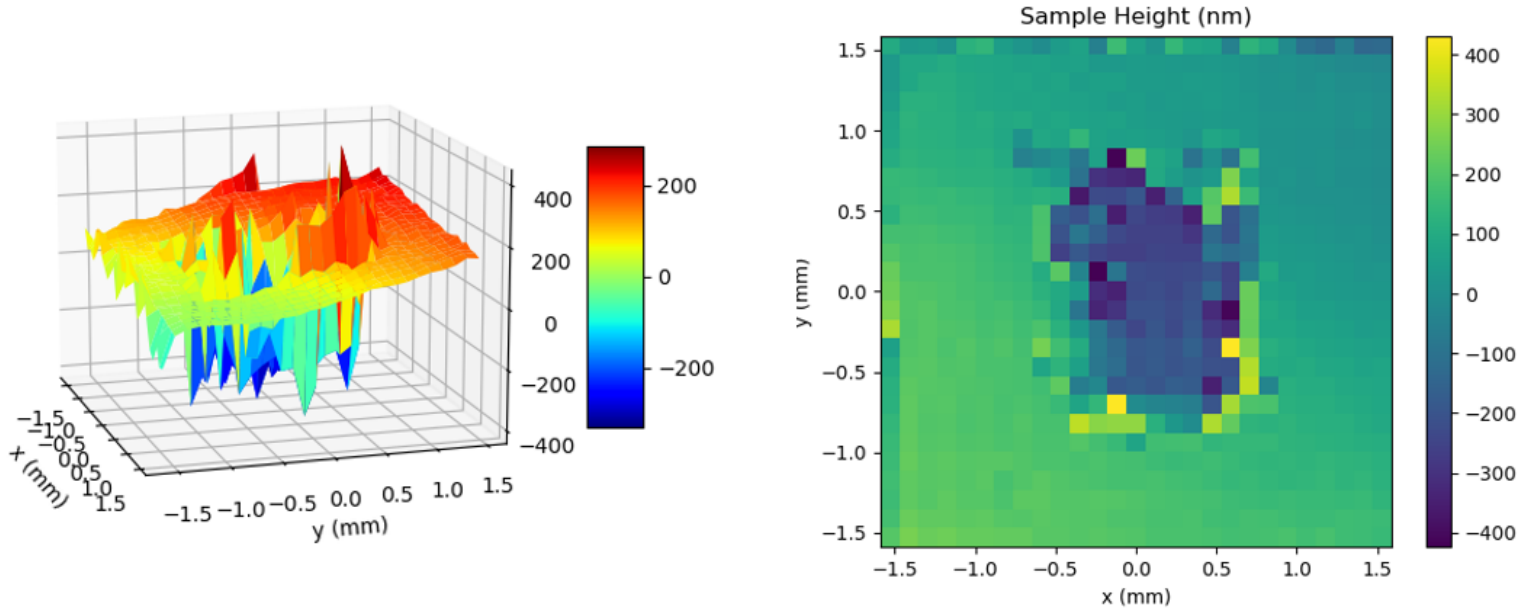
Περίοδος Κροσσών: Λ= 281.4709090909091 μm/pixel



Εικόνα 5.6.3. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 4η

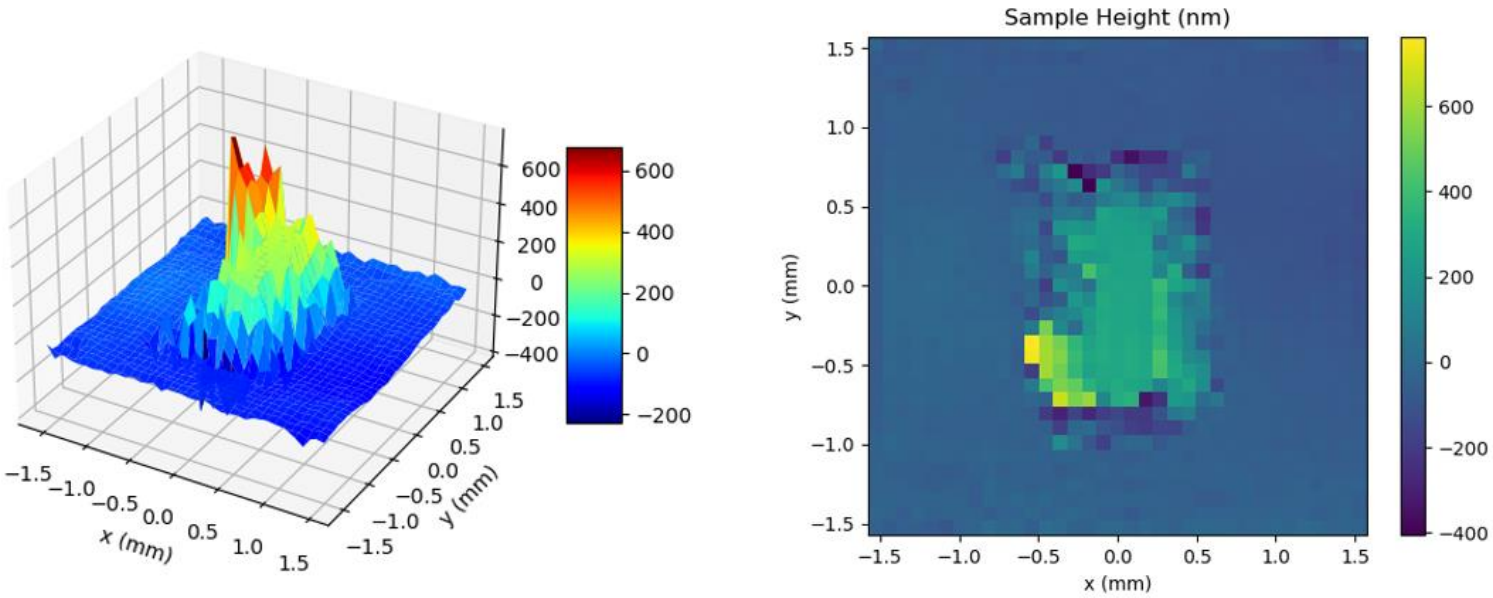
Περίοδος Κροσσών: Λ= 117.64222222222222 μm/pixel



Εικόνα 5.6.4. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 5η

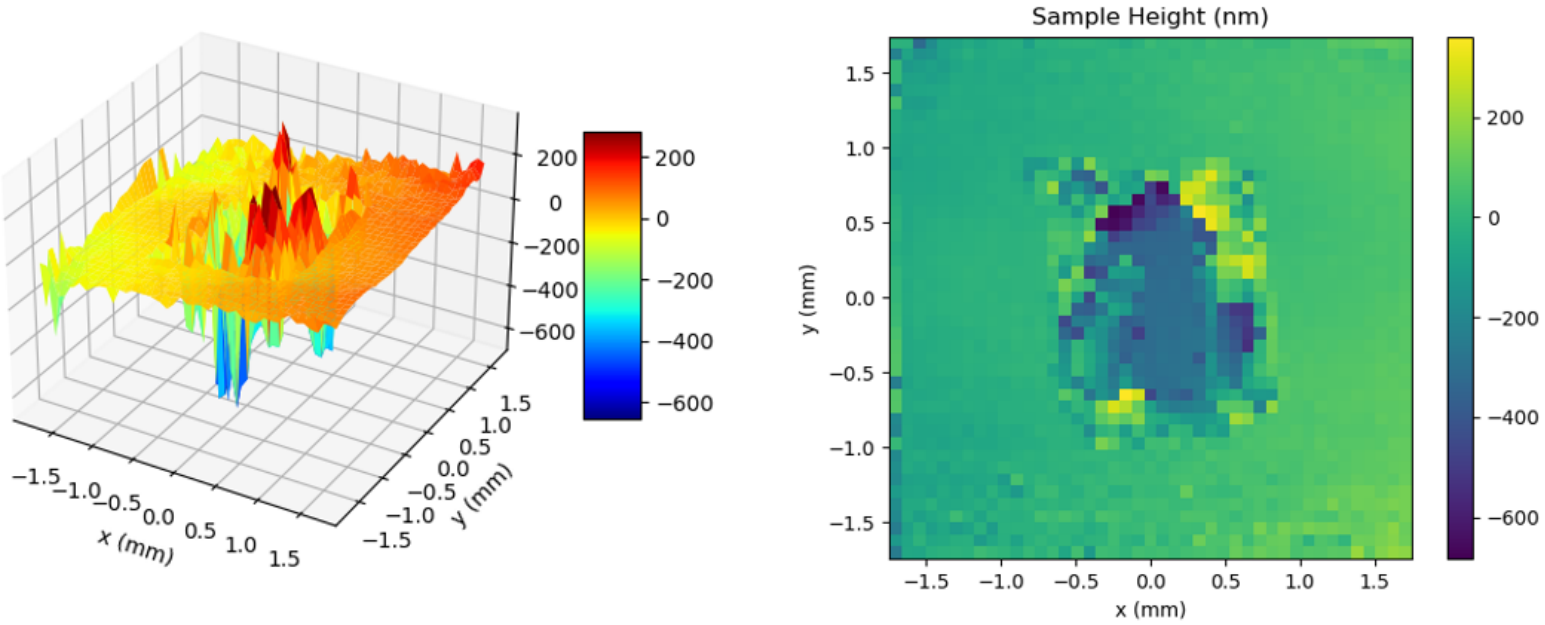
Περίοδος Κροσσών: Λ= 89.89371428571428 μm/pixel



Εικόνα 5.6.5. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 6η

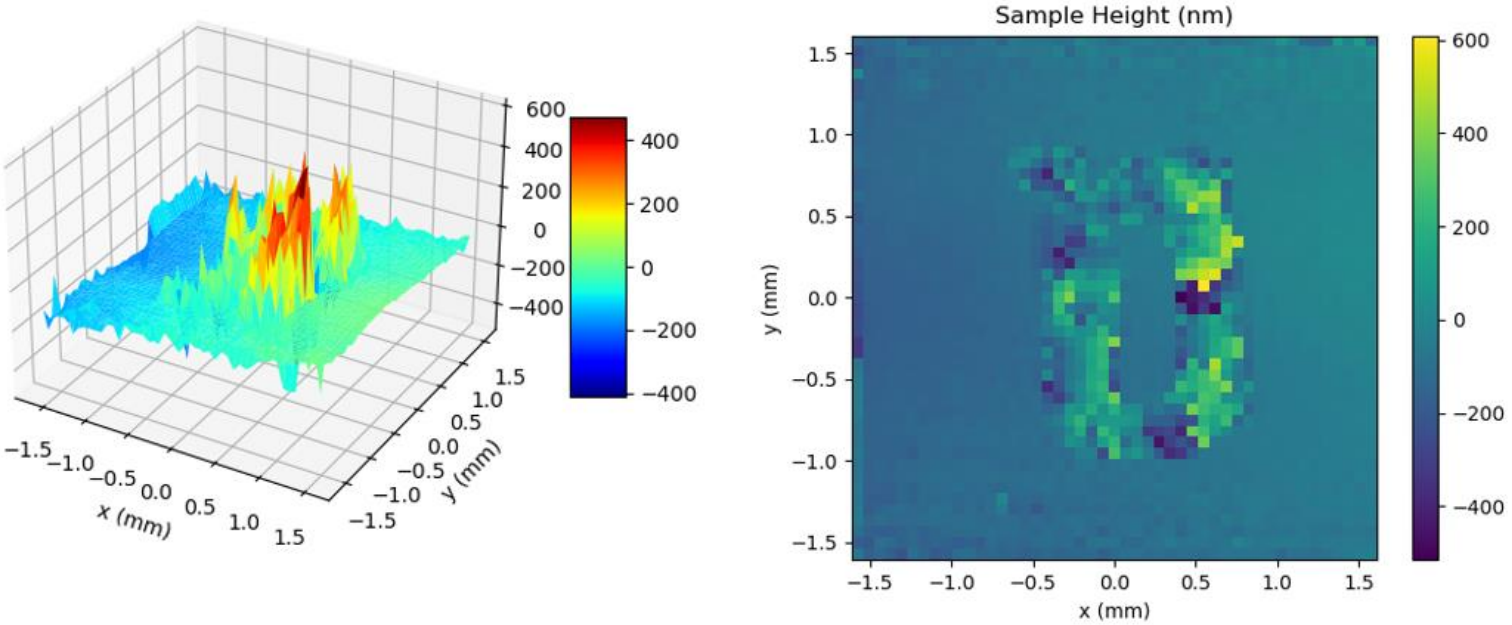
Περίοδος Κροσσών: Λ= 81.09209302325581 μm/pixel



Εικόνα 5.6.6. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 7η

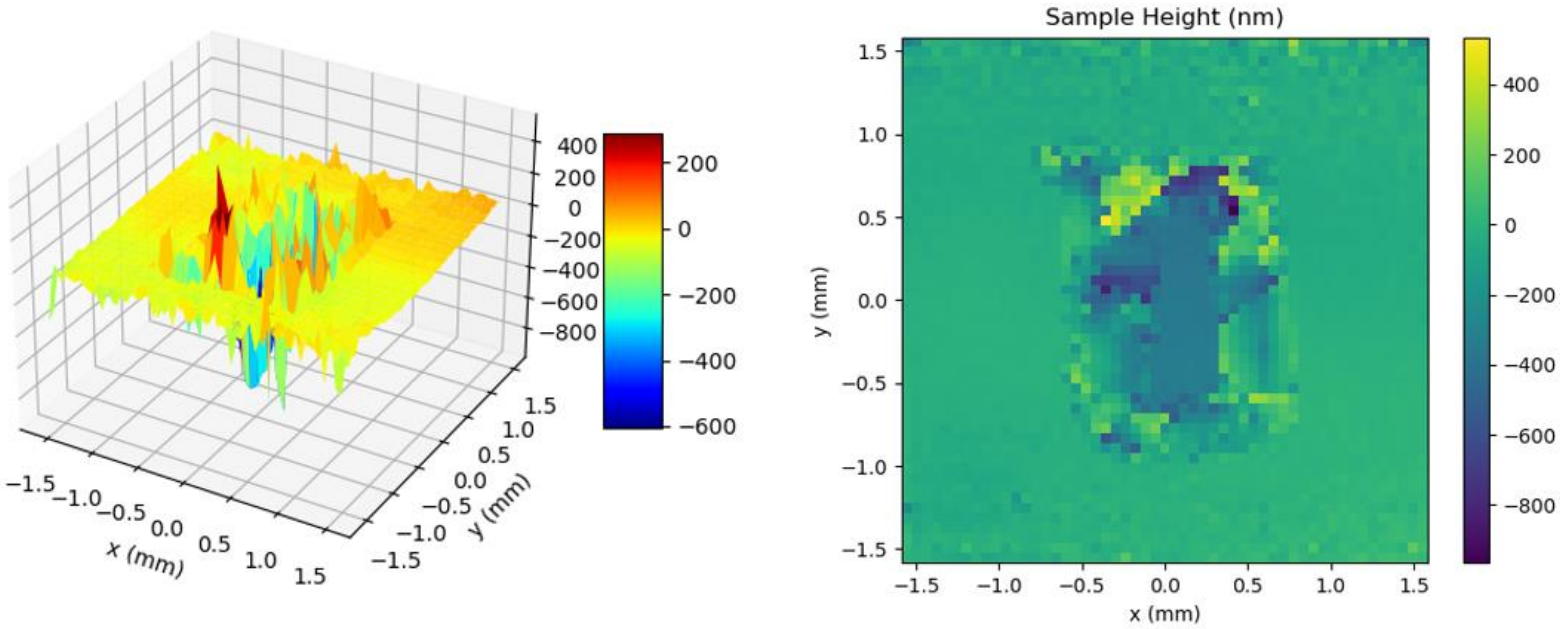
Περίοδος Κροσσών: Λ= 68.43446808510637 μm/pixel



