



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

Τομέας Φυσικής

Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας laser με ημιαγωγούς

Διπλωματική Εργασία

Βασίλης Παπαδημητρίου

Επιβλέπων: Α. Α. Σεραφετινίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας laser με ημιαγωγούς

Διπλωματική Εργασία

Βασίλης Παπαδημητρίου

Επιβλέπων: Α. Α. Σεραφετινίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Α. Α. Σεραφετινίδης: Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Τσουκαλάς: Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μ. Μακροπούλου: Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης που στόχευε να προσδιορίσει τις καλύτερες συνθήκες θερμικής ανόπτησης για ντοπαρισμένα δείγματα πυριτίου, προκειμένου να επιτευχθεί διαμόρφωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των επιλεγμένων περιοχών για την ανάπτυξη ρηχών επαφών p-n.

Τα εξεταζόμενα δείγματα, ήταν wafer γερμανίου και wafer πυριτίου με επιφανειακή οξείδωση αλλά και με προσμείξεις Βορίου στην επιφάνειά τους. Οι διατάξεις laser που χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική μελέτη, ήταν ένα laser Nd:YAG στα 1,064 μm και ένα TEA CO₂ laser στα 10,6 μm . Όλα τα laser παρήγαγαν παλμούς στην κλίμακα των ns. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο βασικός στόχος αυτής της εργασίας ήταν η κατασκευή ρηχών επαφών από προσμείξεις Βορίου σε βάθη 13 nm. Γι αυτόν το λόγο, η διαδικασία της ανόπτησης έπρεπε να αποδώσει υψηλή ενεργοποίηση και πλήρη ανακρυστάλλωση των ακτινοβολημένων περιοχών.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της ακτινοβολίας στα δείγματα, αυτά μελετήθηκαν μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Με αυτόν τον τρόπο, μελετήθηκαν και καταγράφηκαν όχι μόνο οι αλλαγές στη μορφολογία των ακτινοβολημένων περιοχών, αλλά και τα φαινόμενα τήξης και ανακρυστάλλωσης που ίσως προέκυψαν στην περιφέρεια των ακτινοβολημένων περιοχών.

Τα δείγματα, χαρακτηρίστηκαν ηλεκτρικά με βάση τη μέθοδο “Van Der Pauw”, προκειμένου να διαπιστωθούν αλλαγές στην αγωγιμότητα των ακτινοβολημένων περιοχών για την ανάπτυξη ρηχών επαφών.

Λέξεις – κλειδιά: Ταχεία θερμική ανόπτηση, ενεργοποίηση προσμείξεων, διάχυση προσμείξεων, ακτινοβόληση, υπέρυθρο, αποδόμηση, προθέρμανση, μορφολογικός χαρακτηρισμός SEM, ηλεκτρικός χαρακτηρισμός Van Der Pauw, επιφανειακή αντίσταση.

Abstract

This work presents the results of an experimental study aiming to determine the best laser annealing conditions for doped Si-wafers, in order to selectively modify the conductivity of the treated areas and create shallow p-n junctions. The samples examined were germanium and silicon wafers with a thin film of silicon oxide on top as well as boron doped silicon wafers.

The laser systems used in the experimental setup were a Nd:YAG laser operating at 1,064 μm and a TEA CO₂ laser operating at 10,6 μm . All lasers were producing pulses in the nanosecond regime. As mentioned above, the main target of this study is to fabricate shallow p-n junctions based on boron impurities with depths up to 13 nm. For this purpose the annealing procedure should exhibit high activation efficiency and full recrystallization of the affected regions. In order to determine the influence of the laser treatment on the samples, they were studied through electron microscope. In this way, not only the changes in the morphology of the irradiated areas, but also the influence of the probable side effects, like melting and recrystallization of the treated regions, were determined and recorded.

The samples were further characterized using “Van Der Pauw” electrical measurements in order to identify the modifications in the conductivity of the irradiated areas, as well as the development of shallow p-n junctions, as required.

Keywords: Quick thermal annealing, dopant activation, dopant diffusion, irradiation, infrared, ablation, preheating, SEM, Van Der Pauw electrical measurements, sheet resistance.

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω τον Αλέξανδρο Σεραφετινίδη, Καθηγητή “Οπτοηλεκτρονικής και laser” του Ε.Μ.Π., όχι μόνο για την αποδοχή της επίβλεψης της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά κυρίως για τη διαρκή, αμέριστη και πολύμορφη στήριξη που μου παρείχε, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στις επιλογές μου. Η επιστημονική του καθοδήγηση ήταν καθημερινή, ενθαρρύνοντας με στην ανάληψη πρωτοβουλιών, που λειτούργησαν προωθητικά στην εξέλιξη του πειράματος

Θερμές ευχαριστίες αποδίδονται και στον κύριο Δημήτρη Τσουκαλά, Καθηγητή “Μικροηλεκτρονικής” του Ε.Μ.Π., για τη θεωρητική καθοδήγηση και την παροχή όλων των δειγμάτων και εργαστηριακών υποδομών που χρησιμοποιήθηκαν. Η διαμεσολάβησή του σε κομβικά σημεία της πειραματικής διαδικασίας και η τεκμηριωμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ήταν καθοριστική για την επιτυχή έκβαση του πειράματος.

Ευχαριστώ επίσης την κυρία Μυρσίνη Μακροπούλου, Καθηγήτρια “Βιοφωτονικής” του Ε.Μ.Π., για το καθημερινό ενδιαφέρον που επέδειξε όλους αυτούς τους μήνες της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Το εγχείρημα ίσως να είχε αποτύχει αν δεν το διαμόρφωνε ο Δρ. Σπύρος Σταθόπουλος. Αν και η επικοινωνία μας τους τελευταίους μήνες ήταν διαδικτυακή, με καθοδήγησε, αξιολόγησε και με συμβούλεψε πολλές φορές για την εξέλιξη του πειράματος, με εξαιρετική σαφήνεια και άμεση απόκριση. Ήταν ο συνάδελφος που γεφύρωσε με συνέπεια ένα διεπιστημονικό κενό μεταξύ φωτονικής και μικροηλεκτρονικής.

Δεν πρέπει να παραλείψω τον υποψήφιο διδάκτορα Λάμπρο Πατσιούρα για την πολύτιμη βοήθειά του, στο κομμάτι του μορφολογικού και ηλεκτρικού χαρακτηρισμού των δειγμάτων. Ευχαριστώ επίσης, τον υποψήφιο διδάκτορα Γιάννη Τσιλίκα για την σύμπραξη στο πρώτο σκέλος των ακτινοβολήσεων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, στον Χάρη Σαμαρτζή, ο οποίος μου έκανε την τιμή να με βοηθήσει στην κατασκευή της διάταξης προθέρμανσης για τον τρίτο κύκλο πειραμάτων ακτινοβολήσης.

Τέλος, αυτή η εργασία, ως επιστέγασμα της πολύχρονης ακαδημαϊκής μου δραστηριότητας, αφιερώνεται απο καρδιάς στην Μαρία και στην Στέλλα.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή

Σχετικά με τα τρανζίστορ πυριτίου, το παρόν και το μέλλον τους	2
Σχετικά με τη θερμική ανόπτηση ημιαγωγών	7
Σχετικά με τα laser, τις ιδιότητες και την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη	9
Σχετικά με τα laser Nd:YAG	10
Σχετικά με τα laser CO ₂	11

Πειραματικό Μέρος

Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser	11
Ακτινοβολήση με TEA: CO ₂ laser (χωρίς προθέρμανση)	15
Ακτινοβολήση με TEA: CO ₂ laser (με προθέρμανση στους 400 °C)	17

Χημικός καθαρισμός δειγμάτων - Καθαρός Χώρος 21

Μορφολογικός χαρακτηρισμός – Ψηφιακό μικροσκόπιο

Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser	26
Ακτινοβολήση με CO ₂ laser	33

Μορφολογικός χαρακτηρισμός – SEM

Λίγα λόγια για το SEM	43
Nd: YAG laser	46
Μορφολογικός χαρακτηρισμός δειγμάτων απο TEA: CO ₂ laser	58
Συμπεράσματα ακτινοβολήσης με SEM	77

Φωτολιθογραφία – επιμετάλλωση

Φωτολιθογραφία	79
Επιμετάλλωση	81

Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός

Σύντομη θεωρία	84
Πειραματική Παρουσίαση	85

Συμπεράσματα 89

Βιβλιογραφία 90

Δημοσιεύσεις 91

Εισαγωγή

Σχετικά με τα τρανζίστορ πυρίτιου, το παρόν και το μέλλον τους

Σχεδόν καθε πτυχή της σύγχρονης καθημερινότητας, διαμεσολαβείται απο κυκλώματα και υπολογιστές. Διατάξεις, που έχουν εναπαροσδιορίσει ολοκληρωτικά το σύγχρονο πλαίσιο της μισθωτής εργασίας, της εκπαίδευσης, της μετακίνησης, της ψυχαγωγίας, της ιατρικής περίθαλψης, της κοινωνικής οργάνωσης εν γένει, αποτελούν καινοτομίες που αναπτύχθηκαν τα τελευταία 70 χρόνια.

Σημείο αναφοράς σε αυτήν την τεχνολογική εξέλιξη, αποτέλεσε η κατασκευή του πρώτου τρανζίστορ στα εργαστήρια της Bell, τον Δεκέμβριο του 1947 απο τους John Bardeen, William Shockley και Walter Brattain. Με μια πρώτη ματιά, η ανακάλυψη του τρανζίστορ, σε μια χρονική συγκυρία κβαντικής επαναθεμελίωσης της σύγχρονης φυσικής και διαρκούς ανάδυσης νέων επιστημονικών πεδίων και τεχνολογιών, ίσων να μην έπειθε ιδιαίτερα για τις παρακαταθήκες που θα άφηνε στις επόμενες γενιές. Ωστόσο, τόσο η αρχή λειτουργίας της διάταξης, όσο και οι τεχνολογίες που την πλαισιώναν στην εξέλιξη της, δημιούργησε τις βάσεις για την ανάπτυξη, σύγχρονων, υπερταχέων, μη ενεργοβόρων, εργονομικών, αξιόπιστων συστοιχιών κυκλωμάτων και διατάξεων, που χρησιμοποιούνται ακόμη και για τη σύνταξη κάθε χαρακτήρα αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αυτή η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και η ενσωμάτωση της στο πεδίο της καθημερινότητας, δεν αποτελεί κάποιου είδους φυσική νομοτέλεια, ούτε απότοκο της δαρβινικής θεωρίας, αλλά αποτέλεσμα εθνικών στρατηγικών σχεδιασμών, διαρκούς εταιρικού ανταγωνισμού, με σκοπό την αλματώδη αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος.

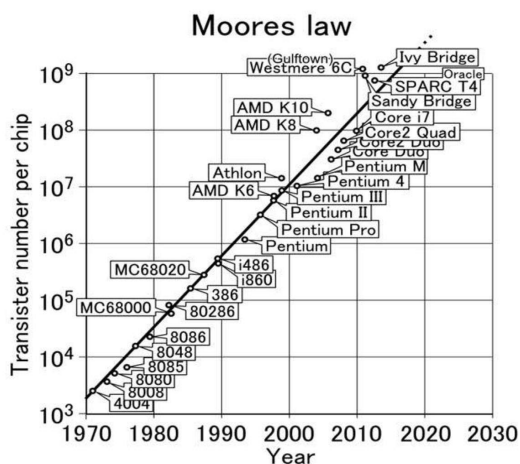
Και αυτή η αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος, θα προσέδιδε (γεω)στρατηγικό, οικονομικό, και κοινωνικό πλεονέκτημα σε όσους τη βελτιστοποιούσαν, πολύ περισσότερο όταν εξελίσσονταν εν μέσω διαρκούς ψυχροπολεμικής συγκυρίας. Σε αυτό το πλαίσιο, ακόμα κι αν η ανάπτυξη του πρώτου τρανζίστορ στις Η.Π.Α μπορούσε να θεωρηθεί αποτέλεσμα τυχαιότητας, καθόλου τυχαία δεν ήταν η μετέπειτα συστηματική ανάπτυξη του πεδίου της (μικρο)ηλεκτρονικής και των εφαρμογών που απορρέουν απο αυτήν. Το 1955 εισάγεται το πυρίτιο έναντι του γερμανίου ως υλικό ημιαγωγικών διατάξεων, 2 χρόνια αργότερα, αναπτύσσεται η τεχνική της φωτολιθογραφίας, το 1958 παράγεται μαζικά το πρώτο τρανζίστορ με βάση το πυρίτιο, ενώ λίγο αργότερα κατασκευάζεται το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα και υλοποιείται η μέθοδος της επίπεδης ολοκλήρωσης^[8].

Ο πολυπράγμων Gordon Moore, διευθυντής ερευνών και ανάπτυξης της “Fairchild

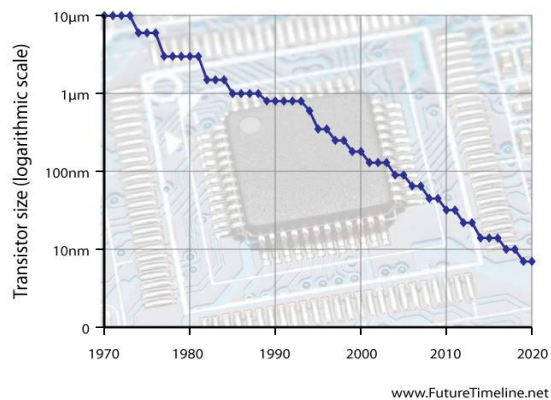
Semiconductors”, σχεδιαστής του πρώτου μαζικά παραγόμενου τρανζίστορ πυριτίου και μετέπειτα συνυδριτής του τεχνολογικού κολοσσού της Intel, σε μια συνέντευξη του στο περιοδικό “Electronics Magazine” τον Απρίλιο του 1965, δίνει το στίγμα της καλπάζουσας εποχής: Εκτιμά, πως οι διαστάσεις των τρανζίστορ θα υποδιπλασιάζονται κάθε χρόνο για την επόμενη δεκαετία^[6]. Το 1975, επικαιροποιώντας την αρχική του δήλωση, προβλέπει πως οι διαστάσεις των τρανζίστορ θα υποδιπλασιάζονται κάθε 2 χρόνια και όχι κάθε χρόνο, όπως είχε δηλώσει μια δεκαετία πριν. Εκτίμηση, που πέρα από προσωπική του πεποίθηση, αποτέλεσε και στρατηγικό πλαίσιο ανάπτυξης της τεχνολογίας των ημιαγωγών από τη δεκαετία του 70 έως και σήμερα.

Το εθνικό πλαίσιο ανάπτυξης της τεχνολογίας των ημιαγωγών, θεσμίστηκε αρχικά στις αρχές της δεκαετίας του '90 ως “Εθνικός Τεχνολογικός Χάρτης για τους Ημιαγωγούς” (National Technology Roadmap for Semiconductors) και λίγα χρόνια αργότερα, απέκτησε υπερεθνικά χαρακτηριστικά με τη θέσμιση του “Διεθνούς Τεχνολογικού Χάρτη για τους Ημιαγωγούς” (International Technology Roadmap for Semiconductors)^[7].

Αυτή η διακύρηξη, ορμώμενη από το “Νόμο του Moore” ορίζει το πλαίσιο κατασκευής, το πεδίο εξέλιξης των τεχνολογιών της (μικρο)ηλεκτρονικής, οριοθετώντας τις διαστάσεις ανάπτυξης, τα υλικά κατασκευής και τις αρχιτεκτονικές του παρόντος και μέλλοντος.



Εικόνα 1: Η χρονική εξέλιξη συναρτήσει του πλήθους των τρανζίστορ σε ένα chip.



Εικόνα 2: Η χρονική εξέλιξη συναρτήσει των διαστάσεων (μήκος καναλιού) σε ένα τρανζίστορ.

Με βάση τις παραπάνω στρατηγικές επιδιώξεις, ανεμόνονταν το πέρασμα στον τεχνολογικό κόμβο των 10 nm, το 2017, με ορίζοντα στα 7 nm το 2019, και στα 5 nm το 2021. Ήδη, τον 'Αυγουστο του 2016, η Intel ανακοίνωσε τη δοκιμαστική παραγωγή στα 10 nm, και στις 17 Οκτωβρίου του 2016, η Samsung, ανακοίνωσε επίσημα τη μαζική παραγωγή διατάξεων στον κόμβο των 10 nm. Και επίσημα λοιπόν, τα συστήματα μεταβαίνουν σε κβαντικές διαστάσεις.

Πέρα από τις ανακοινώσεις και τις συνεπείς μεταβάσεις στους εξελιγμένους τεχνολογικούς κόμβους, σύσσωμος ο κλάδος της μικροηλεκτρονικής, έχει δρομολογήσει την αναζήτηση

εναλλακτικών τεχνολογιών, καθώς τα επόμενα χρόνια θα κληθεί να αντιμετωπίσει το τέλος του “Νόμου του Moore”, φτάνοντας στην κρίσιμη διάσταση των 5nm.