Εικόνα 5.6.7. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 8η

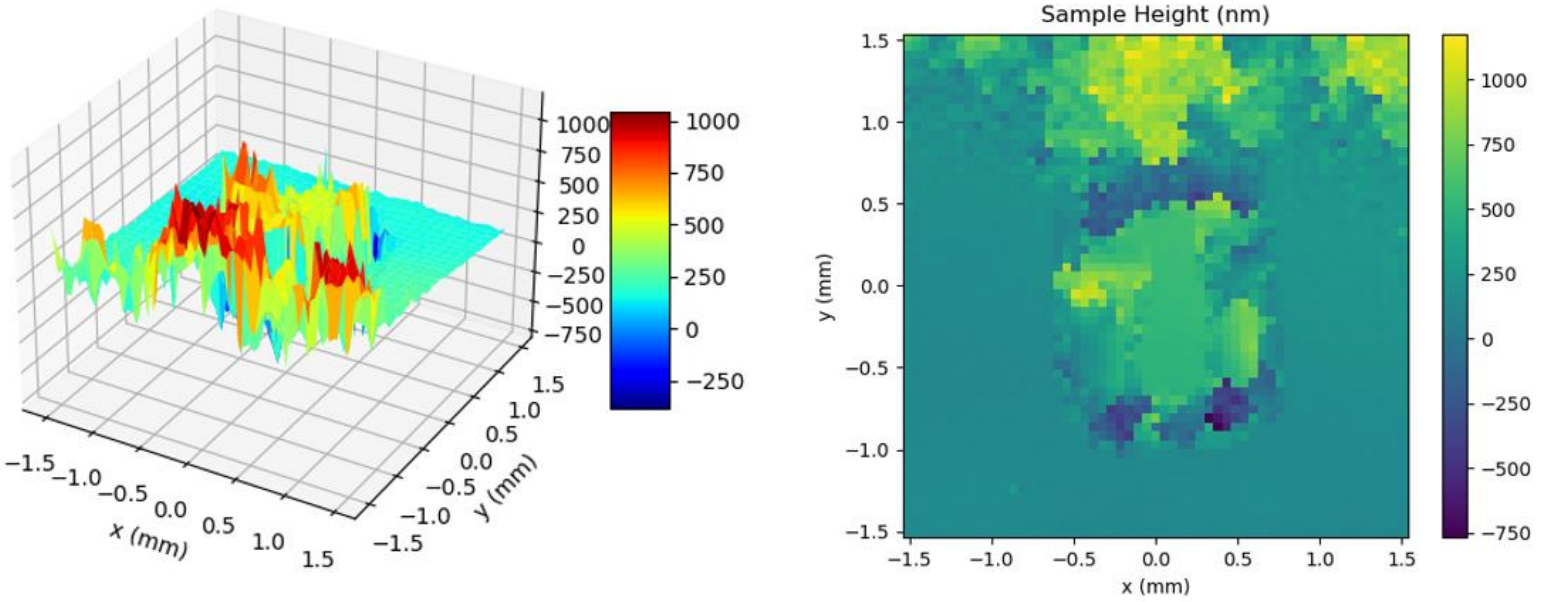
Περίοδος Κροσσών: Λ= 59.74188679245283 μm/pixel



Εικόνα 5.6.8. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 9η

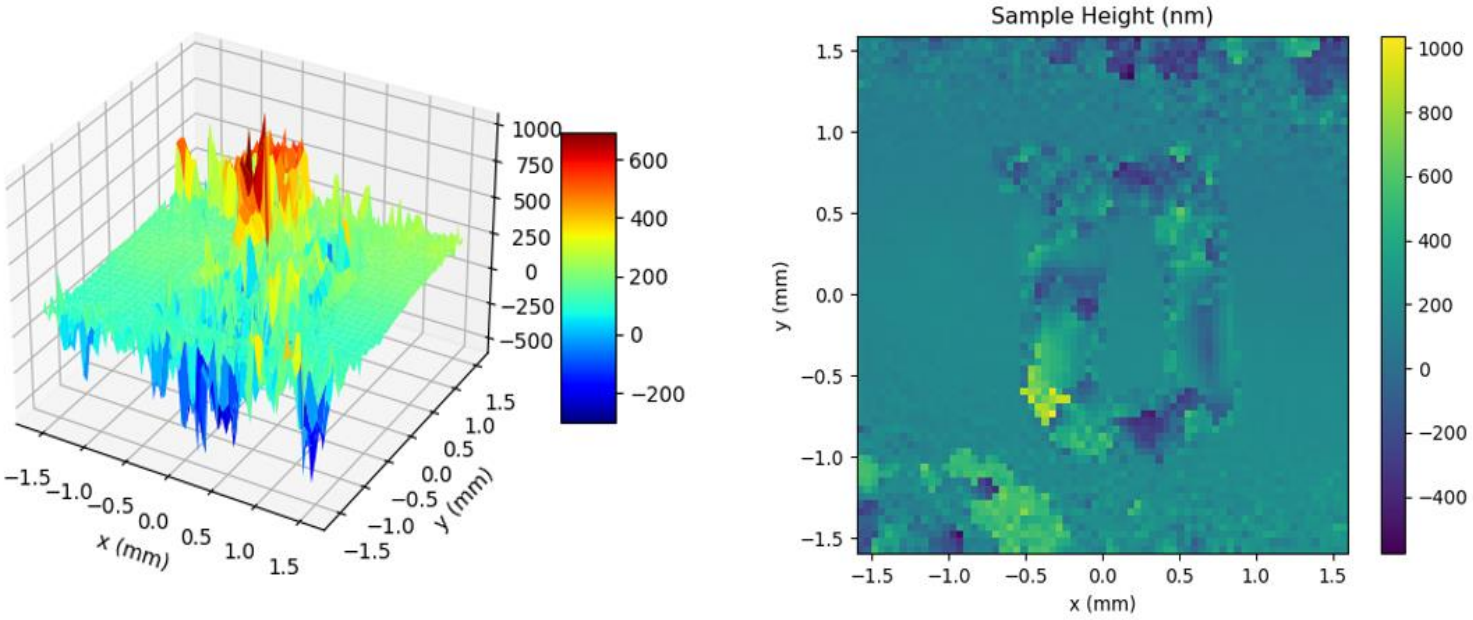
Περίοδος Κροσσών: Λ= 53.967368421052626 μm/pixel



Εικόνα 5.6.9. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 10η

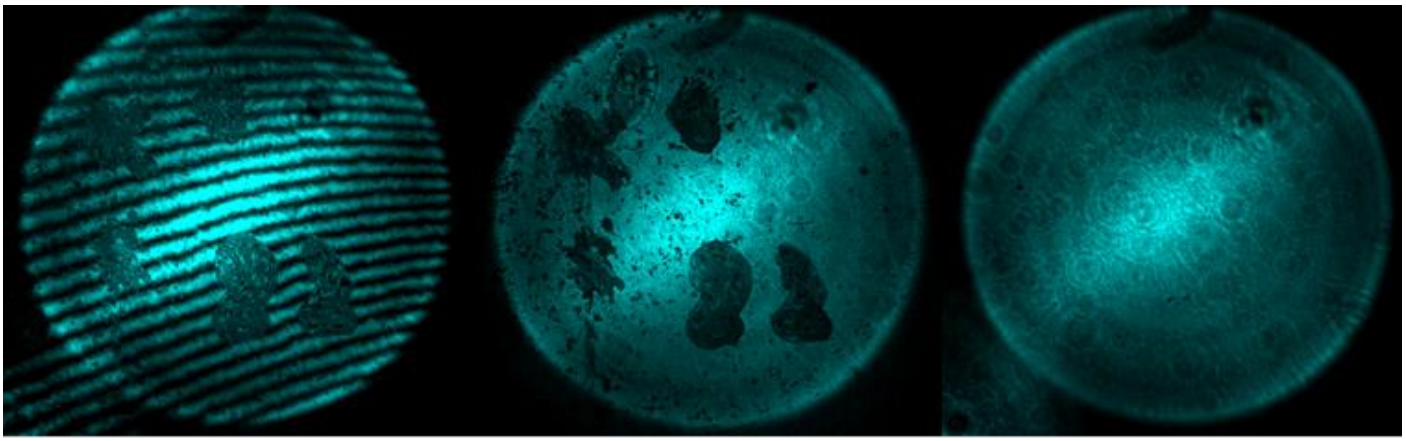
Περίοδος Κροσσών: Λ= 46.17913043478261 μm/pixel



Εικόνα 5.6.10. Απεικόνιση 3D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Δείγμα 3:

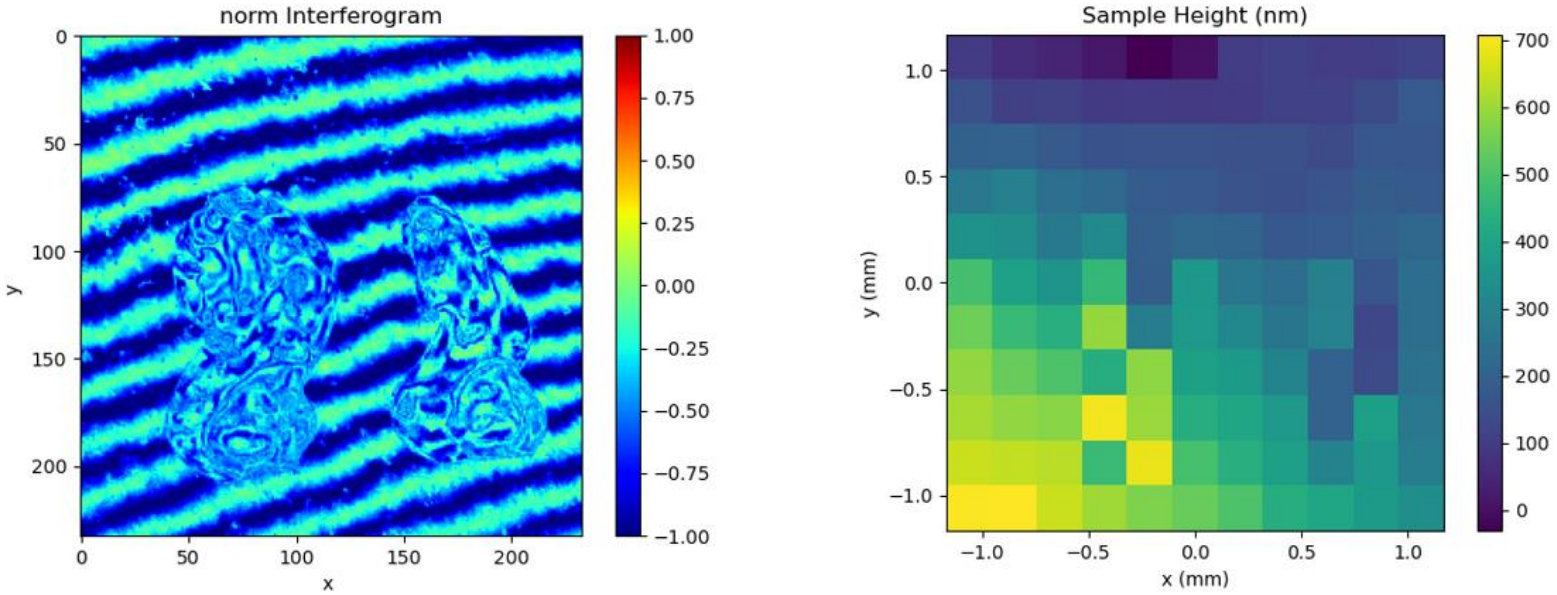
Το επιλεγμένο δείγμα είναι κάτοπτρο στο οποίο απεικονίζεται ο αριθμός 21 ο οποίος έχει ζωγραφιστεί με τη χρήση μαρκαδόρου πάχους 3mm. Το δείγμα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 5.7.1. Στα αριστερά παρουσιάζεται το δείγμα κατά τη διάρκεια της συμβολής, στο κέντρο βρίσκεται η επιφάνεια του δείγματος και δεξιά η επιφάνεια που χρησιμοποιείται ως αναφορά.

Μέτρηση 1η

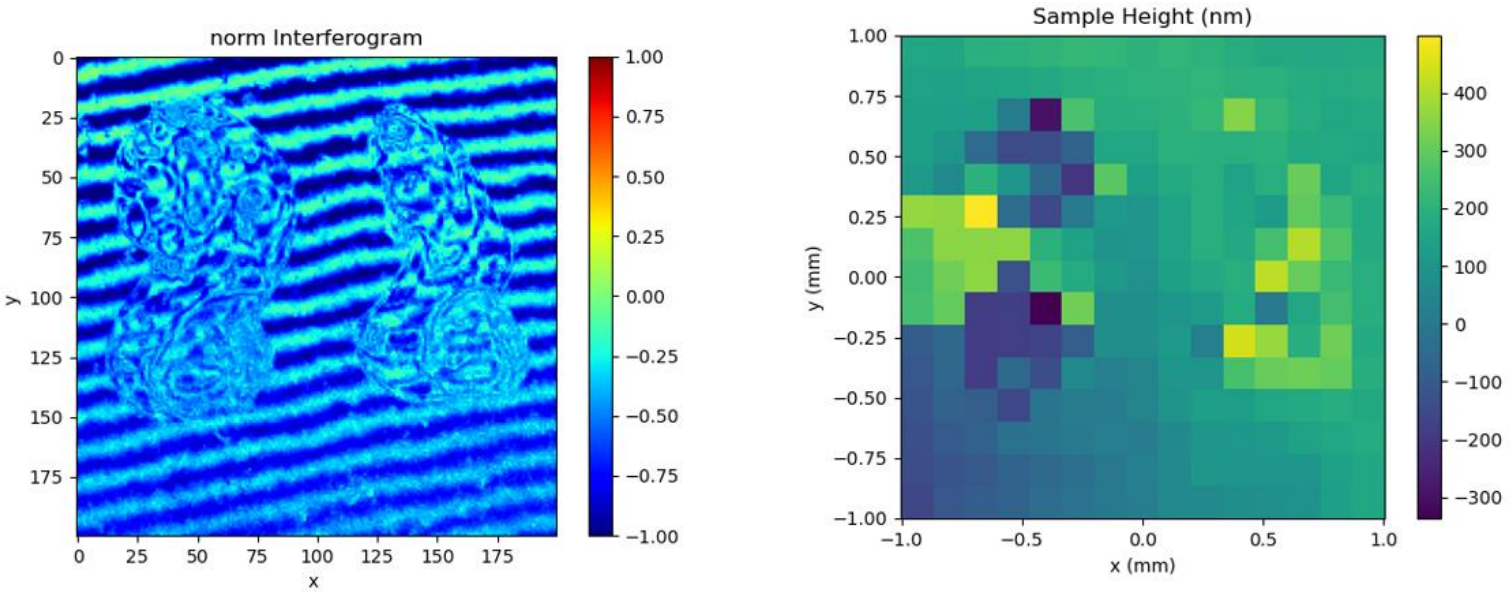
Περίοδος Κροσσών: Λ= 212.24181818181816 μm/pixel