Το πέρασμα σε κβαντικές και ατομικές διαστάσεις, μπορεί να δημιουργεί προϋποθέσεις για μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, αλλά δε μπορεί να ξεπεράσει θεμελιώδεις θεωρητικές και τεχνικές αρχές που διέπουν την αρχή λειτουργίας και τις διεργασίες κατασκευής νανοσυστημάτων.

Στο θεωρητικό τους σκέλος, είναι σαφές ότι ένας διακόπτης όπως είναι ένα τρανζίστορ τύπου MOSFET (ή nMOSFET είτε pMOSFET), του οποίου η απόσταση (L) μεταξύ πηγής (source) και απαγωγού (drain), περιορίζεται στα 2-3 nm, είναι πολύ δύσκολο κβαντικά, να προσδιοριστεί και να διαχωριστεί η κατάσταση λειτουργίας του^[15]. Με άλλα λόγια, με βάση την ισχύουσα αρχιτεκτονική, ένας ενδεχόμενος κόμβος κάτω των 5 nm, διέρχεται σε διαστασιολογικά εύρη που προκαλούν φαινόμενα σήραγγος και κβαντικές αβεβαιότητες, με αποτέλεσμα, να μη μπορεί να λειτουργήσει ως διακόπτης με διακριτές καταστάσεις.

Αλλά και στο τεχνικό σκέλος, τα προβλήματα είναι εξαιρετικά περίπλοκα και υπονομευτικά για περαιτέρω σμίκρυνση. Μεταξύ άλλων, το πέρασμα σε αυτές τις διαστάσεις, προκαλεί αδυναμία ανάπτυξης κυκλωμάτων με βάση τις ισχύουσες, δοκιμασμένες, τεχνικές φωτολιθογραφίας που εξελίχθηκαν συμβάλλοντας στη σμίκρυνση των διαστάσεων των τρανζίστορ. Ακόμη όμως κι' αν κι' αυτή η παράμετρος επιλύονταν, ο περιορισμός των διαστάσεων έχει ως σημείο αναφοράς το κανάλι, ωστόσο αφορά όλη τη διάταξη. Κατά συνέπεια, όλες οι διαστάσεις όπως το πάχος του οξειδίου (X_{ox}), το πλάτος του τρανζίστορ (W), το βάθος επαφής (X_j), πρέπει να περιορίζονται με αντίστοιχη αναλογία. Αν λόγω χάρη, το πάχος του οξειδίου πύλης (που συνήθως είναι SiO_2) ξεπεράσει τα 1,2 nm (τρέχουσα διάσταση), και εισέλθει σε ατομικές διαστάσεις, τότε δε θα μπορεί να λειτουργήσει ως διηλεκτρικό και το τρανζίστορ θα βραχυκυκλώνει^[16].

Επιπρόσθετα, επειδή η τάση αλληλεπιδρά με τους παράγοντες σμίκρυνσης, είναι εύλογο πως ο περιορισμός των διαστάσεων, θα σηματοδοτήσει και περιορισμό της τάσης κατωφλίου. Κάτι τέτοιο, ενισχύει την ασάφεια της λειτουργίας του τρανζίστορ από τη θέση ON στην OFF, επομένως προκαλεί αστάθεια στο σύστημα. Τέλος, η διαρκής συσσώρευση όλο και πολυπληθέστερων (της τάξης των δισεκατομμυρίων) ηλεκτρονικών διατάξεων σε κάθε chip με βάση τη συμβατική αρχιτεκτονική της επίπεδης ολοκλήρωσης, προκαλεί ζητήματα υπερθέρμανσης των κυκλωμάτων. Με δεδομένη την ανάπτυξη του διαδικτύου, τη μεταστοφή προς τη διάχυτη ανταλλαγή τεράστιου όγκου δεδομένων (μεγάλης υπολογιστικής ισχύος) μεταξύ εκατομμυρίων χρηστών, η ψύξη των κυκλωμάτων είναι αναπόσπαστο κομμάτι της σωστής λειτουργίας των ηλεκτρονικών διατάξεων.

Είναι προφανές λοιπόν, ότι η τεχνολογία των ημιαγωγών, έτσι όπως είχε αναπτυχθεί τα τελευταία 60 χρόνια, φτάνει στο τέλος της. Αυτός είναι και ο λόγος που την τελευταία 15ετία, αναζητούνται ολοένα και πιο έντονα, εναλλακτικές επιλογές, ώστε να καλύψουν τη διαρκώς αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ.

Μακροπρόθεσμα, οι σκέψεις και τα βλέμματα των σχεδιαστών στρέφονται σε ολοκληρωτικές αλλαγές αποσυνδεδεμένες σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογία του πυριτίου. Το εξωτικό, ανεξερεύνητο πεδίο των κβαντικών υπολογιστών, εμφανίζεται ξανά στο προσκήνιο, από πολλούς ως μονόδρομος, με την IBM (Μάιος 2016) να ανακοινώνει την ελεύθερη πρόσβαση μέσω διαδικτύου στον online, 5-qubit, κβαντικό της επεξεργαστή. Οι προσδοκίες της IBM, στοχεύουν στην ανάπτυξη επεξεργαστών με 50-100 qubits για την επόμενη δεκαετία και ορίζοντα ανάπτυξης υπερυπολογιστών ("universal" quantum computers), με ισχύ 100.000 qubits.

Βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, αναζητούνται εναλλακτικές τεχνικές βελτιστοποίησης των δομών που έχουν αναπτυχθεί με βάση τις δοκιμασμένες τεχνολογίες πυριτίου. Διεξάγεται έρευνα σε επίπεδα αντικατάστασης υλικών, ανάπτυξης εναλλακτικών αρχιτεκτονικών κατασκευής τρανζίστορ και βελτιστοποίησης της λειτουργίας των υπάρχουσων διατάξεων.

Στο κομμάτι της αντικατάστασης υλικών, εξετάζεται η αντικατάσταση του SiO₂ ως οξειδίου πύλης, καθώς όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, δεν μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά ως οξείδιο διαχωριστικό διηλεκτρικό για πάχη κάτω του 1nm. Έτσι, αναζητήθηκαν και αναπτύχθηκαν άλλα υλικά (high-k materials)^[19] με βάση είτε πολυμερή είτε σύνθετους ημιαγωγούς τύπου GaAs, GaAlAs, η ακόμη και ενώσεις Γερμανίου. Το Γερμάνιο, έρχεται ξανά στο προσκήνιο της επιστημονικής κοινότητας και διερευνάται η χρήση του ως διηλεκτρικού πύλης, αλλά και όχι μόνο. Μέχρι πριν λίγα χρόνια, (παρόλο που έχει μικρότερο ενεργειακό χάσμα και καλύτερη ευκινησία από το πυρίτιο) είχε εκτοπιστεί ερευνητικά και βιομηχανικά από υλικό μαζικής κατασκευής τρανζίστορ, λόγω του ασταθούς οξειδίου πύλης του (σε αντίθεση με αυτό του πυριτίου), του υψηλότερου κόστους διάθεσης του και της κακής μηχανικής του συμπεριφοράς.

Όσον αφορά το πεδίο της ανάπτυξης εναλλακτικών - αλλά έμμεσα σχετιζόμενων με το πυρίτιο - αρχιτεκτονικών, παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα, με εξαιρετικά μεγάλο διεπιστημονικό εύρος. Η πιο οικεία αρχιτεκτονική αφορά την ανάπτυξη “Ultra Thin Body Silicon On Insulator”, στο οποίο αναπτύσσεται ένα layer SiO₂ ακριβώς κάτω από τις επαφές, ώστε να περιορίζει τα ρεύματα διαρροής στην κλειστή κατάσταση. Μελετάται επίσης η ανάπτυξη κατακόρυφων διατάξεων FinFET, αλλά και η ανάπτυξη αρχιτεκτονικών FET από νανοσωλήνες πυριτίου ή άνθρακα. Προς το παρόν, οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο αν και είναι εξαιρετικά δημοφιλή υλικά στους ερευνητικούς κύκλους, δεν έχουν ανταποκριθεί απόλυτα στις προσδοκίες των ερευνητών της μικροηλεκτρονικής για αντικατάσταση των τεχνολογιών πυριτίου^[16].

Με δεδομένο πάντως τον κορεσμό της υπολογιστικής ισχύος, πολλοί ερευνητές επιχειρούν έναν περισσότερο ολιστικό σχεδιασμό: Στην πεπερασμένη και κορεσμένη υπολογιστική ισχύ, προωθούν την ανάπτυξη συστημάτων με μεγαλύτερες μνήμες ώστε να μην απαιτείται διαρκής υπολογισμός, αλλά ανάκληση δεδομένων, το σύνολο των πράξεων δηλαδή να εντάσσεται σε ένα

πλαίσιο διευρυμένης μνήμης. Τον τελευταίο καιρό, το ερευνητικό ενδιαφέρον στρέφεται σε μια ξεχασμένη διάταξη, το memristor, με την Η.Ρ. να καταλαμβάνει εξαρχής αυτό το ανεξερεύνητο εναλλακτικό πεδίο. Ακόμη και η συμπεριφορά έμβιων οργανισμών, όντων που πραγματοποιούν στο ακέραιο τις λειτουργίες τους με την ελάχιστη κατανάλωση, έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον διεπιστημονικών ομάδων αποτελούμενων από μηχανικούς, βιολόγους, νευροεπιστήμονες, ώστε να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά των οργανισμών και να υιοθετηθεί μια διαφορετική προσέγγιση λειτουργίας των ηλεκτρονικών διατάξεων.

Στο κομμάτι της βελτιστοποίησης των υπάρχουσών τεχνικών, οι τεχνολογικοί κολοσσοί τα τελευταία χρόνια έχουν στραφεί στην ανάπτυξη παράλληλων πολλαπλών πυρήνων που λειτουργούν ενισχυτικά ικανοποιώντας τις διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Ανεξάρτητα από την ανάπτυξη πολλών παραλλήλων κέντρων λειτουργίας, διερευνάται και η εκμετάλλευση στο έπακρο των τεχνολογιών πυριτίου, με τεχνολογίες θερμικής κατεργασίας με έμφαση στη βελτίωση του προφίλ των περιοχών εμφύτευσης. Έτσι, σε αυτό το πεδίο έρευνας, μελετώνται θεωρητικά και πειραματικά οι μηχανισμοί ενεργοποίησης των προσμείξεων, οι μηχανισμοί περιορισμού των φαινομένων διάχυσης που προκαλούνται εξ' αιτίας της εισαγωγής προσμείξεων, στην κατεύθυνση της δημιουργίας πιο αγώγιμων “μονοπατιών”. Σε αυτόν τον προσανατολισμό κινείται και το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας, επιχειρώντας να διερευνήσει τη θερμική επίδραση μονοχρωματικής ακτινοβολίας laser σε ημιαγωγούς πυριτίου σε καθεστώς μη τήξης.

Σχετικά με τη θερμική ανόπτηση ημιαγωγών

Η θερμική κατεργασία των υλικών, είναι ένα σύνολο απο διεργασίες που περιλαμβάνουν τη θέρμανση και τη ψύξη του υλικού σε στερεά κατάσταση και σε καθορισμένες θερμοκρασιακές και χρονικές συνθήκες. Είναι λοιπόν, καθοριστικής σημασίας η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, ο ρυθμός ανάπτυξής της, ο χρόνος παραμονής σ' αυτήν και ο χρόνος ψύξης.

Η θερμική ανόπτηση, εντάσσεται στα φαινόμενα θερμικής διεργασίας των υλικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανόπτηση δεν είναι άποτοκο του κλάδου της μικροηλεκτρονικής, αλλά αντλεί τη θεμελίωση της απο τη μεταλλουργία, με την οποία διερευνήθηκε και εξελίχθηκε εμπειρικά για χιλιάδες χρόνια. Εργαλεία, όπλα και μεταλλικά αντικείμενα βαριάς χρήσης, υπόκειντο θερμική ανόπτηση προκειμένου να αποκτήσουν ενισχυμένη παραμόρφωση και κατά συνέπεια, αντοχή στη θραύση. Ο κλάδος της μεταλλουργίας έχει μελετήσει και έχει κατατάξει την θερμική ανόπτηση σε διάφορες υποκατηγορίες (ανόπτηση κατεργασίας, ανακρυστάλλωσης, πλήρης, αποκατάστασης, σφαιροποίησης, κλπ). Στα μεταλλικά υλικά, η θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης πραγματοποιείται κατά προσέγγιση στο $T_m/3$, όπου T_m , η θερμοκρασία τήξης του υλικού. Οι διαδικασίες πραγματοποιούνται με χρήση ειδικών κλιβάνων (οι οποίοι εξελίσσονται και αυτοί με τα χρόνια) και συνήθως με τη χρήση αναγωγικού (H_2 , CO) αερίου, εμποδίζεται η ανάπτυξη οξειδωσης στην επιφάνεια.

Κοινός παρονομαστής όλων των παραπάνω φαινομένων που σχετίζονται με την ανόπτηση στα διάφορα υλικά, είναι η θερμική επίδραση που προκαλούν στις κρυσταλλικές δομές. Οι κρυσταλλικές δομές αναδιοργανώνονται και περιορίζονται αρκετά οι κρυσταλλικές ατέλειες που είχαν αναπτυχθεί στα προηγούμενα στάδια της κατασκευής του υλικού.

Λόγω αυτής της ιδιότητας, η διαδικασία υιοθετήθηκε και στους κύκλους της μικροηλεκτρονικής, ώστε να περιοριστούν οι κρυσταλλικές ατέλειες που αναπτύσσονταν λόγω της εμφύτευσης προσμείξεων. Από τη δεκαετία του '60 και μετά, οι κλίβανοι ανόπτησης φιλοξενούσαν για πολλά χρόνια και ημιαγωγούς ποιοτικοποιώντας διαρκώς τα προφίλ ανόπτησης, ωστόσο η βραδεία θέρμανση των wafer επέφερε εκτεταμένα φαινόμενα διάχυσης των προσμείξεων. Στην περίπτωση διαρκούς σμίκρυνσης των διαστάσεων, όπου τα επιτρεπόμενα μήκη διάχυσης δεν μπορούν να ξεπερνάνε τα 2-3 nm, η ανόπτηση σε κλιβάνους, ήταν ανέφικτη. Αυτός ήταν και ο λόγος που μελετήθηκαν άλλες τεχνικές ταχείας θερμικής ανόπτησης, όπως η χρήση λαμπτήρων Xe, ο οποίοι ακτινοβολούν στιγμιαία την επιφάνεια ενός wafer πυριτίου σε χρόνους δευτερολέπτου, η δεκάτων του δευτερολέπτου. Αν και η τεχνική ταχείας θερμικής ανόπτησης ήταν περισσότερο αποδοτική σε σχέση με αυτήν των κλιβάνων, αφού προσέφερε μικρότερη διάχυση των προσμείξεων (αλλά δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις σύγχρονες χωρικά περιορισμένες απαιτήσεις),

υστερούσε στην ομοιομορφία της (καθώς το προφίλ θέρμανσης συγκεντρώνονταν γύρω από τη λάμπα ακτινοβολίας), στην παραλληλία της (καθώς λειτουργούσε σειριακά) και προκαλούσε θερμικά φαινόμενα με μηχανικές μικρορωγμές στην επιφάνεια και στα ρηγά της βάθης.

Ανακαλώντας την ημιεμπειρική εκδοχή του δεύτερου νόμου του Fick για τη διάχυση της ακτινοβολίας, το μήκος διάχυσης δίνεται από τον τύπο : $L = \sqrt{Dt}$, όπου D, ο συντελεστής διάχυσης και t, ο χρόνος ακτινοβολίας. Το μήκος διάχυσης δηλαδή, έχει άμεση σχέση με το χρόνο ακτινοβολίας.

Με λίγα λόγια, αναζητούνταν τεχνικές υπερταχείας, συγκεντρωμένης, ομοιόμορφης, υψηλής θέρμανσης, προκειμένου να προκληθεί ενεργοποίηση των προσμείξεων με ταυτόχρονο περιορισμό των φαινομένων διάχυσης.

Η διάταξη που θα μπορούσε να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις, είναι μια διάταξη παλμικού laser.

Σχετικά με τα laser, τις ιδιότητες και την αλληλεπίδραση τους με την ύλη

Σε παράλληλο χρόνο με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των τρανζίστορ, την πρώτη διατύπωση του “Νόμου του Moore” και όλα όσα περιγράφησαν παραπάνω, τα laser, εμφανίζονται στο προσκήνιο.

Τεχνολογική εξέλιξη των M.A.S.E.R. (που εξέπεμπαν μονοχρωματικά στα μικροκύματα), ανακάλυψη που αποδόθηκε στον Mainman, αλλά προσεγγίστηκαν θεωρητικά απο τη διατύπωση περί “εξαναγκασμένης εκπομπής” του Einstein το 1917^{[3],[4]}, συμπυκνώνουν απόλυτα τις ιδιότητές τους στο αρκτικόλεξο τους: **“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”** ή στα ελληνικά, **“Ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας”**.

Τα laser, εκμεταλλεζόμενα τις ιδιότητες της μονοχρωματικότητας (αφού αποδίδουν ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος στην ακτινοβολή τους), της κατευθυντικότητας (η δέσμη μπορεί να κατευθυνθεί μέχρι και σε αστρικές αποστάσεις με κάποιες περιθλαστικές βέβαια αποκλίσεις), της λαμπρότητας (καθώς ένα εργαστηριακό λέιζερ He-Ne, μπορεί να έχει περισσότερο απο 100 φορές μεγαλύτερη τιμή λαμπρότητας από τον ήλιο), της χωρικής και χρονικής συμφωνίας, αλλά και της εξαιρετικά μικρής διάρκειας παλμού που μπορούν να επιτύχουν (ms, μs, ns, ps, fs, as) έχουν βρεί πεδίο εφαρμογών σε ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα της σύγχρονης τεχνολογίας^[5]. Χρησιμοποιούνται στον κλάδο της κατεργασίας των υλικών (κοπή, συγκόλληση, διάτρηση, εγχάραξη, καθαρισμός επιφάνειας, εκτύπωση 3-D), στις τηλεπικοινωνίες, στην ιατρική, στη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στην αστροφυσική, στις τεχνολογίες πολέμου, στην φασματοσκοπία και φυσικά, στη μικροηλεκτρονική^{[3],[17]}.

Στο κλάδο της μικροηλεκτρονικής, τις προηγούμενες δεκαετίες, χρησιμοποιήθηκαν για τη διάνοιξη καναλιών ένωσης “blind” και “via holes”, σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων. Πολλά απο τα λέιζερ που αναπτύχθηκαν τις προηγούμενες δεκαετίες, ανακαλύφθηκαν και πρωτοχρησιμοποιήθηκαν σε εργαστήρια ηλεκτρονικής όπως η Bell, η IBM, κλπ. Έχει αναπτυχθεί δηλαδή μια οργανική, πολυεπίπεδη σχέση μεταξύ της τεχνολογίας των ημιαγωγών και της τεχνολογίας των λέιζερ.

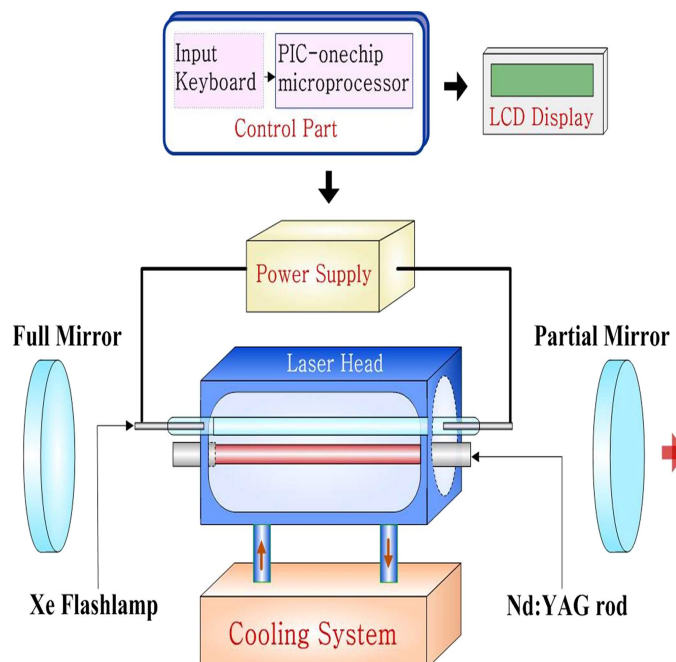
Τα λέιζερ που έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια, καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, απο τα μήκη κύματος των ακτίνων X, έως τα μικροκύματα^[9]. Μερικά “δημοφιλή” laser με μήκη κύματος στο υπεριώδες είναι τα Excimer laser (π.χ. KrF), στο ορατό και εγγύς υπέρυθρο τα κρυσταλλικά λέιζερ (π.χ. Ruby, Ti: Sapphire, Alexandrite, Nd: YAG και διάφορα άλλα YAG), ενώ στο βαθύ υπέρυθρο ξεχωρίζει το CO₂ laser στα 10,6 μm.

Τα λέιζερ που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής εργασίας, ήταν ένα laser Nd:YAG στα 1064 nm και ένα παλμικό TEA laser CO₂, στα 10,6 μm.

Σχετικά με τα laser Nd:YAG

Τα laser Nd: YAG, ανήκουν στη κατηγορία των laser μονωτών με προσμείξεις, ή των κρυσταλλικών laser. Το ενεργό του υλικό είναι το Αργιλικό Ύτριο $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), το οποίο έχει ντοπαρισθεί με προσμείξεις Νεοδυμίου Nd^{+3} . Το Νεοδύμιο είναι μια σπάνια γαία, η οποία φέρει έντονη μαγνήτιση. Οι ενεργειακές μεταβάσεις που πραγματοποιούνται είναι πολυεπίπεδες αλλά η πιο έντονη προκαλείται στα 1064 nm.

Ο κρύσταλλος Nd: YAG, για να εκπέμψει μορφοποιείται ως ράβδος, τοποθετείται σε μια ελλειπτική κοιλότητα. Σ' αυτήν την οπτική κοιλότητα, παράλληλα με τη ράβδο του κρυστάλλου, τοποθετείται ένας σωλήνας έκλαμψης στοιχιζόμενος ομοιόμορφα με τη γεωμετρία της ράβδου, ώστε να παράξει ομοιόμορφη έκλαμψη. Η έκλαμψη προκαλείται ως αποτέλεσμα εκφόρτισης μιας συστοιχίας πυκνωτών, που φορτίζονται με τάση περίπου 20 KV. Στα άκρα της κοιλότητας, βρίσκονται τα 2 κάτοπτρα του αντηχείου, τα οποία είναι επαργυρωμένα και έχουν ανακλαστικότητα 100 % το οπίσθιο και 90% το εμπρόσθιο, από το οποίο εξέρχεται η δέσμη. Λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στον κρύσταλλο και στην κοιλότητα, η διάταξη ψύχεται μέσω ολοκληρωμένου συστήματος υδρόψυξης^{[3],[17]}.



Εικόνα 3: Ενδεικτική διάταξη Nd:YAG laser. Διακρίνεται ο κρύσταλλος, η συστοιχία flash, το οπτικό αντηχείο, το σύστημα ψύξης και η μονάδα τροφοδοσίας.

Σχετικά με τα laser CO₂

Το CO₂ laser, ανήκει στα Μοριακά laser. Ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα, αποτελείται από ένα άτομο Άνθρακα και δύο άτομα Οξυγόνου. Το μόριο διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να ταλαντώνεται και να περιστρέφεται και τα ενεργειακά επίπεδα της ταλάντωσης προκαλούν παραγωγή μήκους κύματος στο υπέρυθρο. Στα laser διοξειδίου του άνθρακα, αναμειγνύονται τα αέρια Ήλιο, Άζωτο και φυσικά CO₂, σε σταθερή αναλογία παροχής μέσα σε ένα θάλαμο. Στο θάλαμο, με τη σύνδεση με άνοδο και κάθοδο, παράγεται μια ηλεκτρική εκκένωση 20 KV περίπου, ικανή να δημιουργήσει αντιστροφή πληθυσμών και να προκαλέσει εκπομπή ακτινοβολίας όπως περιγράφηκε.

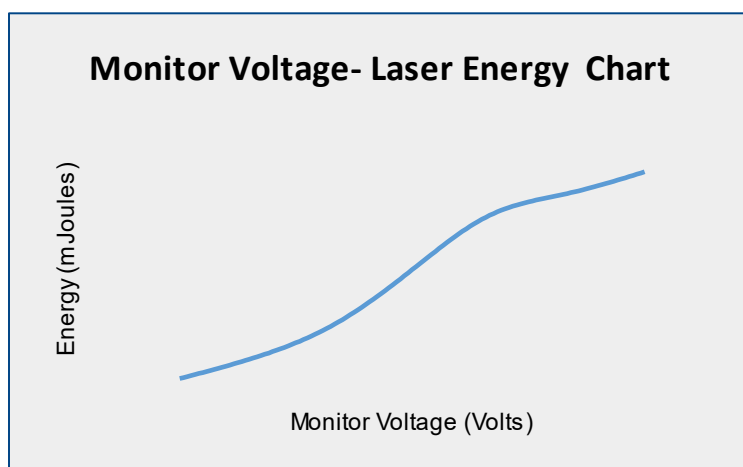
Αξίζει να σημειωθεί ότι το laser διοξειδίου του άνθρακα, είναι από τα πιο αποδοτικά laser καθώς μπορεί να επιτύχει απόδοση μέχρι 25%. Λόγω αυτού του πλεονεκτήματος, μπορεί να λάβει μεγάλες τιμές εξόδου, γι αυτό και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη έξοδος. Συναντώνται σε σφραγισμένες διατάξεις, ροής αερίων, δυναμικής αερίων και TEA^[17]. Τα τελευταία, προκαλούν ηλεκτρικές εκκενώσεις κάθετα στο μήκος του σωλήνα με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ μεγάλες τιμές ισχύος^[3].

Πειραματικό Μέρος

Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser

Ο πρώτος κύκλος της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με τους ημιαγωγούς αφορούσε ακτινοβολήση με παλμούς Nd:YAG laser στα 1064 nm (πρώτη αρμονική). Το πείραμα εκτελέστηκε στο εργαστήριο “Οπτοηλεκτρονικής , Laser και Εφαρμογών τους” στον Τομέα Φυσικής Ε.Μ.Π. Το laser που χρησιμοποιήθηκε, έφερε την εμπορική ονομασία “Nano-L-200-10” της “Litron Lasers”, εξέπεμπε στα 1064 nm, με διάρκεια παλμού στα 6 nsec και μέγιστη ενέργεια εξόδου τα 160 mJ. Το προφίλ της δέσμης του, αντιστοιχούσε σε μονορυθμική γκαουσιανή TEM₀₀. Η τάση λειτουργίας του monitor εξόδου είναι μεταβαλλόμενη με εύρος από 700 – 1000 Volts και με τη βοήθεια του ενεργόμετρου “Gentec” (1 Joule αντιστοιχούσε σε 6 Volt), προσδιορίστηκε η χαρακτηριστική του καμπύλη, $E=f(V)$.

Monitor Voltage (Volts)	Gentec Output (mVolts)	Energy output (mJoules)
700	50	8,3
750	150	25
800	300	50
850	550	91,6
900	800	133,3
950	900	150
1000	1000	166,6



Εικόνα 4: Χαρακτηριστική Τάσης εξόδου - Ενέργειας παλμού για το Nd:YAG laser.

Η διάταξη περιελάμβανε έναν πακτωμένο βραχίονα X-Y κίνησης για το δείγμα, ένα συγκεντρωτικό φακό εστιακής απόστασης 20 cm και φυσικά την κεφαλή του laser, η οποία παρήγαγε τους παλμούς και κατευθύνονταν μέσα απο το φακό στο δείγμα-στόχο. Η διάταξη είχε ευθυγραμμιστεί με τη βοήθεια ενός τροchioδεικτικού He-Ne laser, τοποθετημένου αντίθετα απο την κεφαλή του Nd:YAG laser.



Εικόνα 5: Αναπαράσταση της διάταξης ακτινοβολήσης. Διακρίνεται η βάση στήριξης του δείγματος, ο φακός και η κεφαλή του laser.

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζονται κάποια απο τα βασικά μέρη της διάταξης:



Εικόνα 7: Η κεφαλή του "Litron Nano L", Nd: YAG laser.



Εικόνα 6: Συγκλίνων φακός διάταξης.



Εικόνα 8: Το τροφοδοτικό και ψυκτικό σύστημα της διάταξης.



Εικόνα 9: Η κονσόλα ελέγχου του laser.

Επελέγησαν 4 διακριτές θέσεις ακτινοβολήσης: Η θέση εστίασης της δέσμης, η θέση των 4 cm αφεστίασης, η θέση των 8 cm αφεστίασης και τέλος η θέση των 12 cm αφεστίασης. Για την κάθε θέση και για το σύνολο των τιμών του monitor εξόδου (700-1000 Volt, με βήμα 50 Volt), προσδιορίστηκαν οι τιμές ενέργειας. Οι ακτινοβολήσεις, πραγματοποιήθηκαν με χρήση ειδικών προστατευτικών γυαλιών για το συγκεκριμένο μήκος κύματος.

Σχεδόν όλα τα δείγματα παραχωρήθηκαν από την ερευνητική ομάδα “Ηλεκτρονικής Φυσικής και Μικροηλεκτρονικής”, του Τομέα Φυσικής, Ε.Μ.Π. Ακτινοβολήθηκε ένα μεγάλο πλήθος δειγμάτων, που περιελάμβανε wafer από καθαρό γερμάνιο, wafer πυριτίου με SiO_2 στην επιφάνεια του και κυρίως, ντοπαρισμένο με Βόριο, wafer πυριτίου^{[1],[2]}.

Το τελευταίο, σ' αυτήν την εργασία, θα αναφέρεται ως “38N”. Φέρει βάθος επαφής μόλις τα 13 nm, θεωρητική δόση εμφύτευσης $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, πραγματική δόση $5.41 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Τέλος, η ενέργεια εμφύτευσης της πρόσμειξης, είχε τιμή 0,4 keV.

Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο δείγμα, ώστε να δώσει συγκρίσιμες τιμές, καθώς έχει μελετηθεί διεξοδικά στο παρελθόν, στα πλαίσια των διδακτορικών διατριβών των Δρ. Φλωράκη και Δρ. Σταθοπούλου^{[1],[2]}. Τα δείγματα που - σε σημεία τους - δεν παρατηρήθηκε οφθαλμοφανής αποδόμηση, παρατίθενται στην καταγραφή που ακολουθεί:



Εικόνα 10: Τα ακτινοβολημένα δείγματα "38N", με σημειακά πιθανές ανοπηθείσες περιοχές.

Για το Δείγμα 1: Αφορά την εστία. Όλες οι περιοχές έχουν υποστεί τήξη και αποδόμηση. Εξαιρείται η ακτινοβολήση με **ενέργεια 8,3 mJ**.

Για το Δείγμα 2: Αφορά αφεστίαση στα 8 cm. Δεν παρατηρήθηκε οφθαλμοφανής τήξη.

Για το δείγμα 3: Αφορά αφεστίαση στα 12 cm. Περιλαμβάνει 1 παλμό με ενέργεια 166.6 mJ και σε άλλο σημείο 10 συνεχόμενους παλμούς με την ίδια τιμη ενέργειας. Δεν παρατηρήθηκε οφθαλμοφανής τήξη.

Για το δείγμα 4: Αφορά αφεστίαση στα 4 cm. Οι παλμοί με ενεργειες 8,3 mJ, 25 mJ και 50 mJ, δεν εμφάνισαν αποδόμηση.

Για το δείγμα 5: Αφορά αφεστίαση στα 4 cm αλλά και στα 8 cm. Για την αφεστίαση στα 4 cm, δεν παρατηρήθηκε αποδόμηση για τις περιοχες που ειχαν ακτινοβοληθεί με 8,3 mJ, 25 mJ και 50 mJ αντιστοιχα. Για την αφεστίαση στα 8 cm, δεν παρατηρήθηκε οφθαλμοφανής τήξη σε καμία ακτινοβολήση.

Για το δείγμα 6: Αφορά αφεστίαση στα 12 cm. Ακτινοβολήθηκε σημείο με ενεργεια 166.6 mJ με 1 παλμό, άλλο σημείο με 10 παλμούς και άλλο σημείο με 20 παλμούς. Δεν παρατηρήθηκε οφθαλμοφανής αποδόμηση.

Ακτινοβολήση με TEA: CO₂ laser (χωρίς προθέρμανση)

Η ακτινοβολήση που εστιάζει ποσοτικά και ποιοτικά αυτή η εργασία, αφορά τη χρήση του CO₂ laser. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν το εργαστηριακό πρωτότυπο της ερευνητικής ομάδας “Οπτοηλεκτρονικής, laser και Εφαρμογών τους” , σε παλμική λειτουργία, με μήκος κύματος ακτινοβολίας τα 10,6 μm, διάρκεια παλμού τα 80 ns, 86 mJ σταθερή ενέργεια εξόδου (εκφρασμένη με το ίδιο “Gentec” ενεργόμετρο), με TEM₀₀ ως προφίλ δέσμης.

Ωστόσο, το προφίλ της δέσμης αλλά και η ενέργεια εξόδου, μεταβάλλονταν αρκετές φορές και χρειάστηκε χειροκίνητη, επανευθυγράμμιση των οπτικών αντηχείων μέχρι να σταθεροποιηθεί στα 86 mJ ως τιμή ενέργειας, με TEM₀₀ γκαουσιανό προφίλ δέσμης.