Εικόνα 5.7.2. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 2η

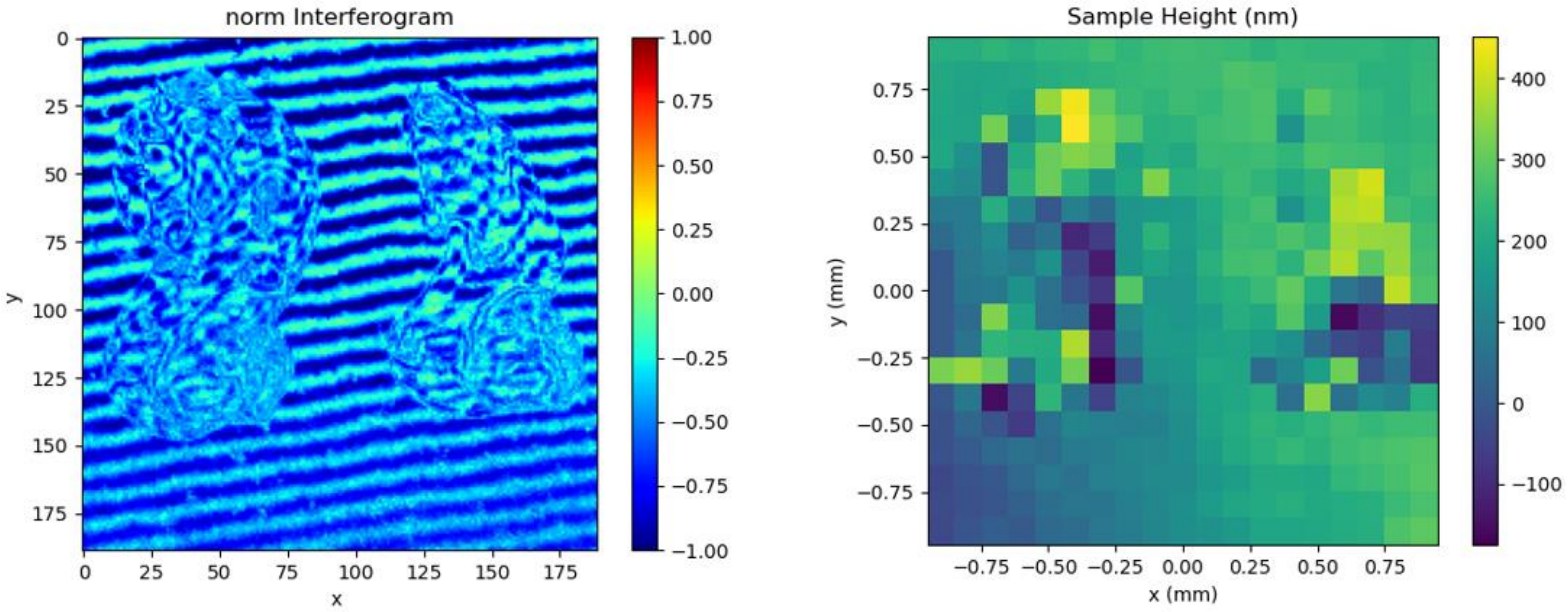
Περίοδος Κροσσών: Λ= 133.59999999999997 μm/pixel



Εικόνα 5.7.3. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 3η

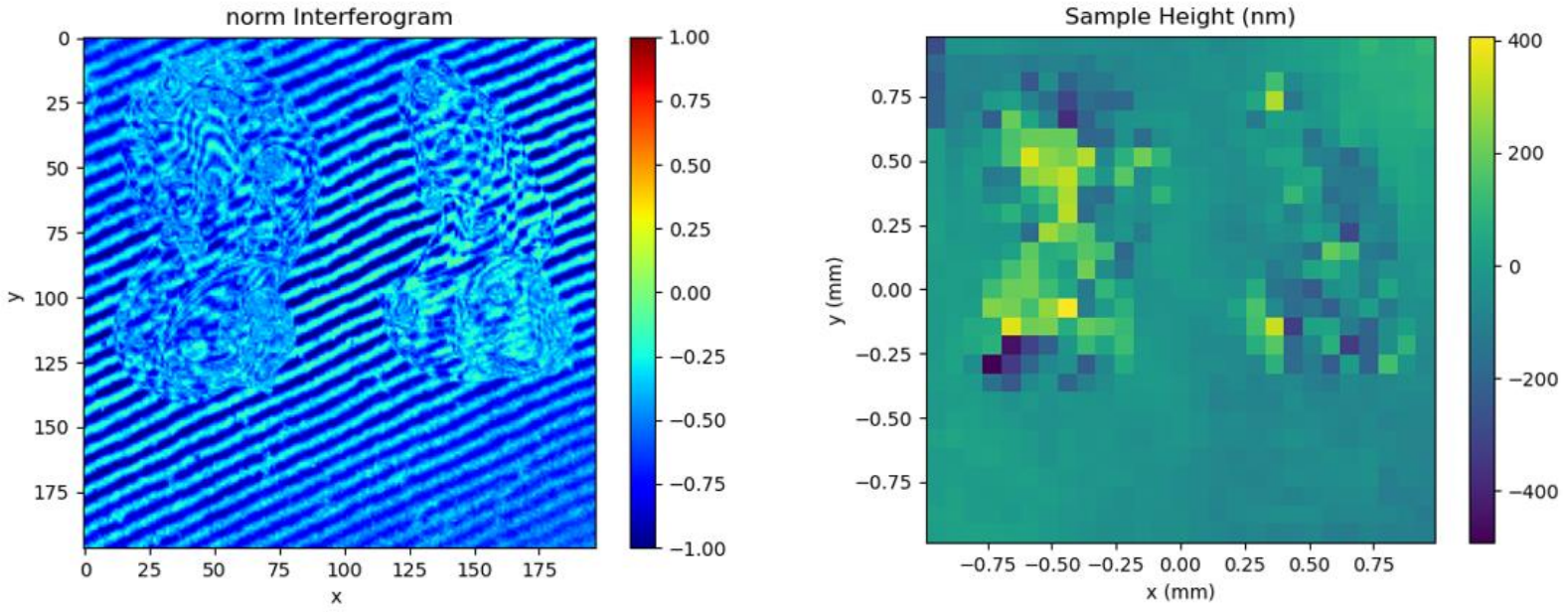
Περίοδος Κροσσών: Λ= 99.67263157894736 μm/pixel



Εικόνα 5.7.4. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 4η

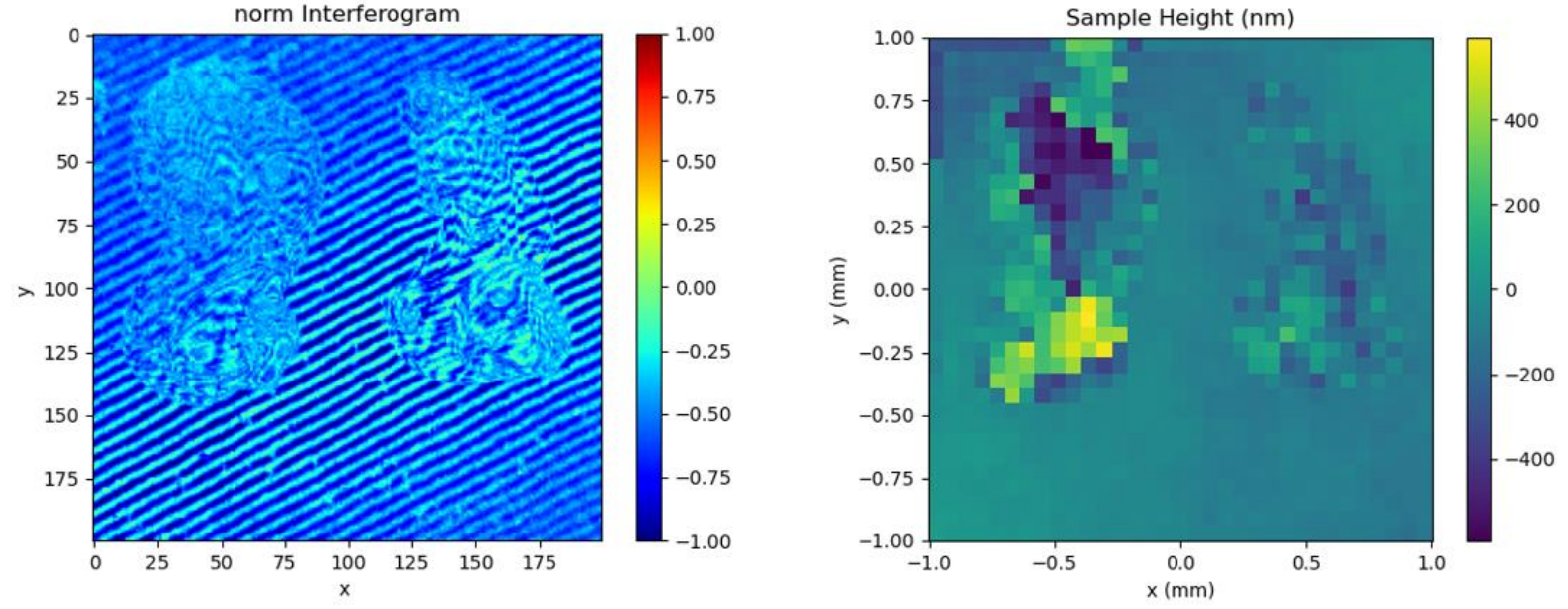
Περίοδος Κροσσών: Λ= 73.1088888888889 μm/pixel



Εικόνα 5.7.5. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 5η

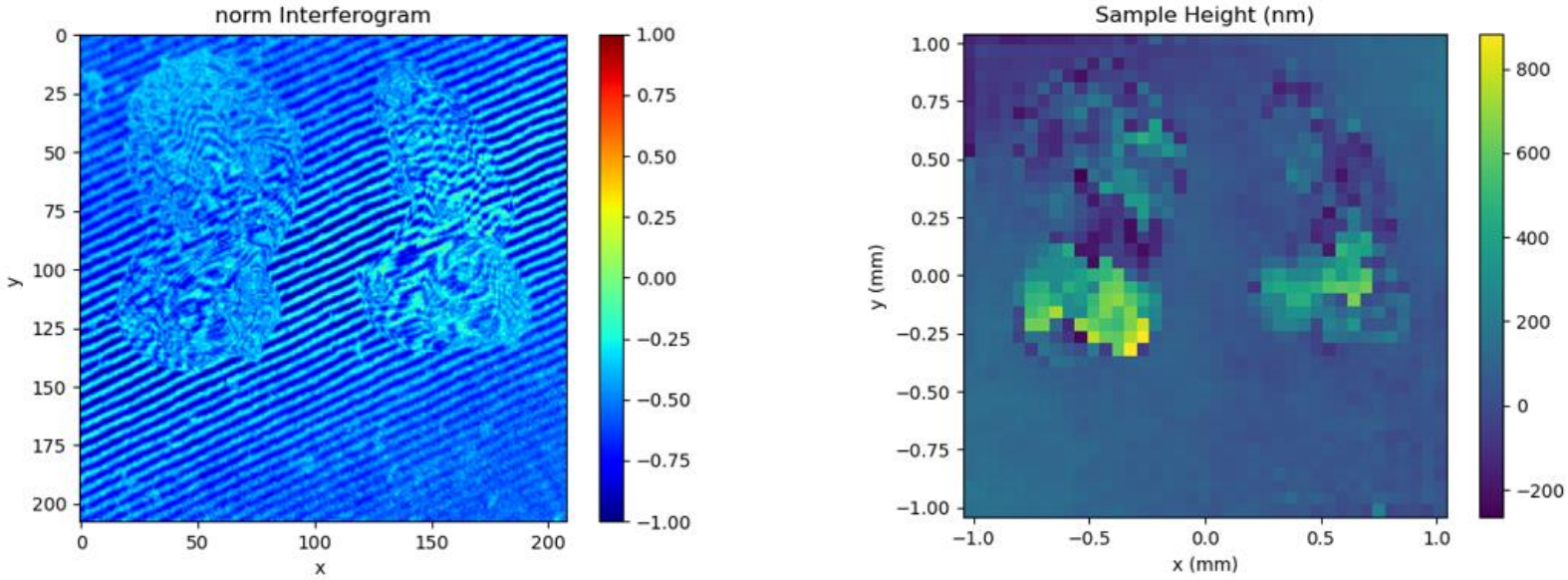
Περίοδος Κροσσών: Λ= 60.72727272727273 μm/pixel



Εικόνα 5.7.6. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 6η

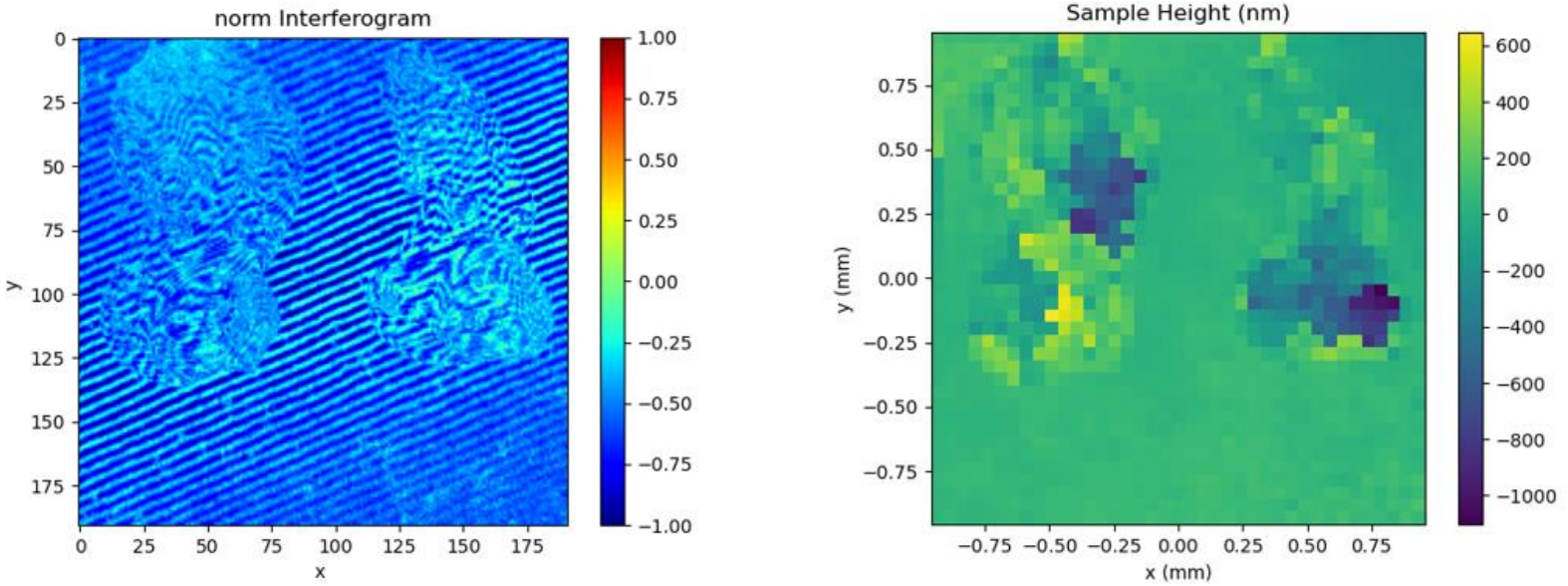
Περίοδος Κροσσών: Λ= 53.44 μm/pixel



Εικόνα 5.7.7. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 7η

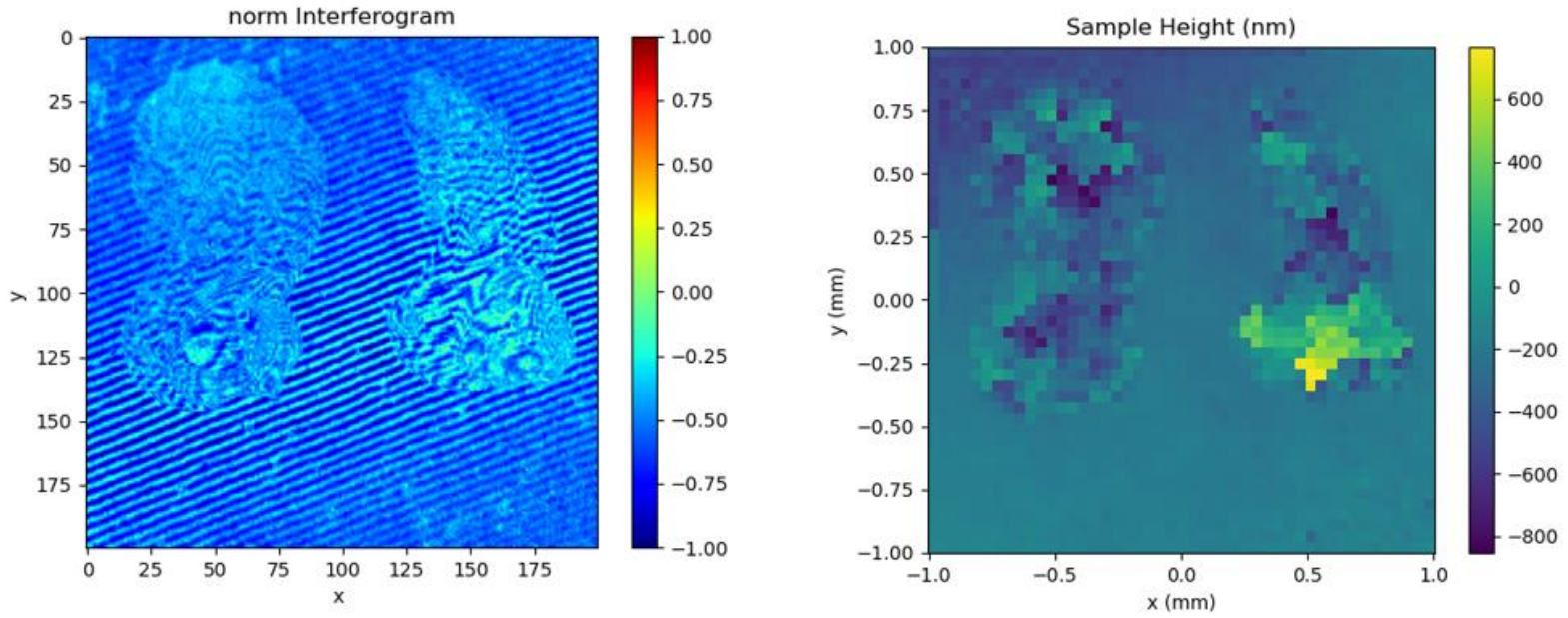
Περίοδος Κροσσών: Λ= 49.07230769230769 μm/pixel



Εικόνα 5.7.8. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 8η

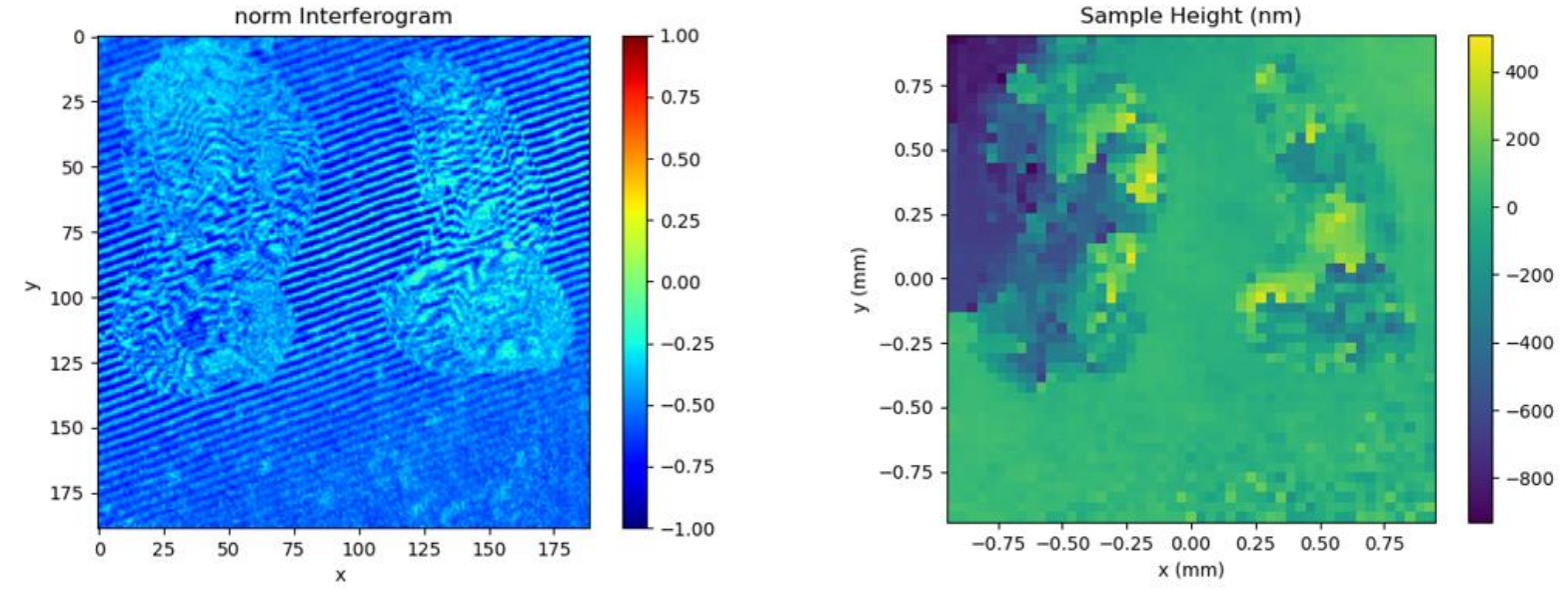
Περίοδος Κροσσών: Λ= 42.638297872340424 μm/pixel



Εικόνα 5.7.9. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 9η

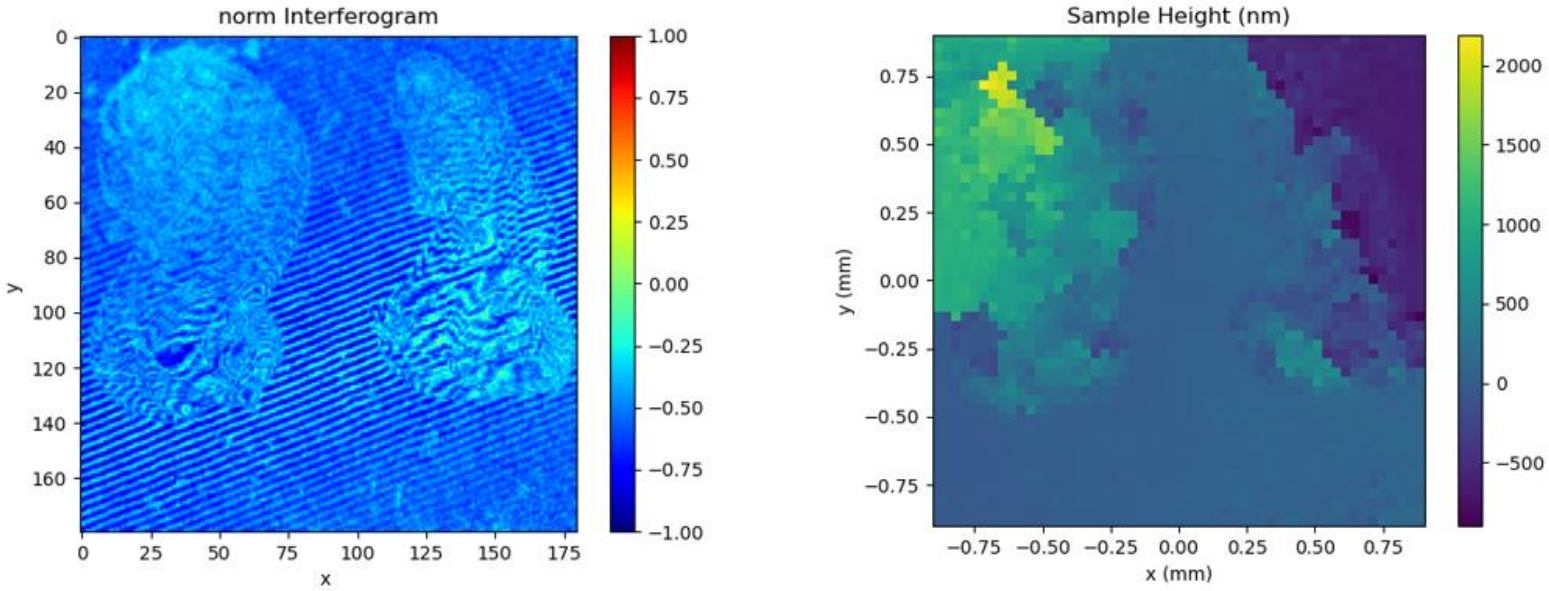
Περίοδος Κροσσών: Λ= 38.64857142857143 μm/pixel



Εικόνα 5.7.10. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 10η

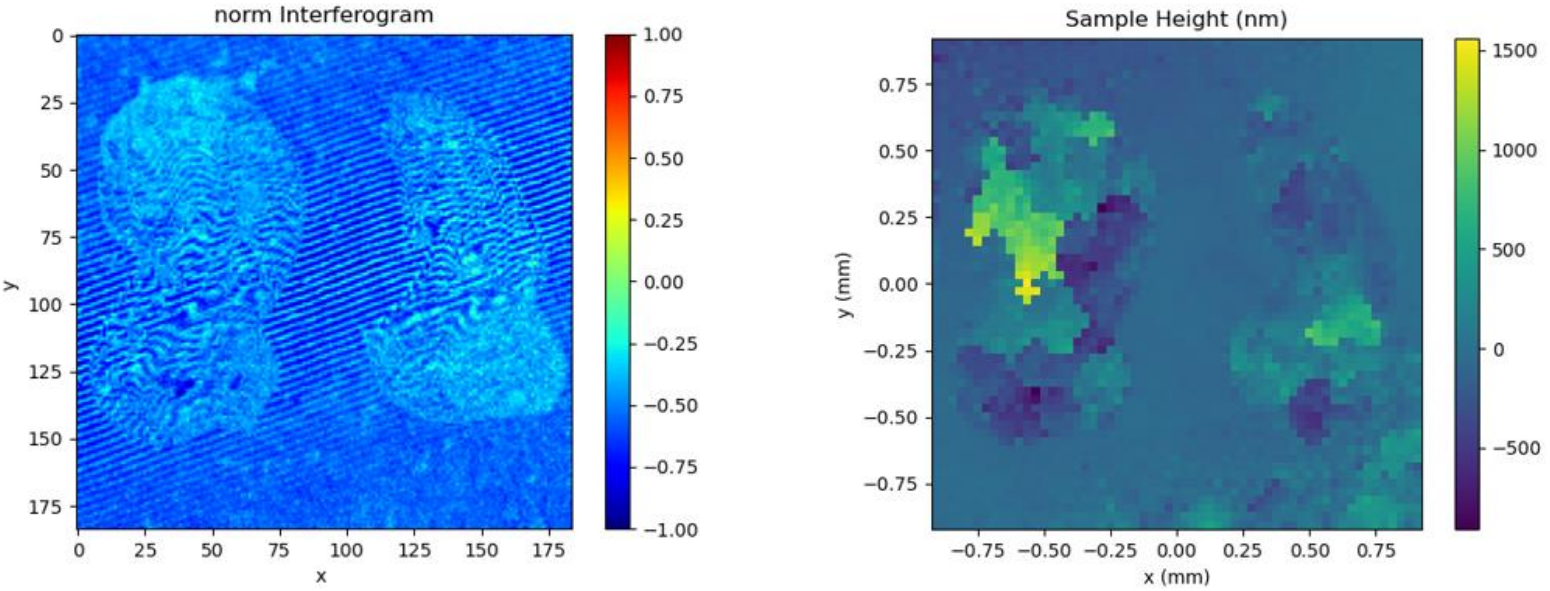
Περίοδος Κροσσών: Λ= 34.030188679245285 μm/pixel



Εικόνα 5.7.11. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 11η

Περίοδος Κροσσών: Λ= 31.248813559322034 μm/pixel



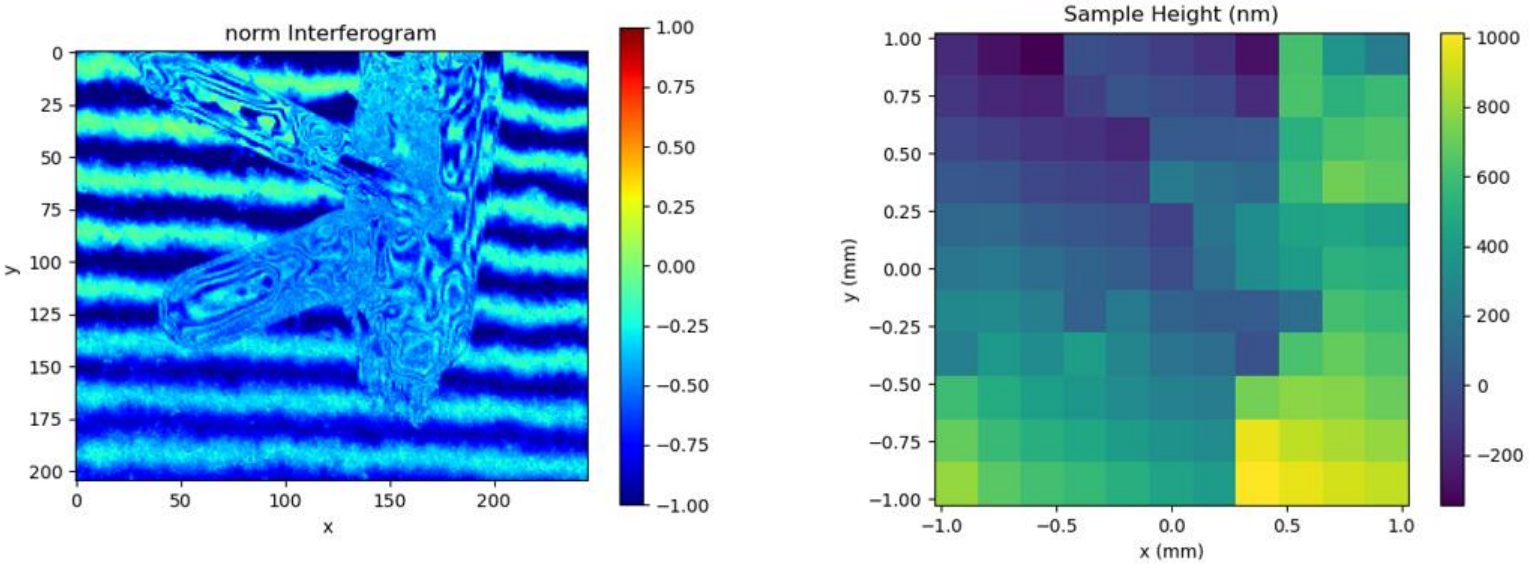
Εικόνα 5.7.12. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Δείγμα 4:

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα κάτοπτρο στο οποίο απεικονίζεται ένα γράμμα της ελληνικής αλφαβήτου (Κ), το οποίο έχει ζωγραφιστεί με τη χρήση μαρκαδόρου με πάχος 3mm. Το δείγμα και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Μέτρηση 1η