Η διάταξη του εργαστηριακού πρωτοτύπου CO₂ laser, καταγράφεται στις επόμενες λήψεις:



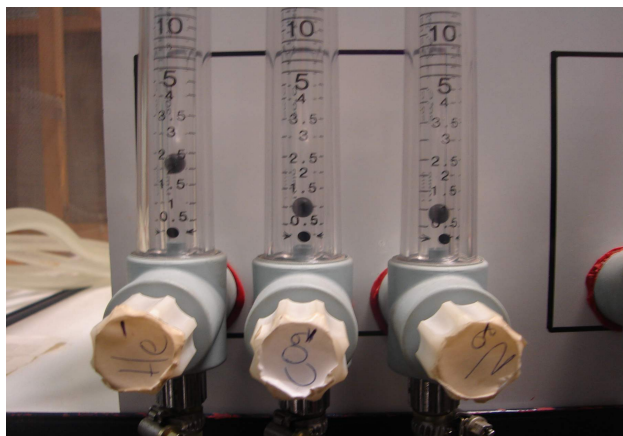
Εικόνα 11: Εργαστηριακό πρωτότυπο TEA: CO₂ laser.



Εικόνα 12: Η κεφαλή του laser (οπτική κοιλότητα, άνοδος-κάθοδος, αντηχεία).



Εικόνα 13: Τα αέρια παροχής (Ήλιο, Άζωτο, Διοξείδιο του Άνθρακα).



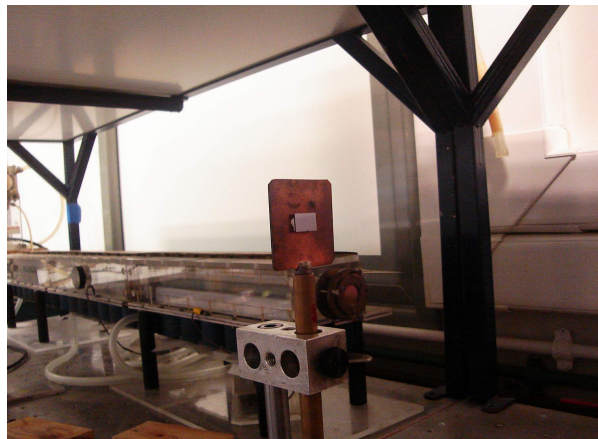
Εικόνα 15: Ο ρυθμιστής πίεσης των 3 αερίων.



Εικόνα 14: Η παλμογεννήτρια των 300 Volt (πάνω) και η πηγή των 20.000 V(κάτω).



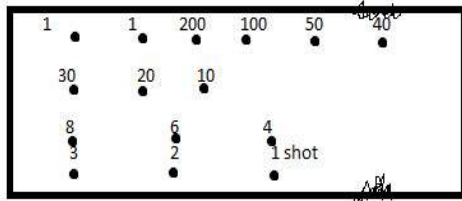
Εικόνα 17: Η δεύτερη πηγή των 50000 Volt.



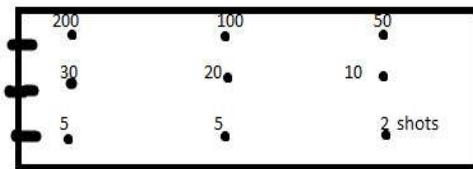
Εικόνα 16: Ο στόχος με το δείγμα τοποθετημένο.

Με δεδομένο ότι η διάταξη έχει σταθερή, μη μεταβαλλόμενη έξοδο, η πυκνότητα ενέργειας μεταβάλλονταν μέσω της αφεστίασης. Γι αυτόν το λόγο, επιλέχθηκαν 4 περιοχές θέσης, ώστε να διερευνηθούν οι μηχανισμοί αποδόμησης γι' αυτές τις περιοχές. Με την τήρηση των κανόνων ασφαλείας (γυαλιά προστασίας, μη ανακλαστικές επιφάνειες, κλπ), ακτινοβολήθηκαν πολλά δείγματα. Η πρώτη περιοχή αφορούσε την εστία της δέσμης. Η δεύτερη περιοχή, αφορούσε 2 cm αφεστίασης (77 mJ/mm^2). Η τρίτη περιοχή, αφορούσε τα 4 cm αφεστίασης (48 mJ/mm^2) και η τέταρτη περιοχή, αφορούσε τα 6 cm αφεστίασης (27 mJ/mm^2). Ακτινοβολήθηκαν πολλά δείγματα σε μεγάλο εύρος παλμών. Κάποια έφεραν εμφανή επιφανειακή αποδόμηση και κάποια όχι. Στο επόμενο κεφάλαιο (“μορφολογικός χαρακτηρισμός”), παρατίθενται κάποιες ενδεικτικές καταγραφές.

Τα δείγματα που ξεχώρισαν λόγω της μη εμφάνισης επιφανειακής τήξης^{[10],[11]}, ήταν 2:



Δείγμα 1. 4 εκατοστά αφεστίαση, χωρίς προθερμανση, το βήμα ήταν περίπου 4 mm οριζόντια, και 3 mm κατακόρυφα για τη δεύτερη γραμμή, και 2 mm κατακόρυφα για την τρίτη και τέταρτη γραμμή. μαρκαρίστηκε με ένα σπασίματακι πάνω και κάτω στη δεξιά μερριά του wafer.



Δείγμα 2. 6 εκατοστά αφεστίαση, χωρίς προθερμανση το βήμα ήταν περίπου 6 mm οριζόντια, και 4 mm κατακόρυφα για την δεύτερη γραμμή, και 3mm για την τρίτη γραμμή. Μαρκαρίστηκε με τρεις οριζόντιες γραμμές αριστερά του wafer.

Ακτινοβολήση με TEA: CO₂ laser (με προθέρμανση στους 400 °C)

Με δεδομένο ότι οι ερευνητικές δραστηριότητες θερμικής ανόπτησης από τους Δρ. Φλωράκη και Δρ. Σταθόπουλο, αφορούσαν ακτινοβολήσεις με ενίσχυση προθέρμανσης ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ενεργοποίηση των προσμείζων^{[2],[11]}, δρομολογήθηκε ένας νέος κύκλος πειραμάτων με τη χρήση θερμαντικής βάσης, ώστε να παρατηρηθούν καλύτερα οι μηχανισμοί θερμικής επίδρασης^[12].

Γι αυτόν το λόγο, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια θερμαντική βάση, στην οποία θα μπορούσε να τοποθετηθεί το δείγμα, να θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία και να ακτινοβοληθεί στιγμιαία από τη δέσμη.

Η βάση κατασκευάστηκε με τρόπο ώστε στις άκρες της να φέρει αναμονές, οι οποίες μπορούν να πακτώσουν κλίπς συγκράτησης του δείγματος. Τα ανοξείδωτα κλίπς ήταν ανθεκτικά στη θερμοκρασιακή καταπόνηση και συγκρατούσαν σταθερά το δείγμα πάνω στη θερμαντική βάση.

Στην πλάτη της θερμαντικής διάταξης, είχε ενσωματωθεί μια 2-axial βάση, ώστε να μετατοπίζεται το δείγμα κατακόρυφα και οριζόντια χωρίς να απαιτείται αποδέσμευση από το θερμαντήρα.



Εικόνα 18: Η διάταξη προθέρμανσης (αριστερά), ο φακός εστίασης, το laser και η θερμική κάμερα.



Εικόνα 20: Εμπρόσθια όψη θερμαντικής διάταξης. Διακρίνεται το κλίπ συγκράτησης και το δείγμα.

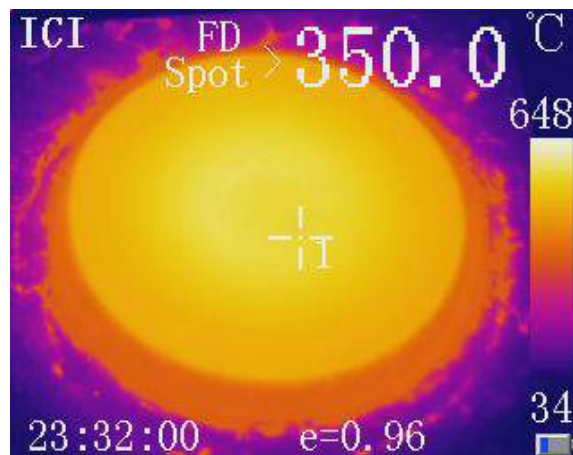


Εικόνα 19: Οπίσθια όψη θερμαντικής διάταξης. Διακρίνεται η 2-axial βάση της.

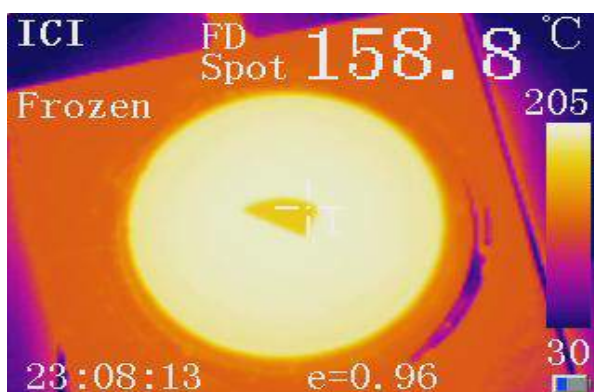
Για την παρατήρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του θερμαντήρα, αλλά και της επιφάνειας του δείγματος πυριτίου πάνω στο θερμαντήρα, χρησιμοποιήθηκε η θερμική κάμερα του εργαστηρίου. Η κάμερα έφερε την εμπορική ονομασία “ToughCam EL Scientific”, της εταιρίας ICI. Χάρη στη κάμερα, παρατηρήθηκε ότι η επιφάνεια του θερμαντήρα μπορεί να φτάσει μέχρι τους 650 °C όπου και στη συνέχεια σταθεροποιείται, ενώ αν εναποτεθεί πάνω της ένα δείγμα πυριτίου, τότε το δείγμα στην επιφάνεια του αγγίζει τους 400 °C όπου και σταθεροποιείται.



Εικόνα 22: Η θερμική κάμερα καταγραφής (ICI Toughcam EL S).

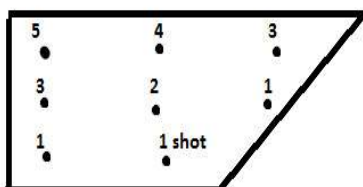


Εικόνα 21: Στιγμιότυπο της επιφάνειας θέρμανσης με τη χρήση της θερμοκάμερας.



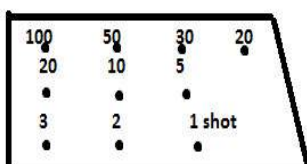
Εικόνα 23: Ενδεικτικό στιγμιότυπο επιφανειακής καταγραφής της θερμοκρασίας του δείγματος με τη βοήθεια της θερμοκάμερας.

Τα δείγματα στους 400 °C, φέραν ενισχυμένη απορροφησιμότητα και σε λίγους μόλις παλμούς, προκαλούνταν αποδόμηση. Τα δείγματα τα οποία ξεχώρισαν ήταν τα εξής :



Δείγμα 3. 4 εκατοστά αφεστιαση, ΜΕ προθερμανση 400C.

Το βημα ηταν περιπου 4 mm οριζοντια, και 3 mm κατακορυφα. Μαρκαριστηκε στη πισω μερια του, με το συμβολο "4 +".



Δείγμα 4. 6 εκατοστά αφεστιαση, ΜΕ προθερμανση ,400 C.

Το βημα ηταν περιπου 5 mm οριζοντια ,και 4 mm κατακορυφα για τη δευτερη σειρα ,και 3 mm κατακορυφα για τη τριτη σειρα. Μαρκαριστηκε στη πισω μερια του ,με το συμβολο "6+"

Και στις 2 περιπτώσεις, τόσο με προθέρμανση όσο και χωρίς προθέρμανση, υπήρχε πολύ μικρή διαθεσιμότητα δειγμάτων, γι αυτό έπρεπε να συγκεντρωθούν πολλές διαφορετικές ακτινοβολήσεις σε μια μικρή επιφάνεια του δείγματος. Παρόλα αυτά, αν και οι ακτινοβολήσεις απείχαν μεταξύ τους τουλάχιστον 3 mm ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των περιοχών, η αλληλοεπικάλυψη δε μπορούσε να αποκλειστεί ως ενδεχόμενο. Σε συνδιασμό με την έλλειψη τροχοδεικτικού laser και κυρίως την έλλειψη διαμαντιού τύπου “stylus” για την περιχαράκωση της ακτινοβοληθείσας επιφάνειας, προκαλούνταν ασάφεια σχετικά με την ακριβή θέση των διακριτών ακτινοβολήσεων.

Παρόλα αυτά, η έκβαση του εγχειρήματος θα κριθεί στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό.

Χημικός καθαρισμός δειγμάτων - Καθαρός Χώρος

Κρίνοντας ότι ο βαθύς μορφολογικός χαρακτηρισμός (SEM) είναι εξαιρετικά σημαντικός για τον καθορισμό της επιτυχίας του laser annealing σε ρηχές επαφές, μιάς που δίνει ευκρινή εικόνα σχετικά με την επιφανειακή τήξη που δεν είναι ορατή δια γυμνού οφθαλμού ή χρήση (οπτικού ή ψηφιακού) μικροσκοπίου, πρέπει να πραγματοποιηθεί ένας βαθύς καθαρισμός στην επιφάνεια των δειγμάτων, ώστε να αποβληθεί οποιαδήποτε εξωγενής ουσία που μπορεί να επιφέρει επιφανειακή αλλοίωση.

Όλες οι διεργασίες κατασκευής και φυσικά αυτές που θα περιγράφουν, διεξάγονται μέσα σε έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο, το “Clean Room”. Με δεδομένο ότι θα παρατηρηθούν μικροδομές σε ευαίσθητες (δι)επιφάνειες, είναι απαραίτητο να ληφθούν όλα τα αναγκαία μέτρα ώστε να ελαχιστοποιηθεί η αλληλεπίδραση των διατάξεων από εξωγενείς παράγοντες όπως η σκόνη, το φως του ήλιου, η υγρασία, τα οργανικά υπολείμματα, κλπ.

Έτσι, εφαρμόζεται ένα πρωτόκολλο λειτουργίας καθαρού χώρου, όπου ο συνολικός αριθμός σωματιδίων ανά μονάδα όγκου, η θερμοκρασία και η υγρασία ελέγχονται αυστηρά. Σε αυτό το πρωτόκολλο, περιλαμβάνεται ατομικός εξοπλισμός περιορισμού της σκόνης και του λίπους, με ποδιές, μάσκες, ποδονάρια, σκουφάκια, ηλεκτροστατικές επιφάνειες στα πατώματα, φίλτρα αέρα για την είσοδο αέρα στον χώρο, νερό που έχει απιονιστεί με τη μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης. Ο καθαρισμός των δειγμάτων με ειδικά καθαριστικά διαλύματα (συνηθέστερη μέθοδο την εφαρμογή του πρωτοκόλλου “RCA Cleaning” περιλαμβάνει μια διαδικασία επεξεργασίας των wafer με χρήση διαδοχικών χημικών διαλυμάτων) όπως λόγω χάρη η μέθοδος “piranha cleaning” σε διαμορφωμένους υποχώρους του καθαρού χώρου.

Για την τελευταία μέθοδο, αξίζει να αναφερθούν λίγα λόγια παραπάνω: Συγκεκριμένα το διάλυμα piranha, είναι συνήθως ένα διάλυμα θειικού οξέος και υπεροξειδίου του υδρογόνου (οξυζενέ), σε αναλογίες που ποικίλλουν (άλλοτε 3:1 άλλοτε 4:1 η και περισσότερο) που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό οργανικών υπολειμμάτων από τα wafer πυριτίου. Επειδή το μείγμα είναι ισχυρό οξειδωτικό, θα αφαιρέσει την περισσότερη οργανική ύλη και θα προσφέρει ρίζες υδροξυλίου στις επιφάνειες, μετατρέποντας τις σε εξαιρετικά υδρόφιλες.

Ταυτόχρονα, το διάλυμα piranha, εξαιτίας της όξινης και οξειδωτικής του φύσης, καθίσταται εξαιρετικά επικίνδυνο και εκρηκτικό, αφού η ανάμειξη των συστατικών του προκαλεί έντονα εξώθερμες αντιδράσεις (με θερμοκρασίες διαλύματος που φτάνουν έως και τους 120 °C). Συνεπώς, οποιαδήποτε χρήση η επεξεργασία του, πρέπει να υπακούει σε ένα αυστηρό πλαίσιο ασφαλείας, με χρήση ατομικού εξοπλισμού προφύλαξης, ισχυρών απορροφητήρων για την απορρόφηση των εκλυόμενων αερίων, ειδικού αποχετευτικού συστήματος για την απόρριψη των αποβλήτων,

γυάλινων δοχείων ανάμειξης έναντι πλαστικών (εξαιρουμένων των δοχείων απο teflon ή αντίστοιχων ανθεκτικών πολυμερών), ειδικής απόρριψης, κλπ.

Ο καθαρισμός των δειγμάτων με τη χρήση της μεθόδου “piranha” πραγματοποιήθηκε στον καθαρό χώρο του Τομέα Φυσικής, με βάση όλες τις προβλεπόμενες παραμέτρους.