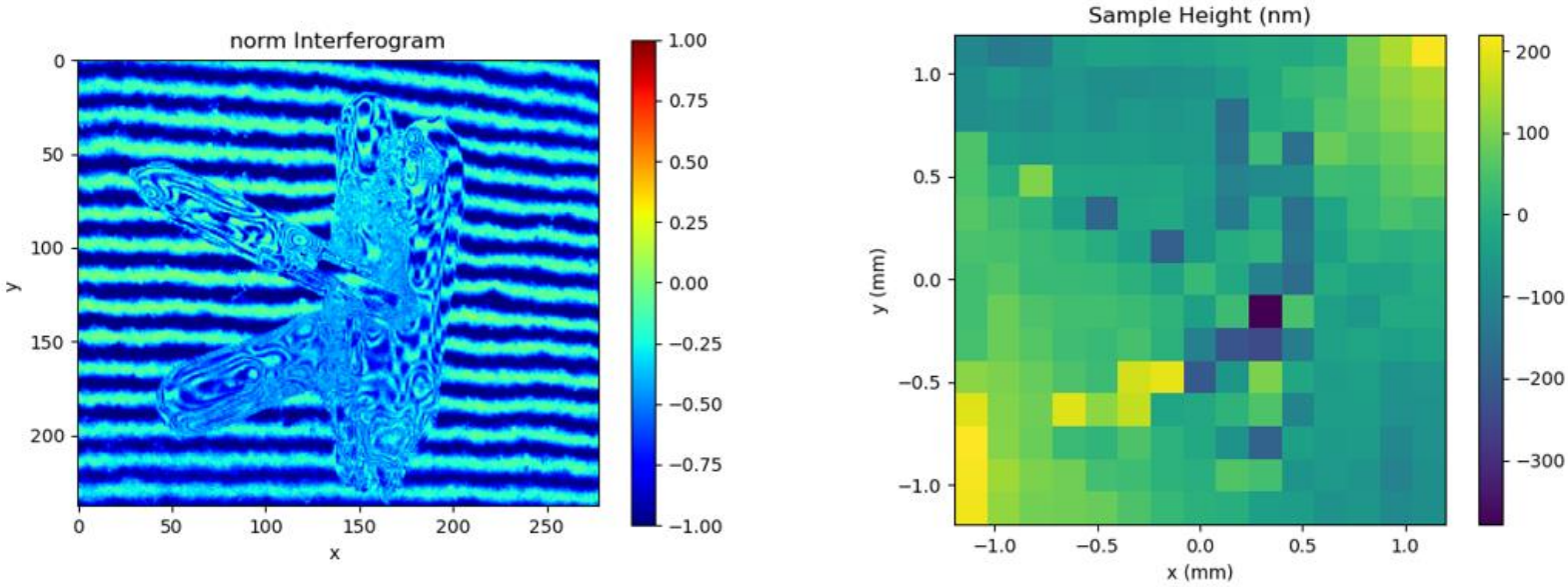
Περίοδος Κροσσών: Λ= 186.7363636363636 μm/pixel



Εικόνα 5.8.1. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 2η

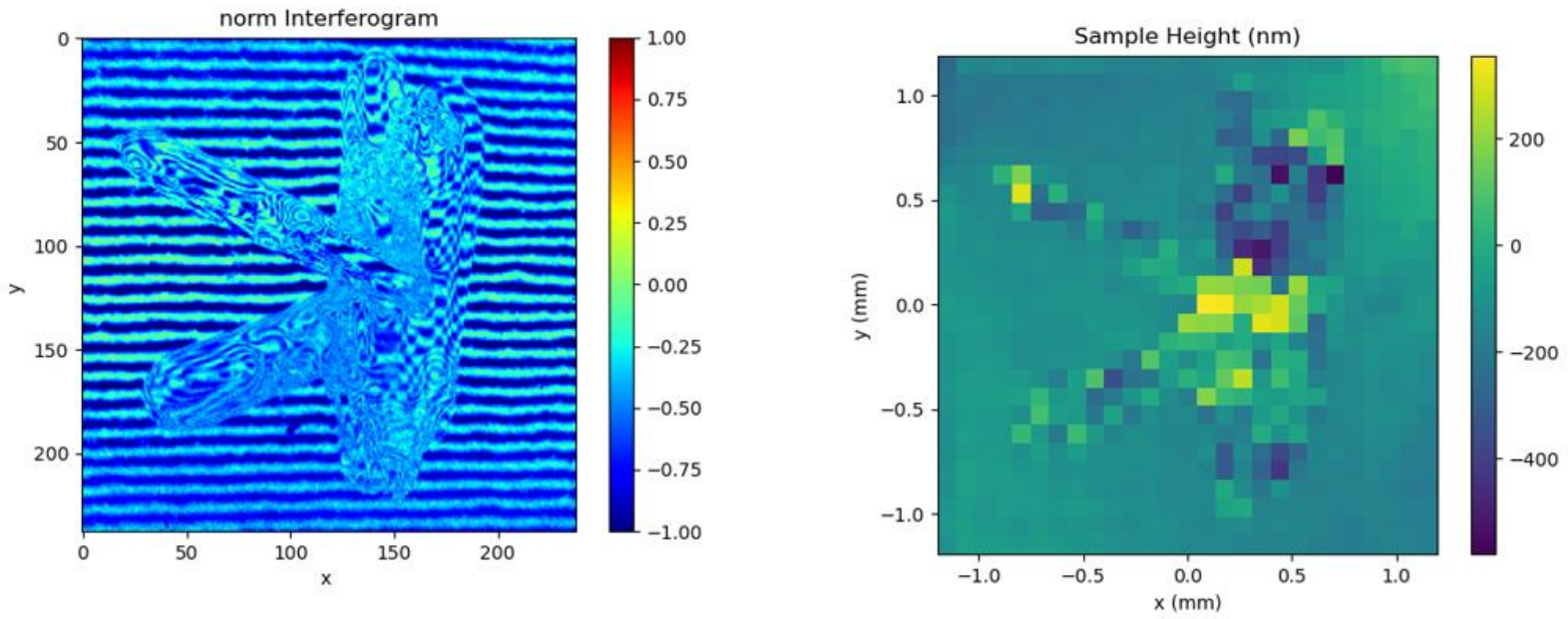
Περίοδος Κροσσών: Λ= 158.98399999999998 μm/pixel



Εικόνα 5.8.2. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 3η

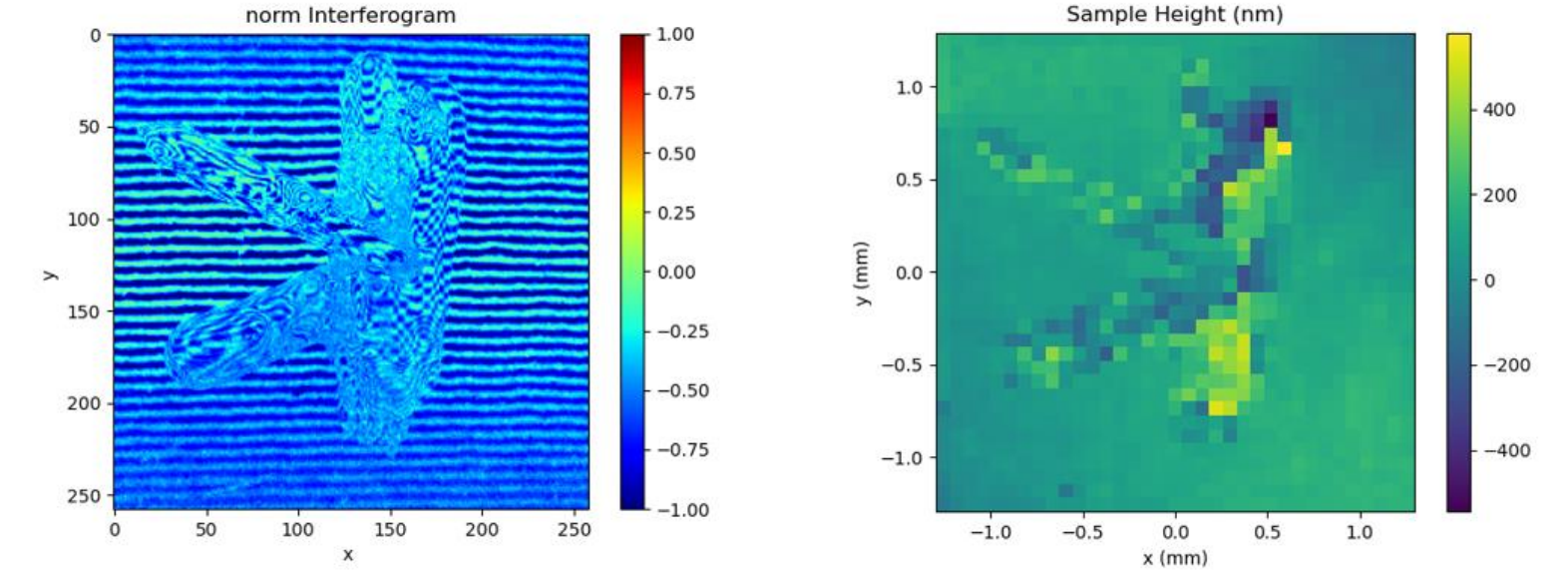
Περίοδος Κροσσών: Λ= 88.32444444444442 μm/pixel



Εικόνα 5.8.3. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 4η

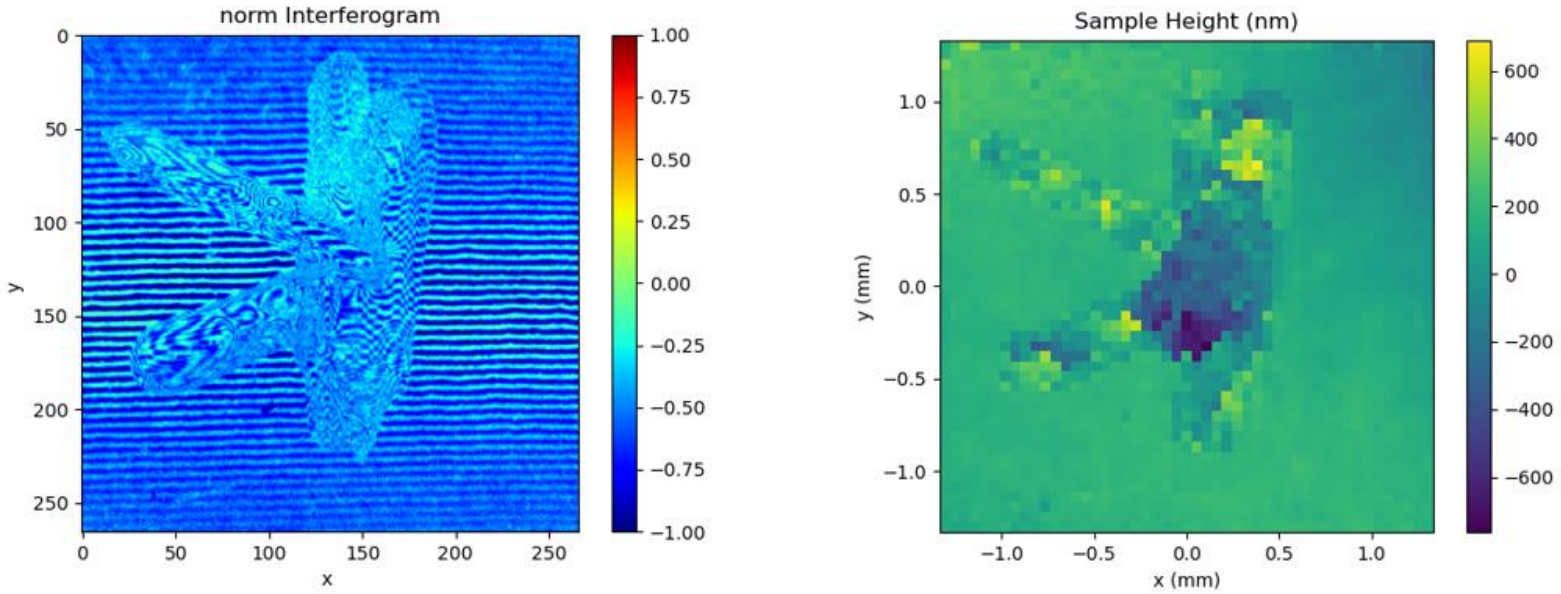
Περίοδος Κροσσών: Λ= 73.86171428571429 μm/pixel



Εικόνα 5.8.4. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 5η

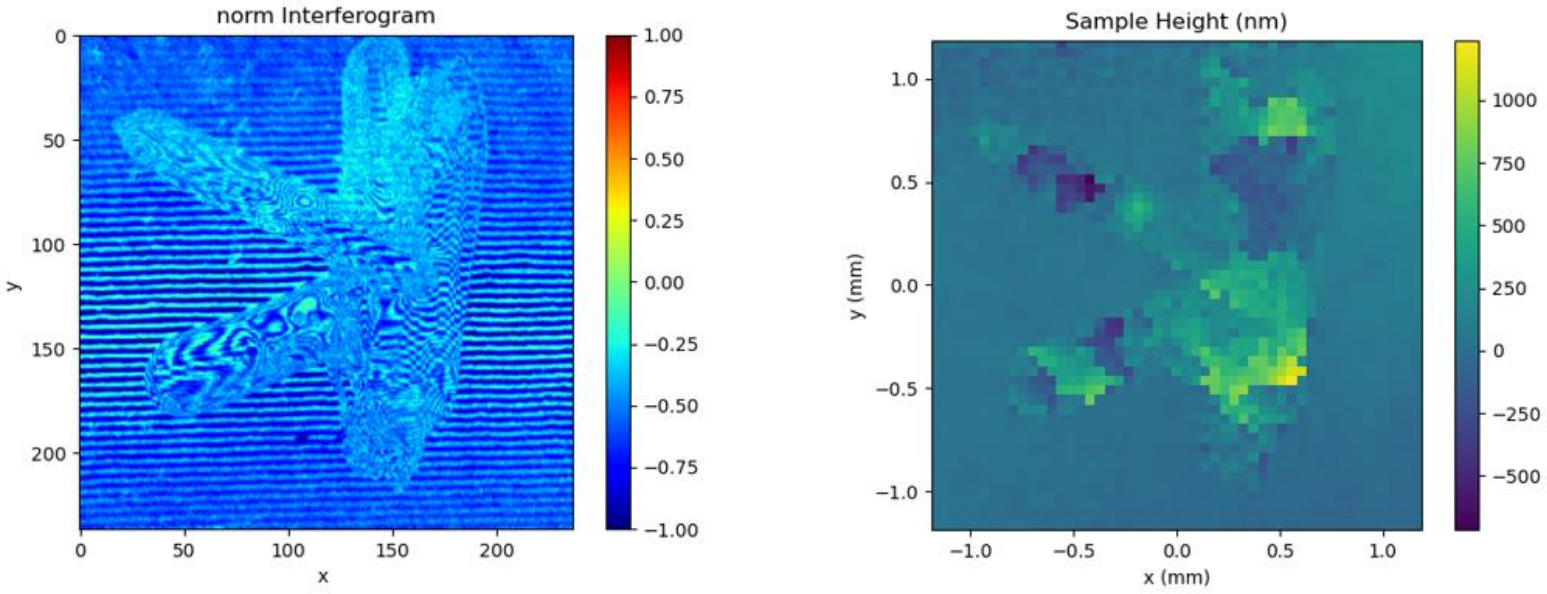
Περίοδος Κροσσών: Λ= 54.39428571428571 μm/pixel



Εικόνα 5.8.5. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 6η

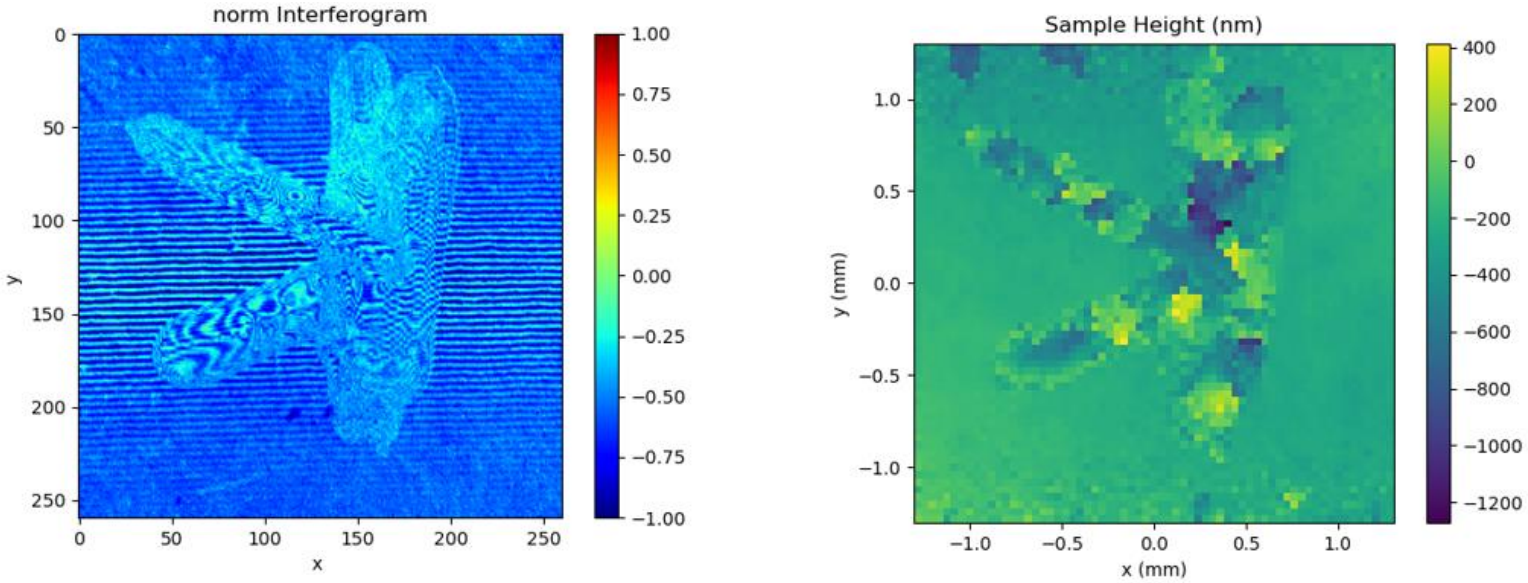
Περίοδος Κροσσών: Λ= 46.563529411764705 μm/pixel



Εικόνα 5.8.6. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 7η

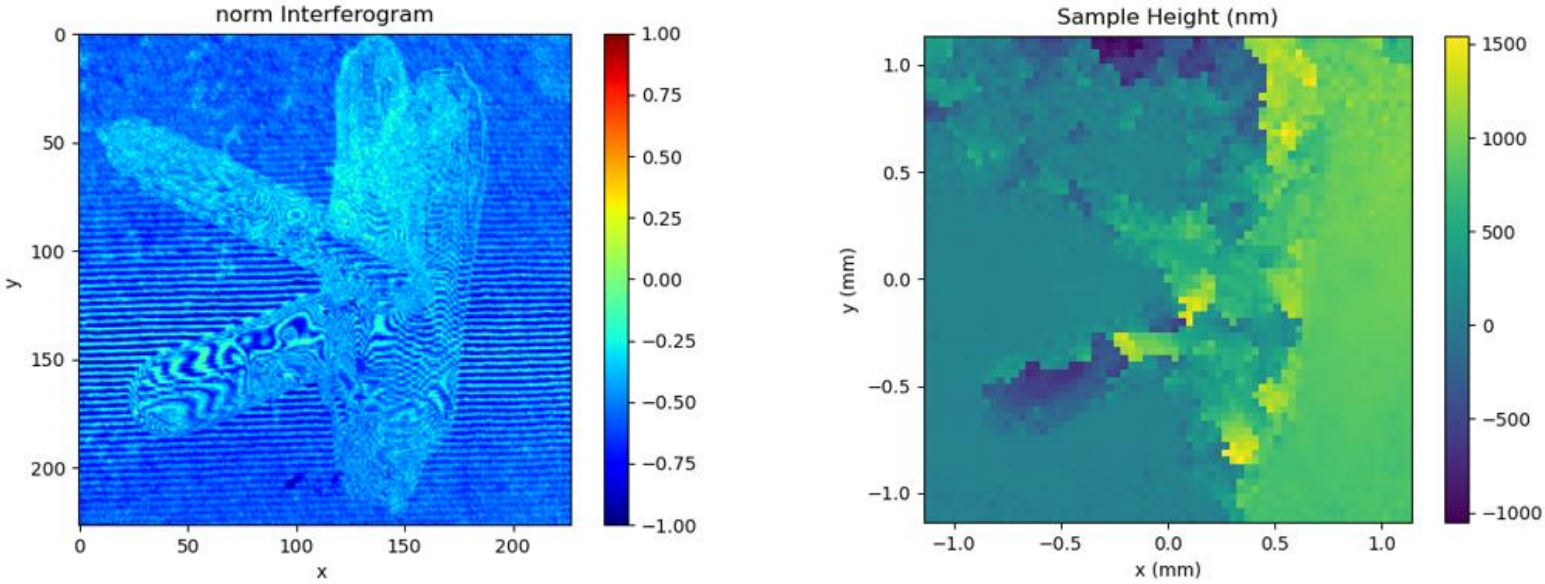
Περίοδος Κροσσών: Λ= 40.08 μm/pixel



Εικόνα 5.8.7. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 8η

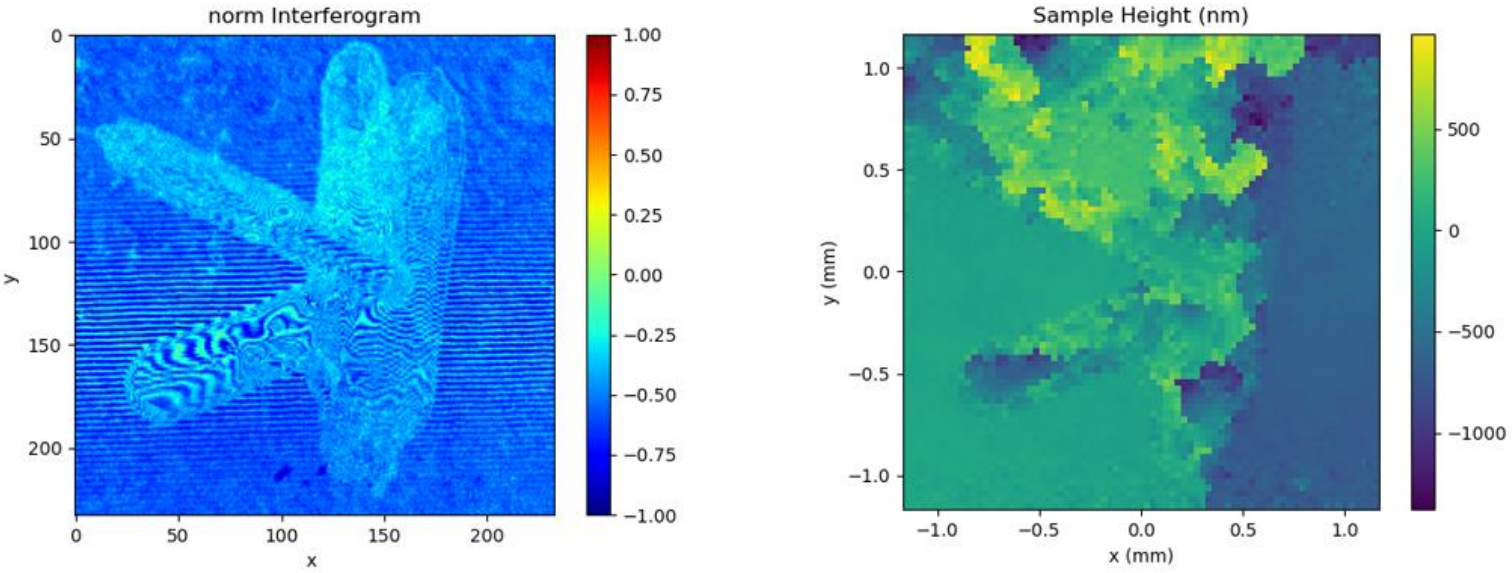
Περίοδος Κροσσών: Λ= 33.94835820895522 μm/pixel



Εικόνα 5.8.8. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Μέτρηση 9η

Περίοδος Κροσσών: Λ= 30.32025974025974 μm/pixel



Εικόνα 5.8.9. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

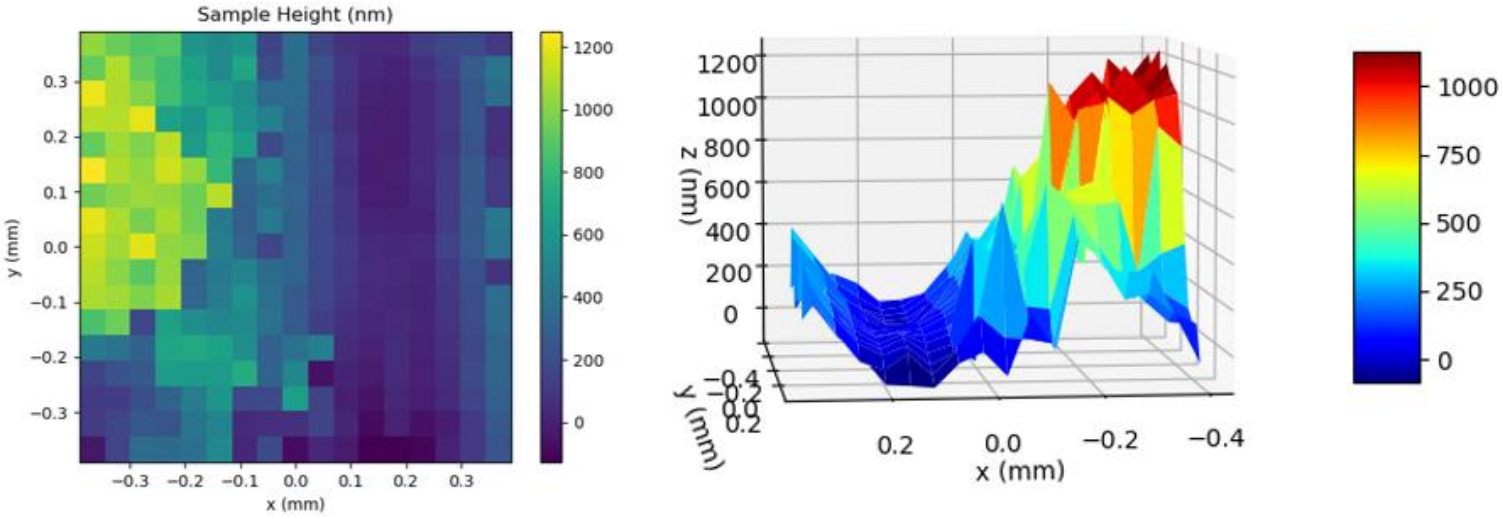
Μέσα από τις πειραματικές διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι είναι εφικτό να γίνει χαρτογράφηση της επιφάνειας με τη χρήση συμβολομετρίας και να αντλήσουμε πληροφορίες για τη μορφολογία της. Διακρίνεται πως όσο μικρότερη είναι η περίοδος των κροσσών, η εικόνα είναι πιο ευδιάκριτη και είναι εφικτό να ληφθούν περισσότερες πληροφορίες για την μορφολογία της επιφάνειας του δείγματος.

5.3.2. Αποτελέσματα μέτρησης βάθους κρατήρα βερνικιών.

Το δείγμα το οποίο μετρήθηκε, είναι το βερνίκι του κολοφωνίου το οποίο έχει ακτινοβοληθεί με πυκνότητα ενέργειας F=2.85 $\frac{J}{cm^2}$, με δέκα παλμούς και το βάθος του κρατήρα που δημιουργήθηκε, έχει μετρηθεί με προφιλόμετρο και είναι ίσο με 5.1μm. Τα αποτελέσματα βρίσκονται παρακάτω.

Μέτρηση 1η

Περίοδος Κροσσών: 45.97411764705882 μm/pixel

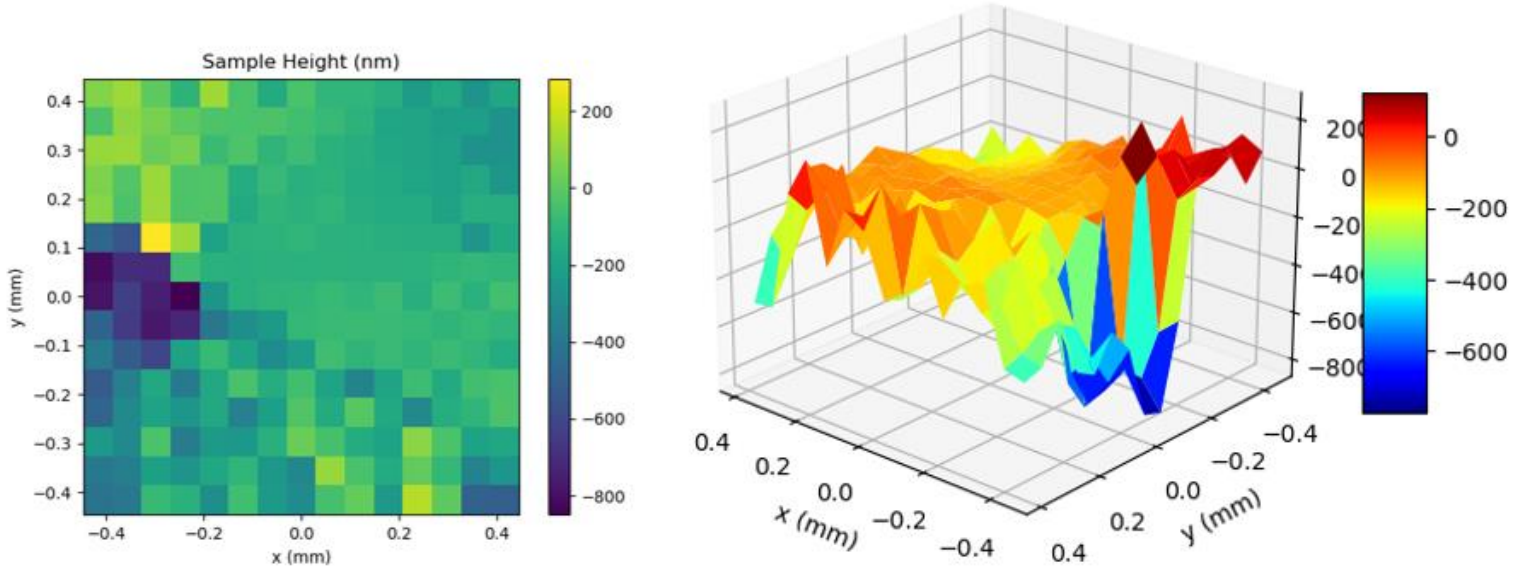


Εικόνα 5.9.1. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Παρατηρείται πως το βάθος είναι περίπου ίσο με z_1 = 800 nm = 0.8 μm.