Εικόνα 24: Χώρος χημικού καθαρισμού, clean room.

Αρχικά, τα δείγματα εμβαπτίστηκαν σε λουτρό υπερήχων, προκειμένου να απομακρυνθούν οι έντονες επικαθήσεις (λόγου χάρη, η κόλλα στερέωσης του δείγματος στο mount κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσης, ή τα ίχνη μπογιάς απο μαρκαδόρους επισήμανσης).

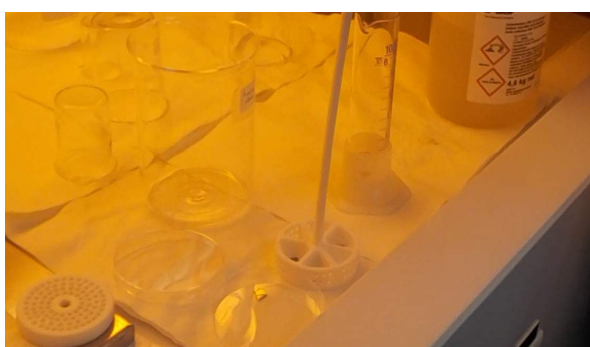
Για το λουτρό υπερήχων, χρησιμοποιήθηκαν 600ml περίπου ακετόνης, η οποία τοποθετείται σε ειδικό ανοξείδωτο δοχείο, το οποίο με τη σειρά του, εμβαπτίζεται μέσα στη συσκευή υπερήχων. Ο καθαρισμός, πραγματοποιείται σε περίπου ένα λεπτό απο την έναρξη της λειτουργίας της συσκευής υπερήχων. Ακολουθεί ο καθαρισμός με προπανόλη ώστε να απομακρυνθούν οι όποιες στάμπες. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ξέπλυμα με απιονισμένο νερό και χρήση πεπιεσμένου αερίου αζώτου, ώστε να απομακρυνθεί οποιοδήποτε ίχνος υγρασίας.

Στο επόμενο στάδιο, ο καθαρισμός με μέθοδο “piranha” όπως επισημάνθηκε, απαιτεί χρήση διπλών γαντιών, μάσκας με φίλτρα προστασίας από επικίνδυνα αέρια και ειδικών γυαλιών.

Δημιουργείται το διάλυμα (πρώτα τροφοδοτείται το υγρό θειικό οξύ και στη συνέχεια το



Εικόνα 25: Λεπτομέρεια χώρου καθαρισμού. Διακρίνονται τα δοχεία με το διάλυμα piranha, το ειδικό πιγκάλ και το χρονόμετρο.



Εικόνα 26: Τοποθέτηση των δειγμάτων στο διάτρητο πιγκάλ απο Teflon.

υπεροξειδίου του υδρογόνου) με αναλογία 1 προς 1 ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία του καθαρισμού και στη συνέχεια, τα δείγματα εμφαπίζονται με τη χρήση ειδικού πιγκάλ από τεφλόν, καθώς το τεφλόν δεν αντιδρά με το διάλυμα.

Μετά από 5 λεπτά εμβάπτισης, απομακρύνεται το πιγκάλ με τα δείγματα, όλα τα δοχεία αρχικά ξεπλένονται με απιονισμένο νερό και καθαρίζονται ξανά με πεπιεσμένο αέριο άζωτο πριν τοποθετηθούν στο δοχείο αποθήκευσης. Τα δείγματα πλέον είναι έτοιμα για μορφολογικό χαρακτηρισμό.

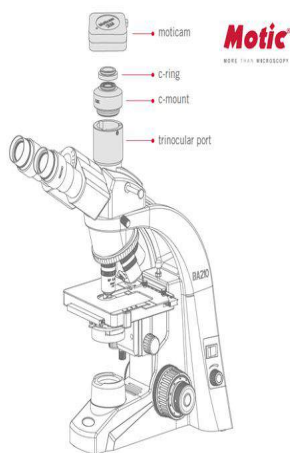
Μορφολογικός χαρακτηρισμός – Ψηφιακό μικροσκόπιο

Με την ολοκλήρωση των ακτινοβολήσεων, ένα μεγάλο πλήθος δειγμάτων, εξετάστηκε και χαρακτηρίστηκε μορφολογικά στην επιφάνειά του.

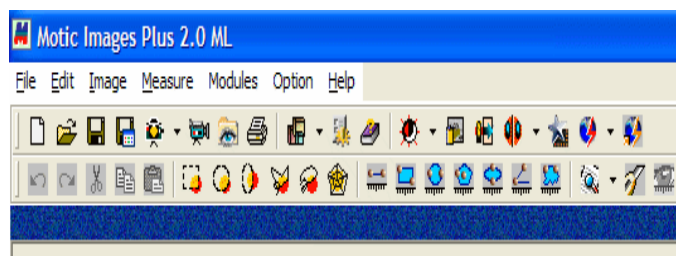
Τα δείγματα που είχαν οφθαλμοφανείς αποδομήσεις, εξετάστηκαν και χαρακτηρίστηκαν με τη χρήση του εργαστηριακού ψηφιακού μικροσκοπίου, ενώ τα δείγματα που δεν εμφάνιζαν ορατή αποδόμηση, εξετάστηκαν και χαρακτηρίστηκαν με χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM). Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει παρουσίαση της πρώτης μεθόδου.

Το ψηφιακό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε, είναι το “Motic B1 series”. Η λειτουργία του, δεν διαφέρει πολύ από το συμβατικό οπτικό μικροσκόπιο. Φέρει και αυτό τράπεζα εναπόθεσης δείγματος, φορείς αντικειμενικών φακών (με φακούς 4X, 10X, 40X, κλπ), μικρομετρικούς κοχλίες, μικρομηχανικούς ρυθμιστές οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης δείγματος, οπτικό σωλήνα και προσοφθάλμιο φακό.

Στην απόληξη ωστόσο του προσοφθάλμιου φακού, έχει ενσωματωθεί μια ψηφιακή κάμερα με αισθητήρα CCD (“moticam 480”), η οποία συνδέεται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με τη χρήση ειδικού λογισμικού (“Motic images plus 2”), μπορεί να αναπαραστήσει, να καταγράψει και να βαθμονομήσει την εξεταζόμενη επιφάνεια, ψηφιοποιώντας ουσιαστικά το οπτικό πεδίο του μικροσκοπίου.

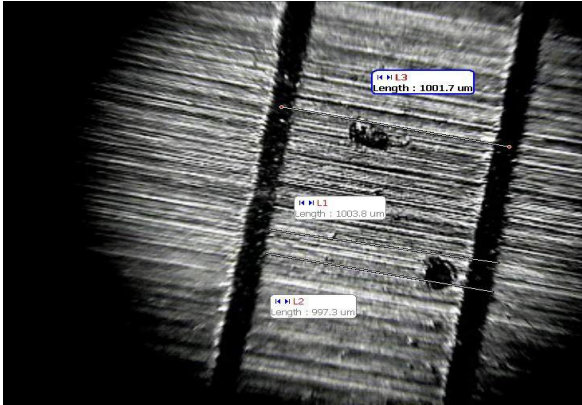


Εικόνα 27: Μικροσκόπιο.

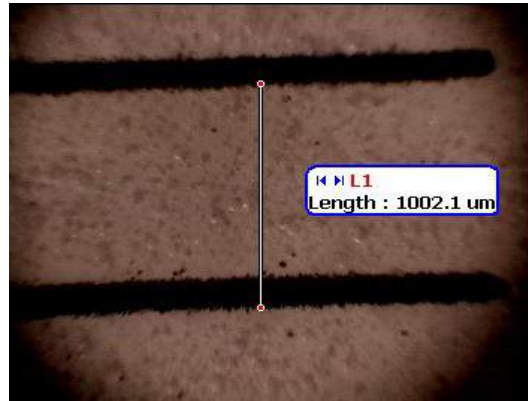


Εικόνα 28: Λογισμικό επεξεργασίας σε Η/Υ.

Προκειμένου να μην υπάρχει αναντιστοιχία μεταξύ πραγματικού μεγέθους και ψηφιακής καταγραφής, αρχικά η διάταξη (μέσω του λογισμικού), βαθμονομήθηκε με τη χρήση ειδικού μικρομέτρου ακριβείας. Το καλιμπράρισμα πραγματοποιήθηκε και δεύτερη φορά, λίγες εβδομάδες αργότερα, εν μέσω καταγραφής των μετρήσεων.



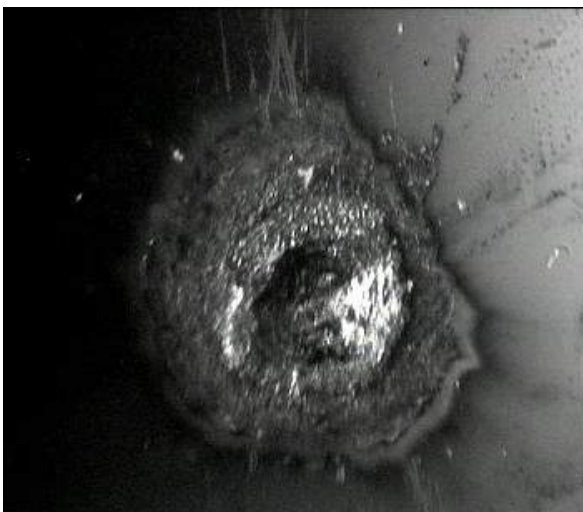
Εικόνα 30: Καλιμπράρισμα λογισμικού με χρήση χάρακα ακριβείας.



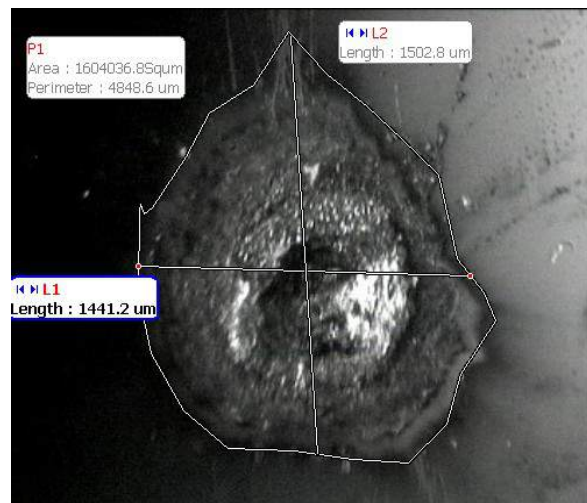
Εικόνα 29: Δεύτερο καλιμπράρισμα λογισμικού με χρήση χάρακα ακριβείας.

Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser

Χαρακτηριστήκε αρχικά ένα δείγμα (38N), που είχε υποστεί εκτεταμένη αποδόμηση, με 30 συνεχόμενους παλμούς



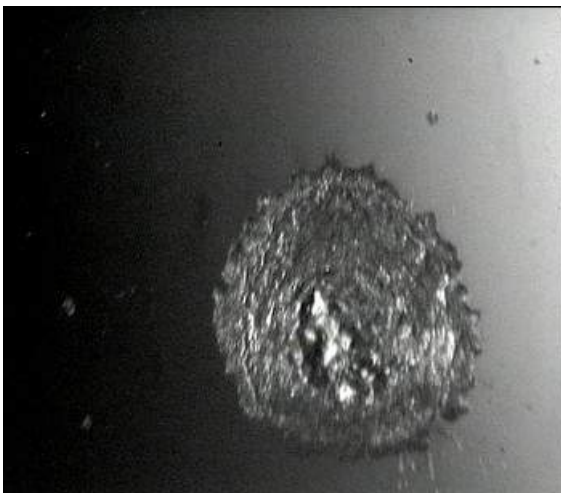
Εικόνα 31: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 30 παλμοί.



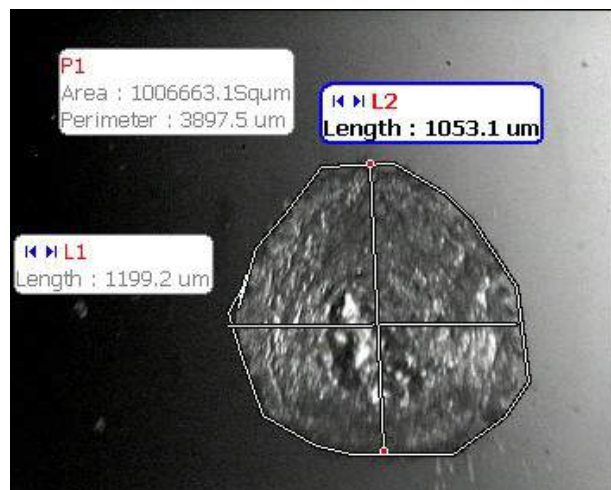
Εικόνα 32: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 30 παλμοί, διαστάσεις.

Η αποδόμηση είναι εκτεταμένη, σε βάθος, έχουν διασκορπιστεί τηγμένες και ανακρυσταλλωμένες δομές περιμετρικά της επιφάνειας του παλμού, ενώ η έντονα αποδομημένη περιοχή παρουσιάζει περίμετρο περί τα 4848 μm . Το εμβαδόν της περιοχής που υπέστη έντονη αποδόμηση, είναι 1604036 μm^2 , ενώ η διάμετρος του κρατήρα είναι περίπου 1,5 μm .

Ακολουθεί καταγραφή κρατήρα αποδόμησης, που αυτήν τη φορά αφορά 3 παλμούς:

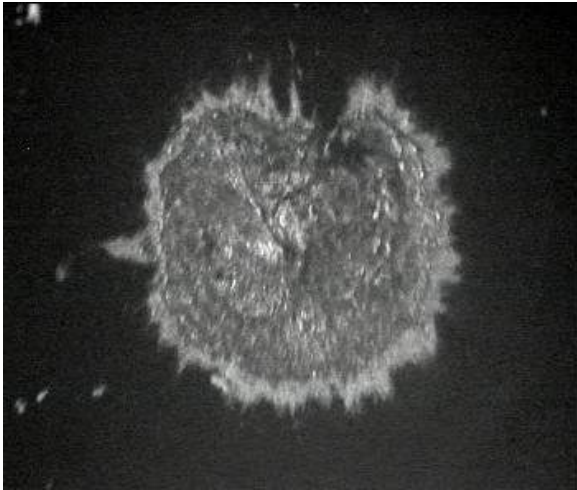


Εικόνα 33: Ακτινοβολή με Nd:YAG laser, 1064 nm, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 3 παλμοί.

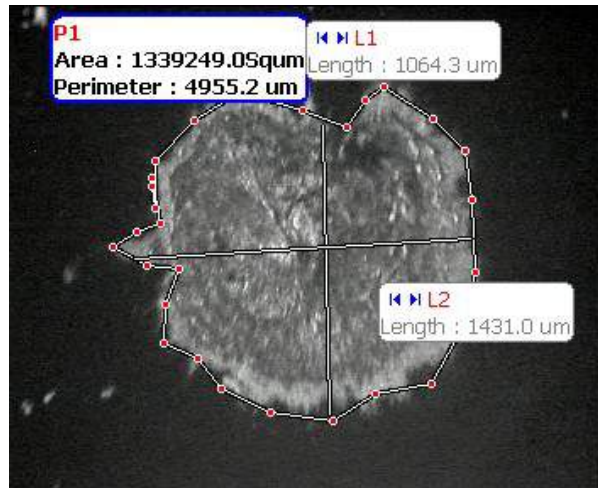


Εικόνα 34: Ακτινοβολή με Nd:YAG laser, 1064 nm, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 3 παλμοί, διαστάσεις.

Και αυτήν τη φορά η αποδόμηση είναι έντονη και σε πλάτος. Λόγω του μεγάλου βάθους τήξης, το μικροσκόπιο εστιάζει σε διαφορετικό σημείο στον κρατήρα απ' ότι στην επιφάνεια. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός δείγματος πυριτίου, στην επιφάνεια του οποίου, είχε πραγματοποιηθεί οξείδωση (SiO_2):

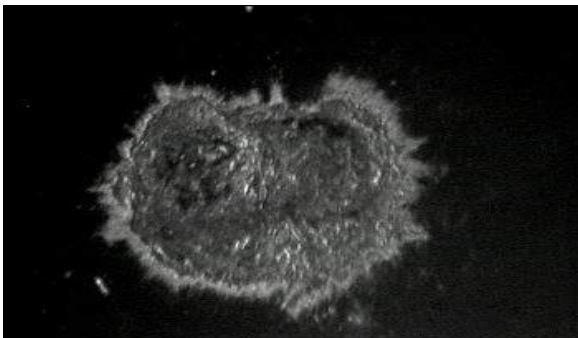


Εικόνα 35: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 5 παλμοί.

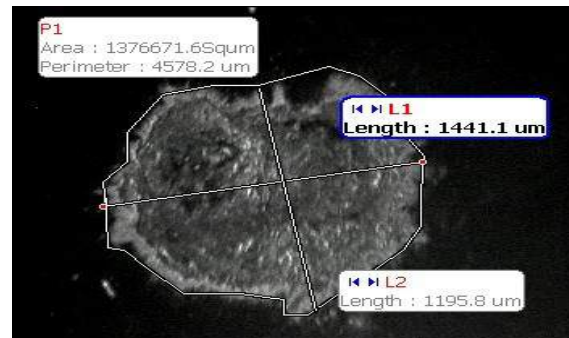


Εικόνα 36: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 5 παλμοί, διαστάσεις.