Μέτρηση 2η

Περίοδος Κροσσών: 59.452 μm/pixel

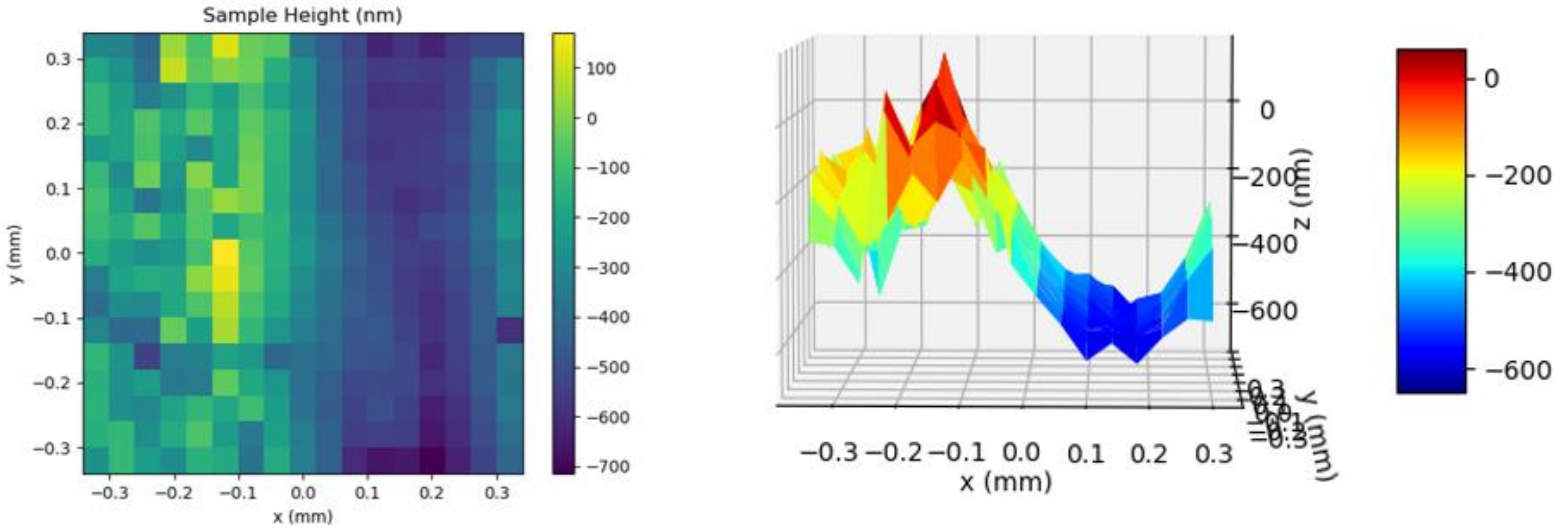


Εικόνα 5.9.2. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Παρατηρείται πως το βάθος είναι περίπου ίσο με z_2 = 1082 nm = 1.082 μm.

Μέτρηση 3η

Περίοδος Κροσσών: 40.08 μm/pixel

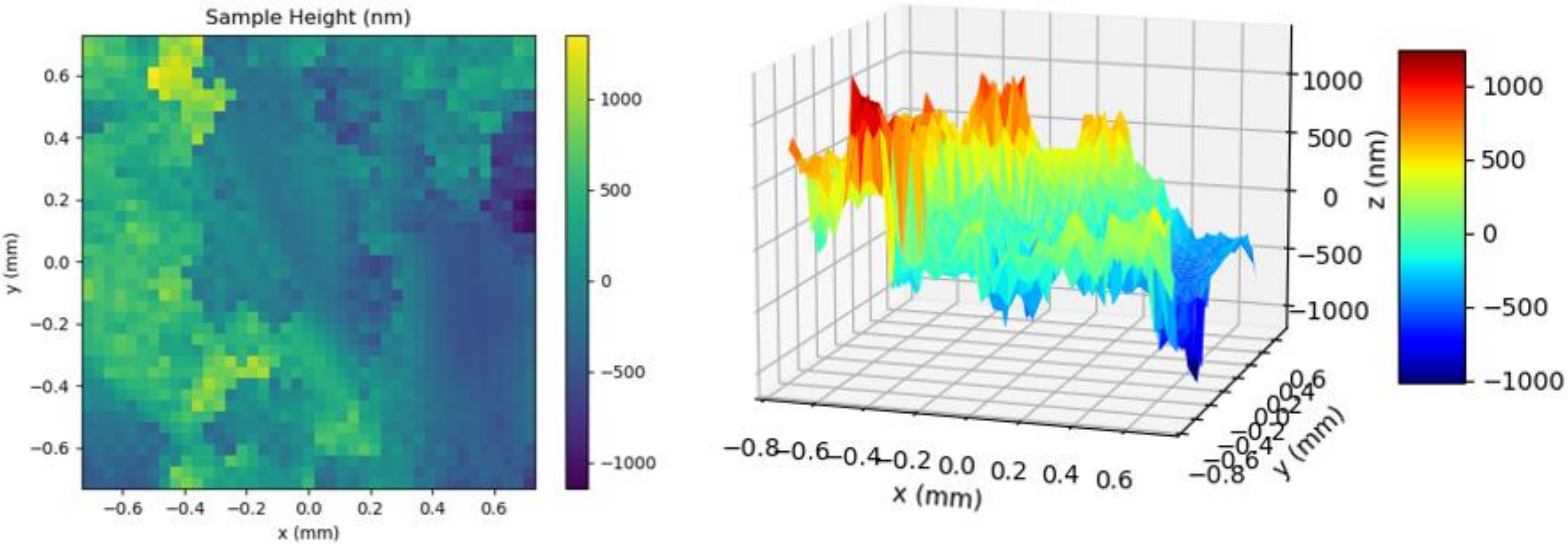


Εικόνα 5.9.3. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

Παρατηρείται πως το βάθος είναι περίπου ίσο με z_3 = 718.91 nm = 0.71891 μm

Μέτρηση 4η

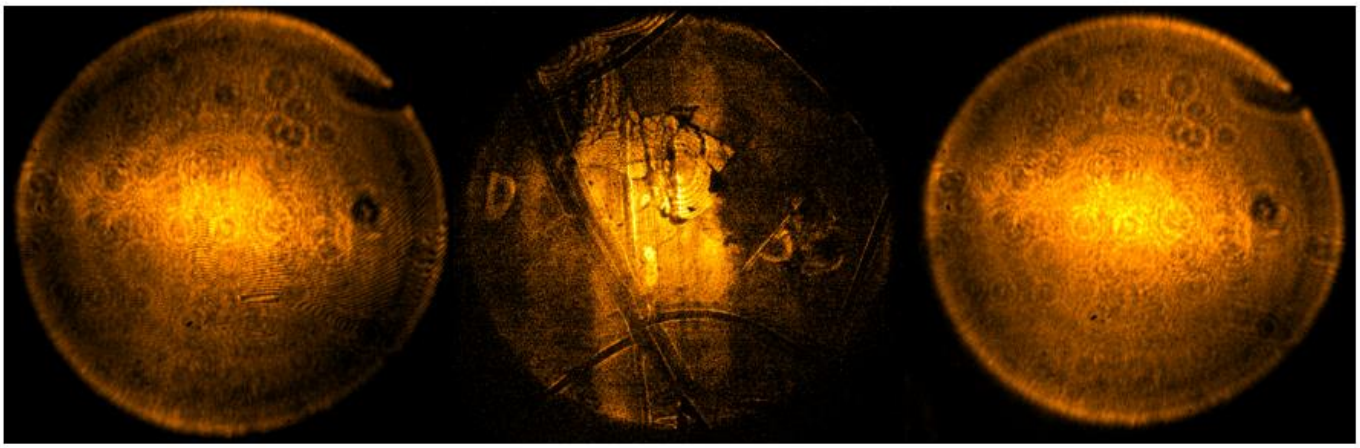
Περίοδος Κροσσών: 35.6809756097561 μm/pixel



Εικόνα 5.9.4. Απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος (αριστερά) και η χαρτογράφηση της περιοχής (δεξιά).

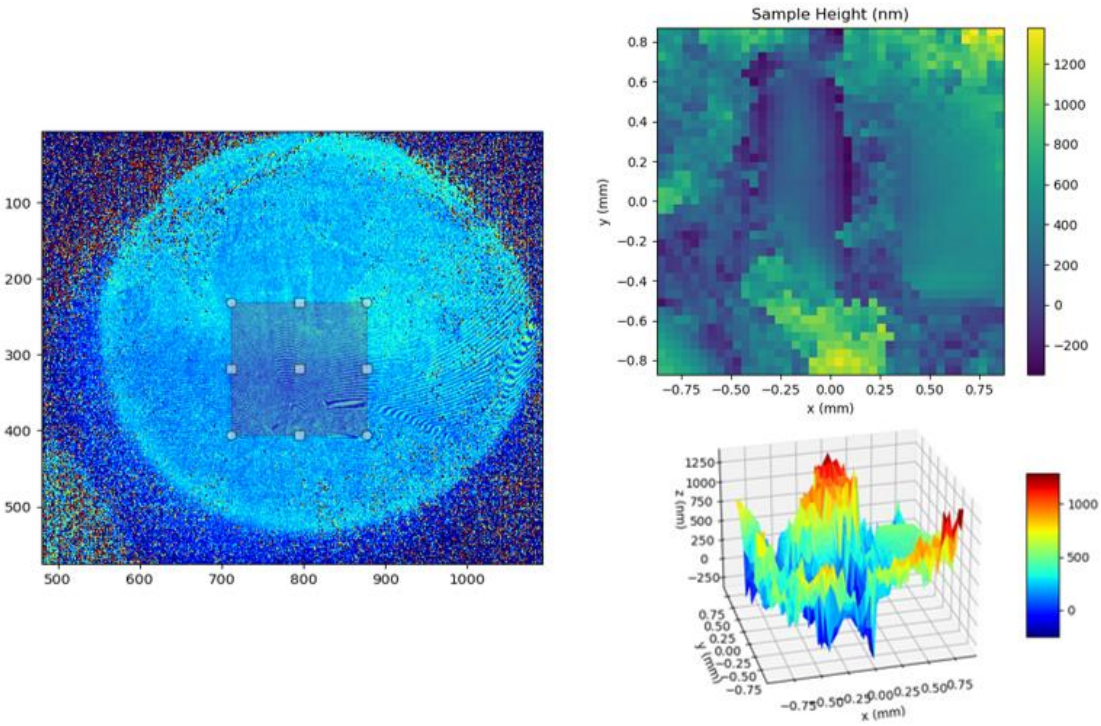
Παρατηρείται πως το βάθος είναι περίπου ίσο με z_4 = 1328 nm =1.328 μm

Μέτρηση 5η



Εικόνα 5.9.5. Στα αριστερά παρουσιάζεται το δείγμα κατά τη διάρκεια της συμβολής, στο κέντρο βρίσκεται η επιφάνεια του δείγματος και δεξιά η επιφάνεια που χρησιμοποιείται ως αναφορά.

Περίοδος Κροσσών: 42.52390243902438 μm/pixel



Εικόνα 5.9.6. Στα αριστερά παρουσιάζεται η περιοχή στην οποία πραγματοποιήθηκε η μέτρηση, δεξιά (πάνω) η απεικόνιση 2D της επιφάνειας του δείγματος και η χαρτογράφηση της περιοχής (κάτω).

Παρατηρείται πως το βάθος είναι περίπου ίσο με z_5 = 437.0074 nm =0.437 μm

Σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις το μέσο βάθος είναι ίσο με

$$\bar{z} = \frac{z_1+z_2+z_3+z_4+z_5}{4} = \frac{0.800+\ 1.082\ +0.719\ +1.328+0.437}{5} \rightarrow$$

$$\bar{z} = 1.0172\ \mu m$$

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντικές έρευνες.

Η παρούσα ερευνητική εργασία είχε στόχο την ανάπτυξη μιας συμβολομετρικής διάταξης που μετράει το βάθος του υλικού που αφαιρέθηκε κατά τον καθαρισμό των γηρασμένων βερνικιών με λέιζερ. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μια σειρά από ακτινοβολήσεις με τη χρήση του KrF laser, σε γηρασμένα βερνίκια με σκοπό να δημιουργήσουμε δοκίμια λεπτών στρωμάτων βερνικιού με διαφορετικά βάθη εγχάραξης. Η αφαίρεση στρωμάτων του υλικού που ήταν προς μελέτη βασίστηκε στο φαινόμενο της φωτοαποδόμησης μέσω της οποίας έγινε εφικτή η αποδόμηση των αλλοιωμένων στρωμάτων βερνικιών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν δείγματα. Στη συνέχεια μελετήθηκε το φαινόμενο της συμβολής με τη χρήση μιας συμβολομετρικής διάταξης παρέχοντας τη δυνατότητα της χαρτογράφησης των επιφανειών των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή τη μελέτη αλλά και τον υπολογισμό του βάθους εγχάραξης των βερνικιών που υπέστησαν φωτοαποδόμηση. Για την επιβεβαίωση των διαστάσεων των γραμμών εγχάραξης των δοκιμίων συμβατικά χρησιμοποιήθηκε ένα μηχανικό προφιλόμετρο. Οι μετρήσεις αυτές συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα από τη συμβολομετρική διάταξη που αναπτύχθηκε και παρατηρήθηκαν κάποιες αποκλίσεις μερικών μικρομέτρων. Αυτή η απόκλιση προκύπτει λόγω της τραχύτητας του δείγματος αλλά και εξαιτίας της περιόδου των κροσσών που είναι μεγαλύτερη από την ιδανική. Η χρήση του προφιλομέτρου για αυτού του είδους μετρήσεις δεν συστήνεται διότι αλλοιώνει το δείγμα αφού είναι μια καταστρεπτική διαδικασία σε αντίθεση με τις μετρήσεις που έγιναν με το συμβολόμετρο, όπου το δείγμα δεν υπέστη κάποια παραμόρφωση. Προτείνεται για την παρακολούθηση του καθαρισμού των ζωγραφικών έργων, η συμβολομετρική διάταξη να χρησιμοποιείται παράλληλα με την φωτοαποδόμηση ώστε να υπάρχει άμεσος έλεγχος για το ποσοστό του υλικού το οποίο αφαιρείται κατά την ακτινοβόληση.

Παράρτημα:

Διαδικασία επιταχυνόμενης γήρανσης βερνικιών.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη γήρανση των βερνικιών που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διεργασίες, είναι βασισμένη σε ένα πρωτόκολλο που δημιουργήθηκε με δεδομένα παλαιότερων ερευνών.[23] Το πρωτόκολλο αυτό προσαρμόζει τα αντικείμενα σε συνθήκες εσωτερικής έκθεσης ενός μουσείου και φανερώνει την επίδραση που έχουν τα φωτοευαίσθητα υλικά, όπως είναι αυτά που χρησιμοποιούνται στους πίνακες ζωγραφικής. Οι μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε ζωγραφικά έργα που εκτίθενται στην Tate Gallery, έδειξαν ότι στη επιφάνειά τους η ένταση φωτισμού είναι 200 lux. [24] Επομένως, η συνολική έκθεση ενός χρόνου, εφόσον το μουσείο λειτουργεί 8 ώρες την ημέρα για 365 μέρες, υπολογίστηκε στα 584000 lux-ώρες /χρόνο.

Η επιταχυνόμενη γήρανση των βερνικιών, πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτησή τους σε έναν ειδικά κατασκευασμένο θάλαμο που μεταβάλλει την ένταση του φωτισμού, ενώ παράλληλα η σχετική υγρασία και θερμοκρασία παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα. Το σύστημα φωτισμού απαρτίζεται από λυχνίες ατμού υδραργύρου χαμηλής πίεσης, επιτρέποντας έτσι την ομοιογενή χωρική κατανομή της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του δείγματος αλλά και τον έλεγχο της έντασης του φωτισμού με την αλλαγή της απόστασης του αντικειμένου από τις λυχνίες. Η ένταση του φωτισμού στην επιφάνεια του δείγματος υπολογίστηκε στα 19000 lux επομένως, η συνολική ένταση φωτισμού που αντιστοιχεί σε μια ημέρα έκθεσης στην ακτινοβολία υπολογίζεται :

$$\text{E} = 19000\ \text{lux} \times 24\ \text{ώρες} = 456000\ \text{lux}\ \cdot \text{ώρες/ημέρα}$$

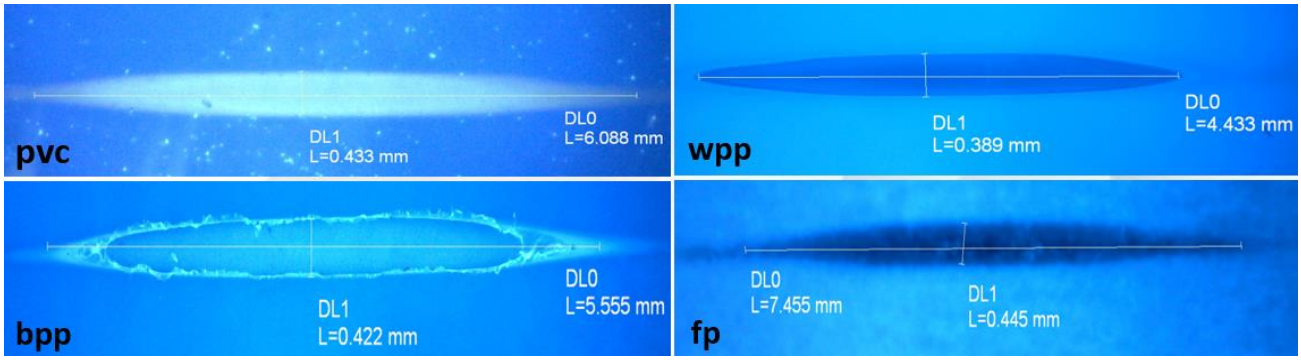
Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για την προσομοίωση της έκθεσης των δειγμάτων σε συνθήκες μουσείου για δέκα χρόνια, τα δείγματα παρέμειναν στο θάλαμο επιταχυνόμενης γήρανσης για :

$$\frac{584000}{456000} \times 10\ \text{χρόνια} = 12.8\ \text{ημέρες}$$

Υπολογισμός του εμβαδού της επιφάνειας αλληλεπίδρασης S (spot size).