Οι διαστάσεις όπως διακρίνονται στην “εικόνα 10”, αφορούν 1000 και 1500 μm, για τις 2 διαμέτρους, περίμετρο περίπου 4950 μm, και εμβαδό αποδομημένης περιοχής 1.339.249 μm². Για τους 4 παλμούς, με τις ίδιες παραμέτρους, προέκυψε:

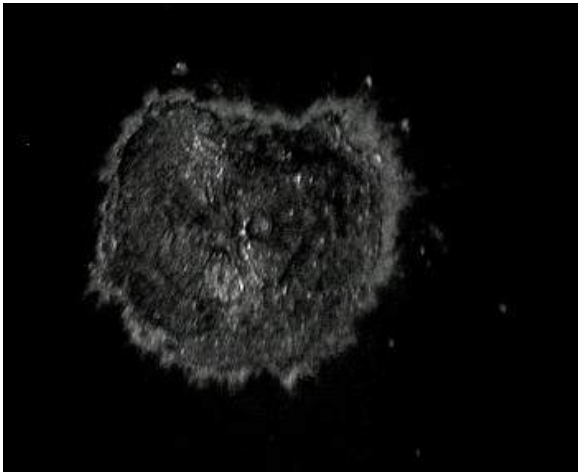


Εικόνα 38: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 4 παλμοί.

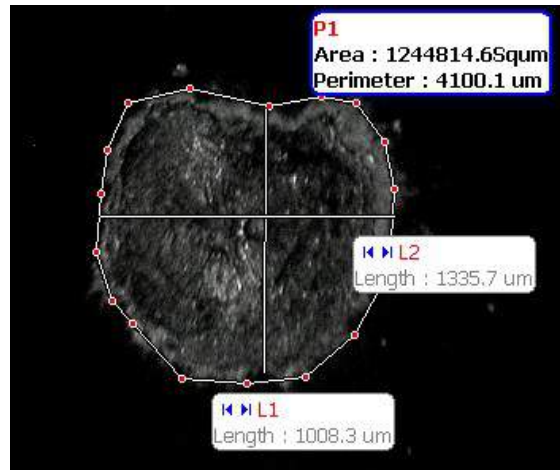


Εικόνα 37: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 4 παλμοί, διαστάσεις.

Αντίστοιχα για τους 3 συνεχόμενους παλμούς, προκύπτει:

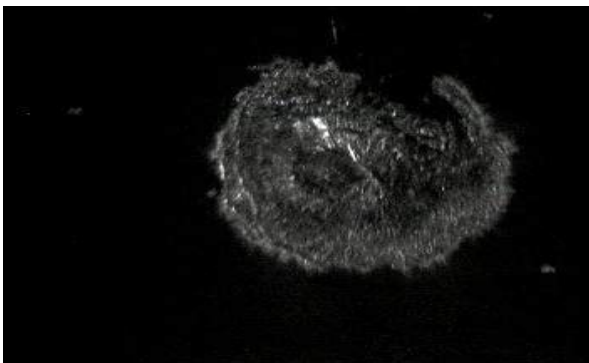


Εικόνα 39: Ακτινοβολή με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 3 παλμοί.

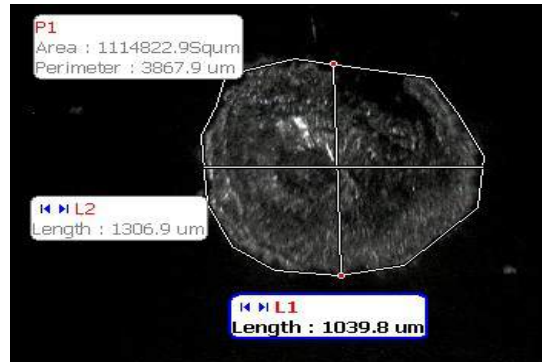


Εικόνα 40: Ακτινοβολή με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 3 παλμοί, διαστάσεις.

Οι διαστάσεις της περιοχής που έχει υποστεί αποδόμηση, δεν παρουσιάζουν μεγάλη μεταβολή. Είναι εμφανής πάντως ο περιορισμός των διαστάσεων αποδόμησης, ως ανάλογος του πλήθους των παλμών. Έτσι, για τους 2 παλμούς, θα προκύψει:

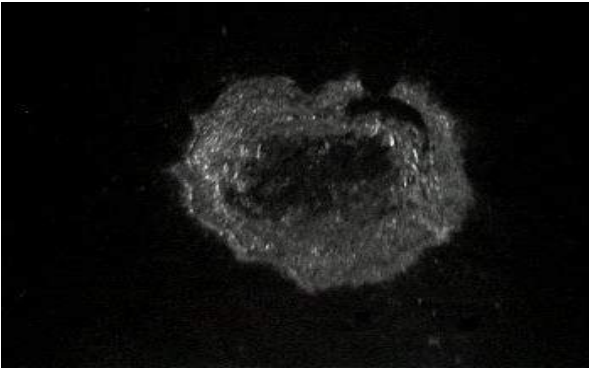


Εικόνα 42: Ακτινοβολή με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 2 παλμοί.

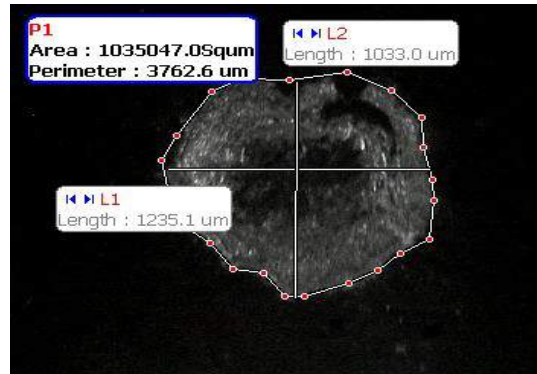


Εικόνα 41: Ακτινοβολή με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 2 παλμοί, διαστάσεις.

Οι διαστάσεις αποδόμησης, συνεχίζουν να περιορίζονται. 1306 και 1039 μm αντίστοιχα, για τις επιμέρους διαμέτρους, ενώ 3867 μm, η περίμετρος. Για τον 1 παλμό, προκύπτει:



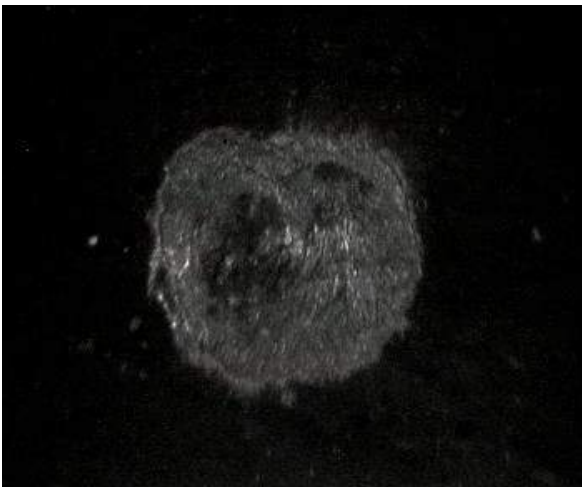
Εικόνα 44: Ακτινοβόληση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 1 παλμός.



Εικόνα 43: Ακτινοβόληση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 166,6 mJ, εστία, 1 παλμός.

Για τους 2 τελευταίους παλμούς, διακρίνεται ότι το προφίλ της δέσμης παρουσιάζει μια μικρή ασυμμετρία στη δεξιά πλευρά του παλμού, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια μικρή, ασυνεχής “νησίδα”. Αυτό πιθανόν να οφείλεται σε ατέλεια του laser που χρησιμοποιήθηκε, ενδεχομένως σε κάποια ατέλεια στα οπτικά του στοιχεία, μετά την πολυετή του χρήση.

Η μελέτη για το ίδιο δείγμα συνεχίστηκε, με ενέργεια στα 150 mJ και μια μόνο ακτινοβόληση.

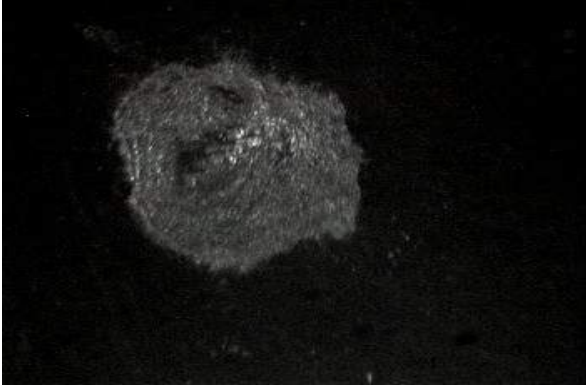


Εικόνα 45: Ακτινοβόληση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 150 mJ, εστία, 1 παλμός.

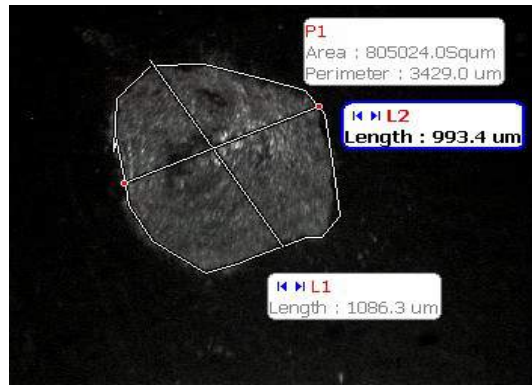


Εικόνα 46: Ακτινοβόληση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 150 mJ, εστία, 1 παλμός, διαστάσεις.

Για αυτήν την τιμή της ενέργειας, φαίνεται να μορφοποιείται συμμετρικά η δομή του κρατήρα αποδόμησης. Οι διαστάσεις αποδόμησης, συνεχίζουν να περιορίζονται, με τη διάμετρο να περνάει πλέον κάτω από το 1 mm. Για την τιμή ενέργειας στα 133,3 mJ και 1 παλμό, καταγράφεται:

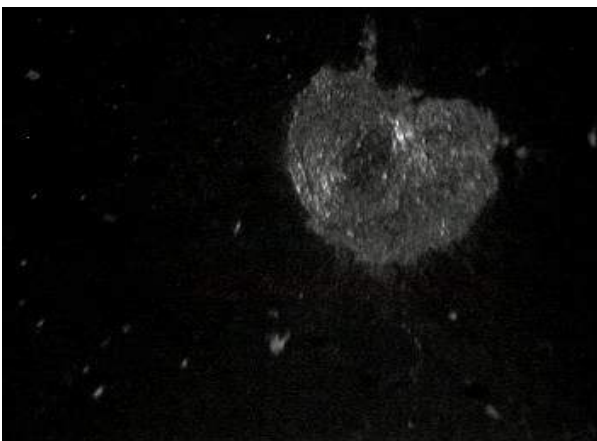


Εικόνα 47: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 133,3 mJ, εστία, 1 παλμός.

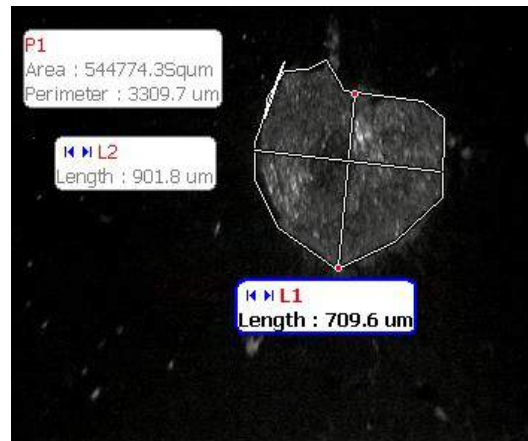


Εικόνα 48: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 133,3 mJ, εστία, 1 παλμός.

Με τον ίδιο τρόπο, καταγράφηκε και η αποδόμηση για τιμή ενέργειας 91,6 mJ, για έναν μόνο παλμό:



Εικόνα 50: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 91,6 mJ, εστία, 1 παλμός.



Εικόνα 49: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 91,6 mJ, εστία, 1 παλμός, δεδομένα.

Για πρώτη φορά, οι διαστάσεις της διαμέτρου πέφτουν κάτω απο το 1 mm, ενώ συνάμα, επανεμφανίζεται η ασυμμετρία στο προφίλ της δέσμης στο πρώτο “τεταρτημόριο” της περιοχής. Η χαρακτηριστική καμπύλη της εξόδου συναρτήσει της ενέργειας, καταδεικνύει οτι σ'αυτήν την περιοχή, πραγματοποιείται μια αποκλιμάκωση, μια αλλαγή στη κλίση της συνάρτησης “Τάσης εξόδου - Ενέργειας”, φαινόμενο που έχει επίδραση και στα ποσοτικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης αποδόμησης. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές πως ακόμη και στα 91,6 mJ ενέργεια δέσμης, με 1 μόλις παλμό, η αποδόμηση είναι εξαιρετικά ισχυρή σε βάθος, και εκτεταμένη σε εύρος. Για τα 50 mJ, θα καταχωρηθεί:

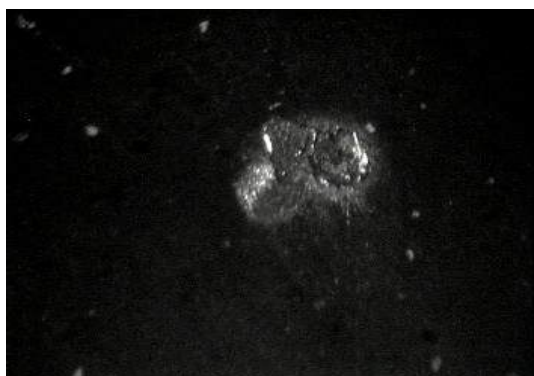


Εικόνα 52: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 50 mJ, εστία, 1 παλμός.



Εικόνα 51: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 50 mJ, εστία, 1 παλμός, δεδομένα.

Αντίστοιχα, για τα 25 mJ ενέργειας δέσμης, παρατηρείται:

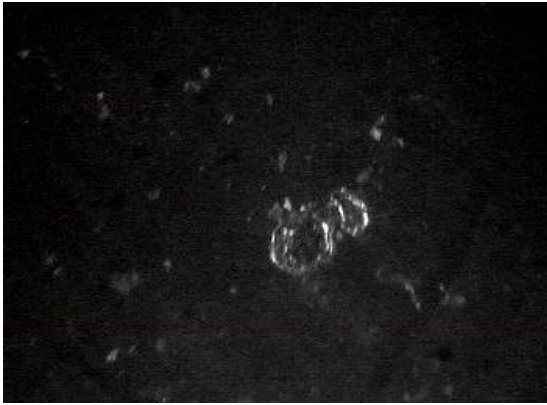


Εικόνα 53: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 25 mJ, εστία, 1 παλμός.

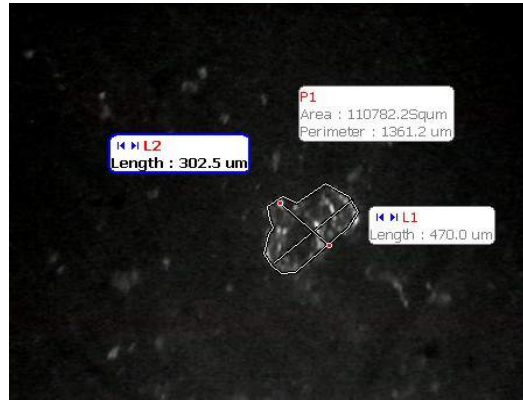


Εικόνα 54: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 25 mJ, εστία, 1 παλμός, δεδομένα.

Τέλος, για τιμή ενέργειας 8,3 mJ, προκλήθηκε αποδόμηση με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:



Εικόνα 55: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 8,3 mJ, εστία, 1 παλμός.



Εικόνα 56: Ακτινοβολήση με Nd:YAG laser, 1064 nm, SiO₂, ενέργειας 8,3 mJ, εστία, 1 παλμός, διαστάσεις.

Συνοψίζοντας, υπό οποιεσδήποτε παραμέτρους, με χρήση ακτινοβολίας στα 1064 nm, στην εστία, προκύπτει εμφανής αποδόμηση για το SiO₂. Ακόμη κι αν η έξοδος του laser πάρει τη μικρότερη τιμή, ακόμη κι αν η ακτινοβολήση αφορά εν τέλει μόνο έναν παλμό, η επιφάνεια του δείγματος θα καταστραφεί σε βάθος. Το διαστασιολογικό εύρος του κρατήρα κινείται απο το 1,5 mm για περιπτώσεις εκτεταμένης αποδόμησης, μέχρι τα 350 μm, στα πιο περιορισμένα φαινόμενα.

Το προφίλ της δέσμης παρέπεμπε σε TEM₀₀, αν και εντοπίστηκε μια ασυμμετρία στο πρώτο “τεταρτημόριο”, πιθανόν οφειλόμενη σε ατέλεια στα οπτικά στοιχεία της διάταξης.

Ακτινοβολήση με CO₂ laser

Για το CO₂ laser, πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός τόσο για δείγματα που δεν είχαν υποστεί καμιά προθέρμανση, όσο και για δείγματα που είχαν υποστεί προθέρμανση στους 400 °C. Θα παρουσιαστούν αρχικά τα δείγματα που δεν είχαν υποστεί ενισχυτική θερμική επεξεργασία, για τα οποία αρχικά, θα καταγραφεί ένα δείγμα με έντονη αποδόμηση:



Εικόνα 57: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, ενέργειας 116,6 mJ, εστία, 150 παλμοί.



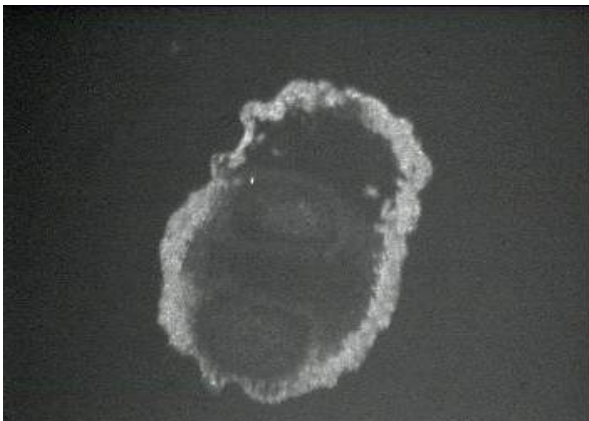
Εικόνα 58: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, ενέργειας 116,6 mJ, εστία, 150 παλμοί, διαστάσεις.

Η αποδόμηση που απεικονίζεται στις παραπάνω καταγραφές, ήταν αρκετά έντονη, αφενός λόγω της μεγάλης τιμής ενέργειας της δέσμης (116,6 mJ, τιμή που καταγράφηκε μόνο μια φορά και στη συνέχεια παρόλη την συνεχή επανευθυγράμμιση των αντήχειων, δεν επετεύχθη εκ νέου) και φυσικά λόγω του μεγάλου αριθμού παλμών στην ακτινοβολήση. Επομένως, η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, σε συνδιασμό με το μεγάλο πλήθος παλμών, προκάλεσε κρατήρα αποδόμησης με διάμετρο σχεδόν στα 2 mm.

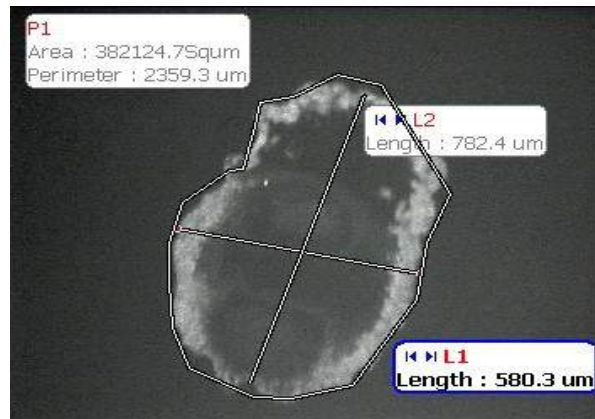
Με δεδομένο ότι η τιμή ενέργειας της δέσμης του laser, δεν σταθεροποιήθηκε εκ νέου στην τιμή των 116,6 mJ, αλλά στα 86,6 mJ, όπου και πραγματοποιήθηκαν σχεδόν όλες οι ακτινοβολήσεις, οι λήψεις που ακολουθούν, αφορούν ακτινοβολήσεις με την δεδομένη ενέργεια, και κατ' επέκταση ,μικρότερη πυκνότητα ενέργειας.

Για την αφεστιασμένη δέσμη 2 cm (spot size 1,2 mm), αρχικά προσδιορίστηκε η πυκνότητα ενέργειας (77 mJ/mm²). Γι' αυτήν την πυκνότητα ενέργειας, για το δείγμα "38N", έγιναν οι παρακάτω καταγραφές:

Αρχικά, για 120 διαδοχικούς παλμούς, προέκυψε:



Εικόνα 59: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 120 παλμοί.

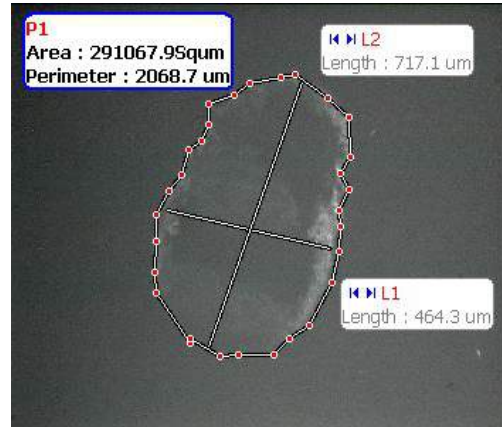


Εικόνα 60: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 120 παλμοί, διαστάσεις.

Παρόλο που διακρίνονται στον πυρήνα του κρατήρα 2 υποπεριοχές, το προφίλ της δέσμης αντιστοιχεί σε ρυθμό ταλάντωσης TEM₀₀. Για τις 2 αυτές περιοχές, δεν παρατηρήθηκε εμφανής διαχωρισμός της δέσμης, ούτε στο συγκεκριμένο δείγμα, ούτε στη φωτοευαίσθητη μαγνητική ταινία που χρησιμοποιήθηκε για τη συστηματική καταγραφή του προφίλ της δέσμης. Στη συνέχεια, καταγράφηκε η ακτινοβολήση με 100 συνεχόμενους παλμούς:



Εικόνα 62: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 100 παλμοί.



Εικόνα 61: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 100 παλμοί.

Η περιφέρεια του κρατήρα περιορίζεται αισθητά με μόλις 20 παλμούς λιγότερους. Στην επόμενη ακτινοβολήση, με ακόμη 20 παλμούς λιγότερους, δηλαδή 80 στο σύνολο, προκύπτει:



Εικόνα 63: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 80 παλμοί.

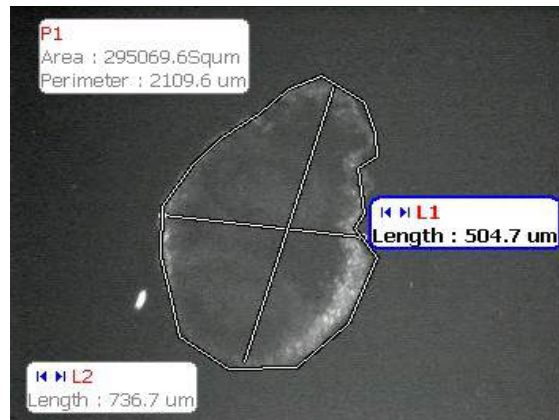
Σε αντίθεση με τα δείγματα που ακτινοβολήθηκαν με την πρώτη αρμονική του Nd:YAG laser, εδώ παρατηρείται μια χωρική ανομοιομορφία. Το κέντρο του κρατήρα αποδόμησης, δεν φέρει έντονο αποχρωματισμό, ενώ ο δακτύλιος περιφερειακά του κρατήρα, είναι πιο παχύς και περισσότερο αποχρωματισμένος. Αναπτύσσονται δηλαδή, διαφορετικοί μηχανισμοί αποδόμησης,

που κατά βάση οφείλονται στην αλλαγή του μήκους κύματος της μονοχρωματικής ακτινοβολίας.

Με τον ίδιο τρόπο, παρατίθενται και οι καταγραφές για τους 60 συνεχόμενους παλμούς:

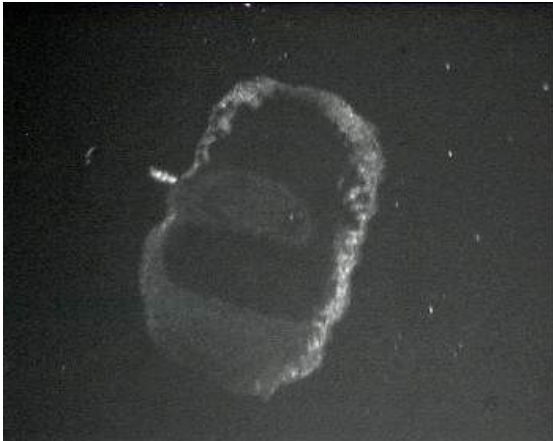


Εικόνα 65: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 60 παλμοί.

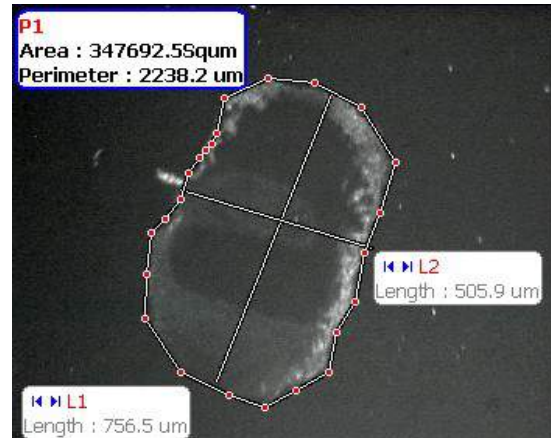


Εικόνα 64: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 60 παλμοί.

Όμοια, για τις 50 συνεχόμενες ακτινοβολήσεις, καταχωρήθηκαν τα παρακάτω:

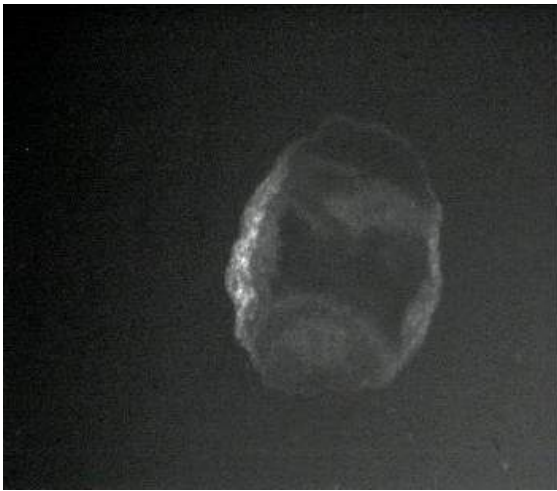


Εικόνα 66: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 50 παλμοί.

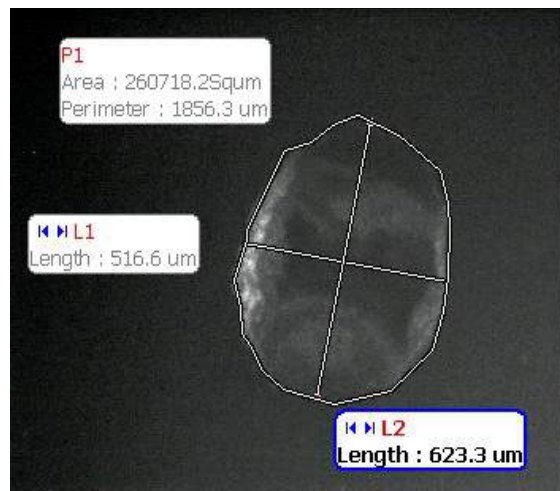


Εικόνα 67: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 50 παλμοί, διαστάσεις.

Η μείωση από τους 60 στους 50 συνεχόμενους παλμούς, δεν επιφέρει μεγάλες αλλαγές στις διαστάσεις της περιοχής αποδόμησης. Για τους 40 συνεχόμενους παλμούς, οι διαστάσεις περιορίζονται εμφανώς:



Εικόνα 68: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 40 παλμοί.

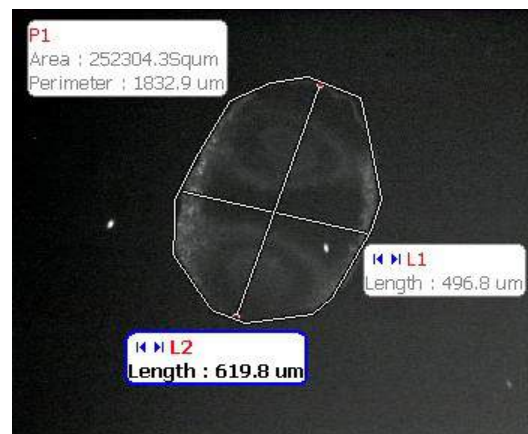


Εικόνα 69: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 40 παλμοί, διαστάσεις.

Πλέον η περίμετρος πέφτει κάτω από τα 2 mm και οι διαστάσεις του κρατήρα απ' άκρη σ' άκρη, είναι περίπου 0,5 mm. Ο κρατήρας φαίνεται να αποκτά πιο συνεκτική δομή, ωστόσο ακόμη υπάρχουν περιοχές με μεταξύ τους δομικές αντιθέσεις. Αντίστοιχα, για τους 30 συνεχόμενους παλμούς, προκύπτει:

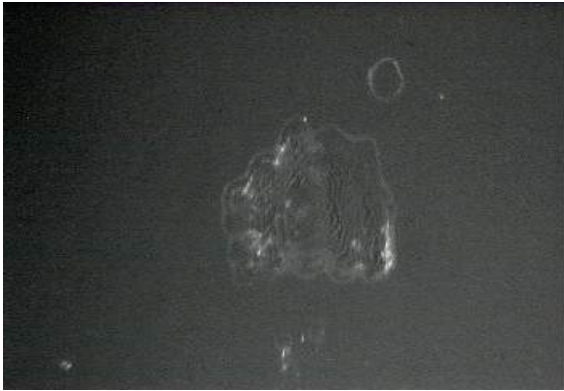


Εικόνα 71: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 30 παλμοί.

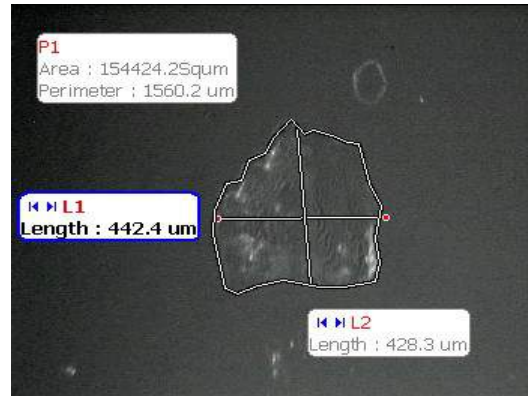


Εικόνα 70: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 30 παλμοί, διαστάσεις.

Με τον ίδιο τρόπο, για τους 10 παλμούς, προέκυψε:



Εικόνα 73: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 10 παλμοί.



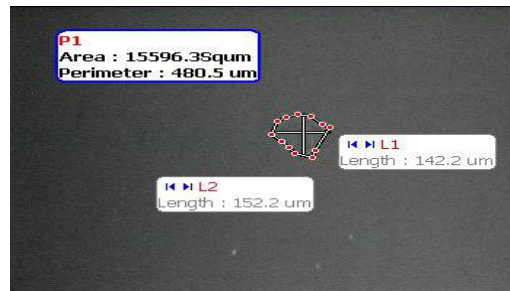
Εικόνα 72: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 10 παλμοί, διαστάσεις.

Η δομή του κρατήρα γίνεται ακόμη πιο συνεκτική, αφού ο κρατήρας περιορίζεται χωρικά. Οι περιφερειακές κηλίδες που εμφανίστηκαν στους 10 παλμούς, οφείλονται σε σκεδάσεις που προκλήθηκαν κατά την ακτινοβολήση λόγω έντονης υγρασίας στην περιοχή του δείγματος.

Για τις ακτινοβολήσεις με 8 και 6 διαδοχικούς παλμούς, προέκυψε:



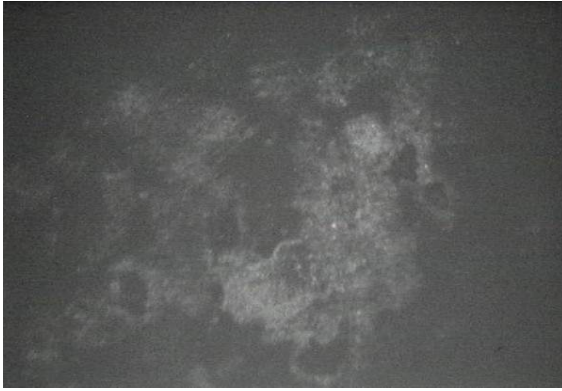
Εικόνα 75: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 8 παλμοί



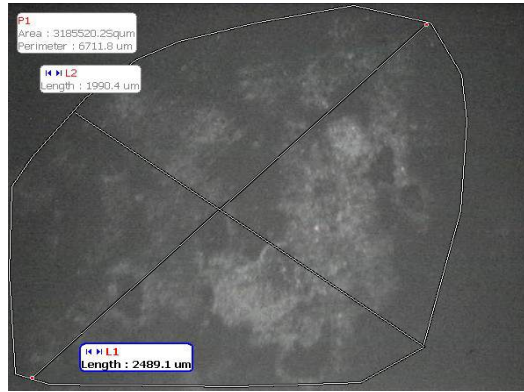
Εικόνα 74: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 77 mJ/mm², 6 παλμοί, διαστάσεις.