Για να ξεκινήσουν οι πειραματικές διαδικασίες είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της επιφάνειας του υλικού που θα ακτινοβοληθεί (Spot size, S), με σκοπό την παρατήρηση της αλληλεπίδρασης αυτής με την δέσμη του laser. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης αυτής απαιτείται η ακτινοβόληση του laser για έναν παλμό και στη συνέχεια ο υπολογισμός του εμβαδού της επιφάνειας που αλληλοεπιδρά σύμφωνα με την εξίσωση (2) μετρώντας με τη χρήση του φορητού ψηφιακού μικροσκοπίου Dino –

Lite, τους ημιάξονες της έλλειψης d_1 και d_2 . Οι επιφάνειες που ακτινοβολήθηκαν ήταν επιφάνειες φύλλου PVC, λευκού και μαύρου φωτογραφικού χαρτιού αλλά και χαρτί για fax και αυτό γιατί το εμβαδόν μεταβάλλεται από το υλικό το οποίο αλληλεπιδρά η δέσμη του laser. Το υλικό το οποίο αλληλεπιδρά με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που αλληλοεπιδρούν τα βερνίκια είναι το φύλλο PVC, όπου και χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις του εμβαδού πριν από κάθε ακτινοβόληση. Το μέγεθος του spot size εξαρτάται επίσης και από την απόσταση που έχει η επιφάνεια του υλικού από την εστία του συγκλίνοντα φακού. Με την μέτρηση του εμβαδού της επιφάνειας είναι δυνατός ο υπολογισμός της πυκνότητας ενέργειας που χρησιμοποιείται μέσω της εξίσωσης (1) Η τιμή της ενέργειας του laser που χρησιμοποιείται στις πειραματικές διαδικασίες ρυθμίστηκε με τη χρήση εξασθενητών, σύμφωνα με την τιμή που επιλέχθηκε για την πυκνότητα ενέργειας. Για τις πειραματικές μετρήσεις του spot size του υλικού το οποίο τοποθετείται στη θέση του δείγματος, δεν χρησιμοποιήθηκαν εξασθενητές (attenuators), διότι ήταν απαραίτητη η μέγιστη ενέργεια του laser, ώστε ο σχηματισμός του κρατήρα που θα δημιουργηθεί να έχει ομοιόμορφο μέγεθος και το σημείο εστίασης του οπτικού ήταν στα 28 cm.



Εικόνα 6.1. Ακτινοβολήσεις με ένα παλμό σε διαφορετικά υλικά για την μέτρηση του spot size.

Πίνακας 10. Μετρήσεις spot size σε διαφορετικά υλικά.				
Υλικό	**Ενέργεια από Joulemeter**	**Y (mm)**	**X (mm)**	**S (cm^2)**
Φύλλο PVC	23.7	0.43	6.09	0.0264
Μαύρο φωτογραφικό χαρτί	23.7	0.42	5.56	0.00234
Λευκό φωτογραφικό χαρτί	23.7	0.39	4.43	0.0172
Χαρτί Fax	23.7	0.45	7.46	0.0332

Όπως παρατηρείται και από τα δεδομένα του πίνακα, ενώ η ενέργεια του laser αλλά και η εστιακή απόσταση παραμένει σταθερή, το εμβαδόν μεταβάλλεται ανάλογα με το υλικό το οποίο ακτινοβολείται.

Πίνακας 11. Μετρήσεις spot size με διαφορετικούς παλμούς σε πίνακες ζωγραφικής. *(χρωστική: lead white , βερνίκι: μια στρώση)*					
Παλμοί	**Ενέργεια από Joulemeter**	**Y(mm)**	**X(mm)**	**S (cm^2)**	**F(J/cm^2)**
20	23,7	0,45	5,47	0,0243	0,974
1	23,7	0,41	4,78	0,0196	1,207
5	23,7	0,39	4,26	0,0166	1,432

Αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του προφίλ των δειγμάτων.

Για τη δημιουργία των μονοδιάστατων, δυσδιάστατων αλλά και τρισδιάστατων προφίλ των επιφανειών των δειγμάτων, ώστε να επιτευχθεί η χαρτογράφησή τους, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος με τη χρήση του προγράμματος της Python, όπου συλλέγει πληροφορίες, μέσω του προγράμματος Spin View όπου καταγράφεται το φαινόμενο της συμβολής, και δημιουργεί τα προφίλ των επιφανειών.

Αρχικά το πρόγραμμα εισάγει διάφορες βιβλιοθήκες Python που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία εικόνων, την εξαγωγή δεδομένων και την γραφική απεικόνιση. Στην συνέχεια ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διάφορες ρυθμίσεις όπως αν θέλει να αποθηκεύσει τα δεδομένα, την περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) δηλαδή, την περιοχή απο την οποία θέλει να συλλέξει δεδομένα και το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στις πειραματικές διεργασίες. Στη συνέχεια υπάρχου διάφορες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία Gaussian φίλτρων, την ανάκτηση φάσης από διακυμάνσεις φωτεινότητας και την αποθήκευση αρχείων. Έπειτα, το πρόγραμμα επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει τα αρχεία εικόνων που θέλει να επεξεργαστεί τα οποία λήφθηκαν μέσω του προγράμματος Spin View. Το πρόγραμμα εισάγει τις εικόνες αυτές που επιλέχθκαν και αναλύει τις διακειμάνσεις της φωτεινώτητας και

εξάγει την φάση ως προς τον χρόνο, βρίσκει την ένταση και αναλύει την περιοχή γύρω από τα μέγιστα, διότι εκεί βρίσκεται και η μεγαλύτερη πληροφορία. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τον μετασχματισμό Fourier υπολογίζει τη φάση από το φανταστικό μέρος του (sin) και το πραγματικό μέρος του συστήματος (cos) χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση atan2 . Η atan2 είναι μια συνάρτηση που υπολογίζει τη γωνία θ μεταξύ του (x, y) σημείου σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και του αρχής των συντεταγμένων (0, 0).

Ο τύπος για τον υπολογισμό της φάσης (φ) από το φανταστικό (sin) και το πραγματικό (cos) μέρος είναι ο εξής:

$$\varphi = \text{atan2}\,(\sin,\cos) \qquad \textbf{(14)}$$

Η φάση η οποία υπολογίζεται, αντιπροσωπεύει υψομετρικές πληροφορίες και το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει και να εξάγει αυτές τις πληροφορίες για περαιτέρω ανάλυση δημιουργώντας μονοδιάστατα, δισδιάστατα αλλά και τρισδιάστατα προφίλ.

Βιβλιογραφία:

[1] Πουλίοπουλος Π., Χατζημπαλάση Θ., (2007). Η διττή φύση του τροποσφαιρικού όζοντος: Ένα πράσινο εργαλείο για την επεξεργασία χρωματισμένων βιομηχανικών αποβλήτων και ταυτόχρονα ένας ρυπογόνος παράγοντας καταστροφής φυσικών χρωστικών και ελαστικών υλικών. 1-10.

[2] Ziarani G. M., Moradi R., Lashgari N., Kruger H. G. (2018). Introduction and Importance of Synthetic Organic Dyes. 1-7. doi: 10.1016/B978-0-12-815647-6.00001-7

[3] De la Rie E. R. (1987). The Influence of Varnishes on the Appearance of Paintings. Studies in Conservation, 32 (1), 1. doi: 10.2307/1506186

[4] Mojmír Svatopluk F. (1964). A Note on Theophilus, Maker of Many Wonderful Things. In: The Art bulletin vol. 46, 4. p. 525-529

[5] De la Rie E. R. (1987). The Influence of Varnishes on the Appearance of Paintings. Studies in Conservation, 32 (1), 1. doi: 10.2307/1506186

[6] Dietemann P., Higgitt C., Kälin M., Edelmann M.J., Knockenmuss R., Zenobi R., Cult J. Herit. (2009). https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.04.007

[7] Trumpy G., Conover D., Simonot L., Thoury M., Picollo M., Delaney J. K. (2015). Experimental study on merits of virtual cleaning of paintings with aged varnish. 33836-33848. doi:10.1364/OE.23.033836

[8] Marner F. J., Freyer A., Lex J., (1991). Triterpenoids from gum mastic, the resin of Pistacia lentiscus. No. 11, pp. 3709-3712

[9] Koob S. (1986). The Use of Paraloid B-72 as an adhesive. Its application for archaeological ceramics and other materials. Studies in Conservation. 31: 7–14. doi:10.1179/sic.1986.31.1.7

[10] Gettens, R. J.; Stout, G. L., (1947) Painting Materials a Short Encyclopaedia. pp. 14-73.

[11] Ιωακειμόγλου, Ε. Ε., (1993)Τα Οργανικά Υλικά στην Τεχνη και την Αρχαιολογία (Τόμος Α'). Τροχαλία: Αθήνα, pp. 102-130.

[12] Vandenabeele, P.; Wehling, B.; Moens, L.; Edwards, H.; Reu, M. D.; Hooydonk, G. V., (2000) .Analysis with micro-Raman spectroscopy of natural organic binding media and varnishes used in art. *Analytica Chimica Acta***,** *407*, 261-274

[13] Georgiou S., Zafiropulos V., Anglos D., Balas C., Tornari V., Fotakis C. (1998) "Excimer laser restoration of painted artworks: procedures, mechanisms and effects" Applied Surface Science, 127-129, 738-745.

[14] The welding institute, (1/10/2023), https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-an-excimer-laser.

[15] Ready J. F., (1997). Industrial Applications of Lasers (Second Edition), Pages 66-130, Honeywell Technology Center, Minneapolis, Minnesota.

[16] Πουλή Π., (2013). Η τεχνολογία λέιζερ στη χημική ανάλυση, τη δομική διάγνωση και τον καθαρισμό ζωγραφικών έργων βυζαντινής περιόδου. 156-201.

[17] Σημειώσεις διάλεξης: Papazoglou D.G., Wave Optics and Optical Metrology, MSc Optics and Vision. p: 180–205.

[18] Βανίδης Ε. Δ., (2006). Επαλληλία κυμάτων συμφωνία και συμβολή φωτός. 1- 311

[19] Wyant J. C., (2017). Introduction to Interferometric Optical Testing. University of Arizona.
[20] Wyant J. C., (2013) White Light Interferometry. (98-107)
[21] William W. Macy, Jr., (1983), Two-dimensional fringe-pattern analysis, p: 3898-3901, https://doi.org/10.1364/AO.22.003898
[22] Goldberg K. A., Bokor J.. (2001) Fourier-transform method of phase-shift determination. Appl. Opt., 40(17):2886–2894.http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-40-17-2886
[23] Van der Brink, O. F., Eijkel, G. B., Boon, J.J. (2000). Dosimetry of paintings: determination of the degree of chemical change in museum-exposed test paintings by mass spectrometry. Thermochimica Acta, 365(1-2) , 1-23. doi: 10.1016/s0040-6031(00)00609-2
[24] Cohen, N.S.Odlyha, M., Campana, R., & Foster, G. M. (2000). Dosimetry of paintings: determination of the degree of chemical change in museum exposed test paintings (lead white tempera) by thermal analysis and infrared spectroscopy. Thermochimica Acta, 365(1-2), 45-52. doi:10.1016/s0040-6031(00)00612-2
[25] Gliozzo E., Ionescu Corina. (2021). Pigments—Lead-based whites, reds, yellows and oranges and their alteration phases. doi: 10.1007/s12520-021-01407-z
[26] Langenheim J. H., (2003), Plant resins: chemistry, evolution, ecology and ethnobotany. 93(6): 784–785. doi: 10.1093/aob/mch103
[27] Papazoglou D. G., Papadakis V., Anglos D., (2004). In situ interferometric depth and topography monitoring in LIBS elemental profiling of multi-layer structures. (19), 483-488. doi:10.1039/B315657r
[28] G.A. van Doelen. (1999). Molecular studies of fresh and aged triterpenoid varnishes. Chapter 3, 45-81.
[29] Mohamed Oujja, Ana Garcia, Carolina Romero, Javier R. Vazquez de Aldana, Pablo Moreno, Marta Castillejo. (2010). UV laser removal of varnish on tempera paints with nanosecond and femtosecond pulses. doi:10.1039/c0cp02147d
[30] Moretti P., Iwanicka M., Melessanaki K., Dimitroulaki E., Kokkinaki O., Daugherty M., Sylwestrzak M., Pouli P., Targowski P., Klaas Jan van den Berg, Cartechini L., Miliani C. (2019). Laser cleaning of paintings: in situ optimization of operative parameters through non-invasive assessment by optical coherence tomography (OCT), refection FT-IR spectroscopy and laser induced fluorescence spectroscopy (LIF). doi: 10.1186/s40494-019-0284-8
[31] Filippidis G., Mari M., Kelegkouri L., Philippidis A., Selimis A., Melessanaki K., Sygletou M., Fotakis C., (2014). Assessment of In-Depth Degradation of Artificially Aged Triterpenoid Paint Varnishes Using Nonlinear Microscopy Techniques. 1-8. doi: 10.1017/S1431927614013580
[32] Rottenkolber M., Podbielska H.. (1996). High precision Twvman-Green interferometer for the measurement of ophthalmic surfaces. (74) 348-353. doi: 10.1111/j.1600-0420.1996.tb00706.x

[33] Cyrille Monnereau, Errol Blart, Bertrand Illien, Michael Paris, Fabrice Odobel. (2005). Study of the cross-linking mechanism of a copolymer containing an electrooptic chromophore. 18: 1050–1058. doi: 10.1002/poc.969

[34] Marner F.J., Freyer A., Lex J., (1991). Triterpenoids from gum mastic, the resin of Pistacia lentiscus. No. 11, pp. 3709-3712.

[35] Sharma S. K., Shukla S. K., Vaid D.N., (1983). Shellac-Structure, Characteristics & Modification. 261-271. doi: https://doi.org/10.14429/dsj.33.6181

[36] Baglioni M., Raudino M., Berti D., Keiderling U., Bordes R., Holmberg K., Baglioni d P.. (2014). Nanostructured fluids from degradable nonionic surfactants for the cleaning of works of art from polymer contaminants., 10, 6798–6809. doi: 10.1039/c4sm01084a.

[37] Trumpy G., Conover D., Simonot L., Thoury M., Picollo M., Delaney J.K. (2015). Experimental study on merits of virtual cleaning of paintings with aged varnish. Vol. 23, No. 26. doi:10.1364/OE.23.033836

[38] Fundamentals of Interferometry, Two-Beam Interference Equation, (15-10-23), https://spie.org/samples/FG10.pdf

[39] Lahiri M., (2012), Quantum Theory of Coherence and Polarization of Light ,77-106, doi: 10.5772/35332