Πλέον, οι διαστάσεις απο άκρη σε άκρη είναι στα 150 περίπου μm. Για τις ακτινοβολήσεις κάτω απο 6 παλμούς, δεν κατέστη δυνατό να εξακριβωθεί η αποδόμηση τους. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν έχουν ενσωματωθεί στην παρουσίαση.

Σε αυτό το σημείο, θα παρουσιαστούν τα δείγματα που προθερμάνθηκαν στους 400 °C. Η πρώτη λήψη, αφορά παλμό με ίδια πυκνότητα ενέργειας, και 110 συνεχείς ακτινοβολήσεις:



Εικόνα 77: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 110 παλμοί.



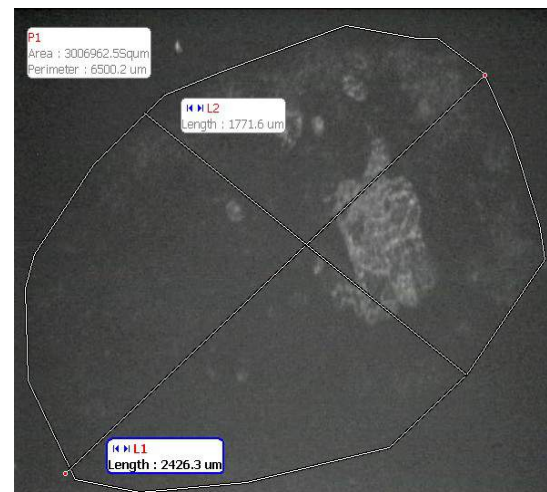
Εικόνα 76: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 110 παλμοί, διαστάσεις.

Η αποδομημένη περιοχή είναι μεγαλύτερη σε διαστάσεις (είναι χαρακτηριστικό πως η μεγάλη της διάμετρος προσεγγίζει τα 2,5 mm), ο αποχρωματισμός - αν και ανομοιόμορφος - είναι εμφανής. Επιπλέον, η αποδόμηση φαίνεται να είναι περισσότερο επιφανειακή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα δείγματα. Η προθέρμανση στους 400 °C, φαίνεται να επιδρά σημαντικά στο μηχανισμό αποδόμησης. Όπως και να'χει, επειδή οι εμφυτευθείσες δόσεις πυριτίου έχουν πολύ μικρό βάθος (μόλις τα 13 nm για το δείγμα “38N”), η όποια επιφανειακή αποδόμηση, όσο ρηχή κι αν είναι, πρέπει να αποφευχθεί.

Για τη περίπτωση των 80 συνεχόμενων παλμών, προέκυψε:

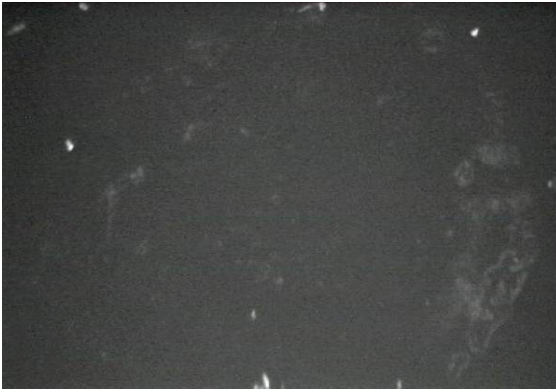


Εικόνα 78: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 80 παλμοί.

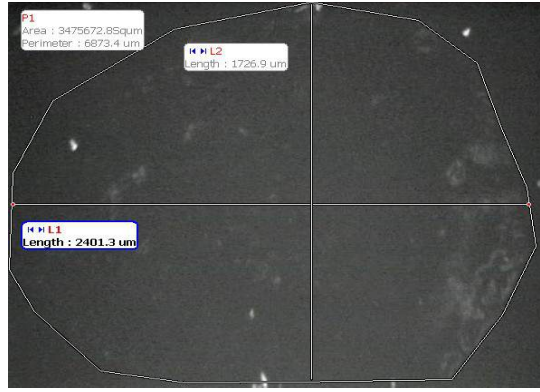


Εικόνα 79: Ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 80 παλμοί, διαστάσεις.

Με τον ίδιο τρόπο, για τους 50 διαδοχικούς παλμούς, καταγράφηκε:



Εικόνα 80: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 50 παλμοί.

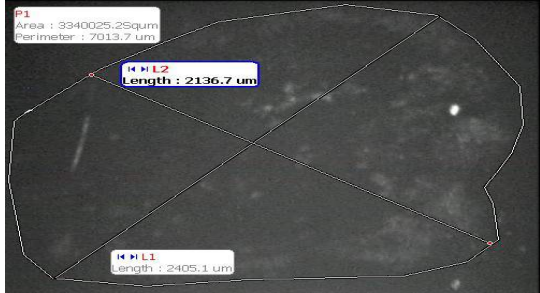


Εικόνα 81: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 50 παλμοί, διαστάσεις.

Όμοια, για τους 30 παλμούς, προκλήθηκε αλλαγή στην επιφάνεια του δείγματος, με τα χαρακτηριστικά που ακολουθούν:



Εικόνα 83: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 30 παλμοί.

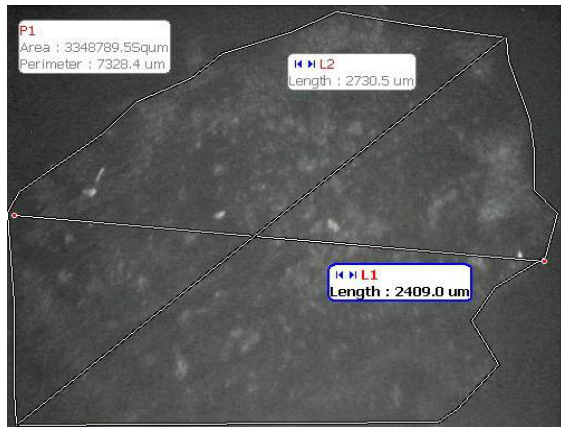


Εικόνα 82: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 30 παλμοί, διαστάσεις.

Τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά δεν μειώνονται ιδιαίτερα, ούτε διακρίνεται κάποια μεγάλη διαφοροποίηση στο μηχανισμό αποδόμησης. Έτσι, για τους 20 παλμούς, θα προκύψει:



Εικόνα 85: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 20 παλμοί.

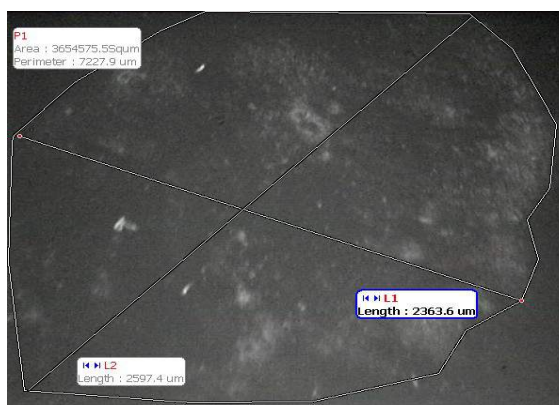


Εικόνα 84: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 20 παλμοί, διαστάσεις.

Ενώ τέλος, για τους 10 παλμούς:



Εικόνα 86: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 10 παλμοί.



Εικόνα 87: Ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 38N, 400 °C, 48 mJ/mm², 10 παλμοί, διαστάσεις.

Συνοψίζοντας, η ακτινοβολήση με laser διοξειδίου του άνθρακα και πυκνότητα ενέργειας 77 mJ/mm², προκαλεί ορατή αποδόμηση για πλήθος παλμών μεγαλύτερο του 5. Η αποδόμηση φαίνεται να επιδρά και σε βάθος, αφού ο δακτύλιος περιφερειακά του κρατήρα είναι έντονα αποχρωματισμένος.

Για μικρότερη πυκνότητα ενέργειας στα 48 mJ/mm², με συνδιασμένη προθέρμανση στους 400 °C, η αποδόμηση φαίνεται να είναι περισσότερο χωρικά διευρυμένη, περισσότερο επιφανειακή και με μεγάλες διαστάσεις ακόμη και για μικρό πλήθος διαδοχικών παλμών. Η προθέρμανση δηλαδή, ενισχύει την απορροφησιμότητα και τα φαινόμενα επιφανειακής αποδόμησης.

Και οι 2 παραμετροποιήσεις, προκαλούν αποδόμηση, με διαφορετικά όμως ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά από τις αντίστοιχες που αφορούν την πρώτη αρμονική του Nd:YAG. Σ'εκείνη την περίπτωση, η επιφανειακή αλλοίωση, είναι πιο έντονη και ομοιόμορφη.

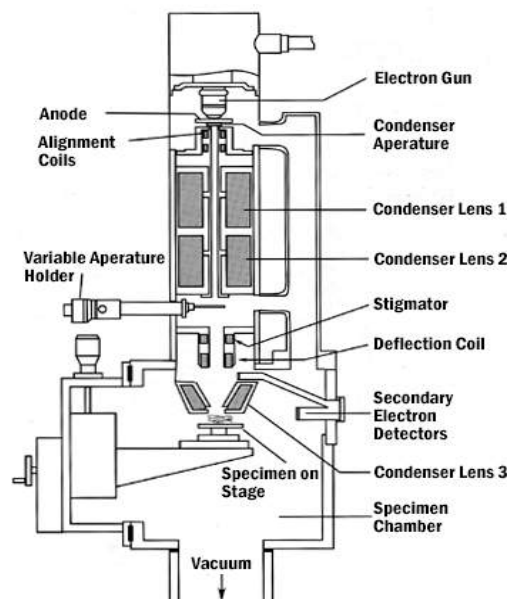
Μορφολογικός χαρακτηρισμός – SEM

Με διαχωρισμένα τα δείγματα που (ίσως) περιλαμβάνουν ακτινοβολήσεις χωρίς επιφανειακή αποδόμηση από εκείνα που παρατηρήθηκε εμφανής αποδόμηση είτε δια γυμνού οφθαλμού είτε με ανάλυση του δείγματος σε ψηφιακό μικροσκόπιο (διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) και μετά από το βαθύ καθαρισμό των επικρατέστερων δειγμάτων με τη μέθοδο “piranha”, έχουν διαμορφωθεί οι συνθήκες για την πραγματοποίηση μορφολογικού χαρακτηρισμού όλης της επιφάνειας του κάθε δείγματος.

Αν και υπάρχουν πολλές τεχνικές μορφολογικού χαρακτηρισμού και εντοπισμού των ενδεχόμενων αλλοιώσεων (SEM, AFM), τα δείγματα θα εξεταστούν με χρήση μιας εξαιρετικά δημοφιλούς μεθόδου, του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM).

Λίγα λόγια για το SEM

Το μικροσκόπιο ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM), είναι ουσιαστικά μια διάταξη η οποία μας παρέχει δυνατότητες ενισχυμένης οπτικής καταγραφής, σε πλήθος υλικών, πραγματοποιώντας ποσοτικές αναλύσεις με γεωμετρικές αλλά και στοιχειομετρικές λεπτομέρειες. Η λειτουργία του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου SEM βασίζεται στην παραγωγή μίας δέσμης ηλεκτρονίων, η οποία προσπίπτει πάνω σε μία επιφάνεια και τη σαρώνει με σκοπό τη μελέτη αυτού του υλικού.



Εικόνα 88: Αναπαράσταση διάταξης SEM.

Τα ηλεκτρόνια, τα οποία παράγονται θερμιονικά (μέσω νήματος βολφραμίου ως πηγή) από

την πηγή “συλλέγονται” από την άνοδο - στην οποία έχει εφαρμοστεί τάση της τάξης των KV - με στόχο να αποκτήσουν κατεύθυνση προς το υλικό της επιφάνειας.

Για να κατευθυνθεί η δέσμη προς το δοκίμιο, χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικοί φακοί, δηλαδή πηνία που κατευθύνουν τη δέσμη βάσει της δύναμης Lorentz. Με δεδομένο ότι η δέσμη των ηλεκτρονίων μπορεί να καταστραφεί λόγω της σύγκρουσης και απορρόφησης με τα άτομα του αέρα (άζωτο, οξυγόνο), κρίνεται απαραίτητο πριν την εκκίνηση της σάρωσης, η δημιουργία κενού με τη χρήση αντλιών. Μιας μηχανικής αντλίας που ξεκινάει πρώτη και μιας turbo, που συμμετέχει λίγο αργότερα.

Τρόπος λειτουργίας της σάρωσης:

Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει μία επιφάνεια υλικού και κατά τη διάρκεια της πρόσκρουσης προκύπτει σήμα. Απο τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται δευτερογενή, οπισθοσκεδαζόμενα ηλεκτρόνια και ακτίνες X.

Ως δευτερογενή (secondary electrons) χαρακτηρίζονται τα ηλεκτρόνια, τα οποία διασκεδάζονται στην επιφάνεια του υλικού, δηλαδή τα ηλεκτρόνια ατόμων του υλικού, που αρχικά απορρόφησαν ενέργεια από τη δέσμη ηλεκτρονίων και στη συνέχεια απελευθέρωσαν με τη σειρά τους ηλεκτρόνια. Αυτά τα ηλεκτρόνια, που δεν ανήκουν στη δέσμη, έχουν ενέργεια μέχρι και 50 eV. Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από δευτερογενείς συλλέκτες με πόλωση (πλέγμα θετικού δυναμικού +100V). Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια, δίνουν πληροφορία μορφολογίας κοντά στην επιφάνεια.

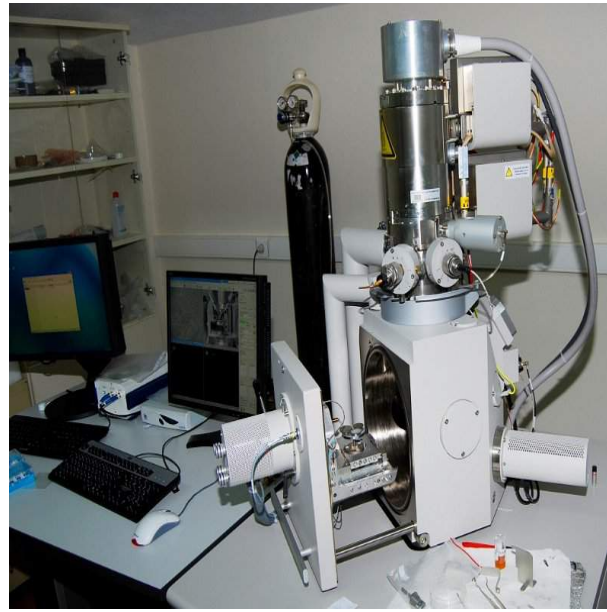
Ως οπισθοσκεδαζόμενα (Backscattered electrons) χαρακτηρίζονται τα ηλεκτρόνια, που προσκρούουν σε μία επιφάνεια και ξαναγυρίζουν με την ίδια ενέργεια. Σε σύγκριση με τα δευτερογενή, έχουν μεγαλύτερη ενέργεια και εκπέμπονται συνήθως από βαθύτερο της επιφάνειας στρώμα. Για τη συλλογή αυτών των ηλεκτρονίων τοποθετείται ανιχνευτής (ημιαγωγός στερεάς κατάστασης) στη κολώνα πάνω από το υπό εξέταση δείγμα. Το πληροφοριακό υλικό που συγκεντρώνεται από τα ηλεκτρόνια χρησιμοποιείται για την ηλεκτρονική απεικόνισή μέσω υπολογιστή.

Προκειμένου να μη φορτιστεί η επιφάνεια και παρατηρήθουν φαινόμενα ανάκλασης της εκπεμπόμενης ακτίνας γίνεται χρήση ανιχνευτών για μη αγώγιμα υλικά σε περιβάλλον χαμηλού κενού, η αγώγιμα επικαλυπτικά στρώματα για αγώγιμα υλικά, εξαιρετικά λεπτού πάχους, ώστε να μην αλλοιώσουν τις λεπτομέρειες της εικόνας.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, ήταν το “Nova NanoSEM 230”, που λειτουργεί στον Τομέα Φυσικής του Ε.Μ.Π. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε ειδική βάση συγκράτησης και μελετήθηκαν σειριακά, ένα προς ένα.



Εικόνα 89: Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο “Νοβα NanoSEM 230”, του Τομέα Φυσικής, Ε.Μ.Π. Διακρίνεται ο θάλαμος, το κυλινδρικό “πολυβόλο” ηλεκτρονίων ψηλά στη διάταξη, η αντλία και η κονσόλα χειρισμού.



Εικόνα 90: Η διάταξη με απασφαλισμένο το θάλαμο τοποθέτησης του δείγματος. Διακρίνεται η βάση (mount), ενώ εξωτερικά, οι 3 χειροκίνητοι μετατοπιστές και ο μοχλός εφαρμογής κλίσης.

Παράμετροι σάρωσης με SEM

Κατά τη διαδικασία σάρωσης με SEM πραγματοποιήθηκαν οι εξής μεταβολές με σκοπό τη λήψη εικόνων :

- **Μεγέθυνση:** Στην οπτική, η μεγέθυνση είναι ο λόγος του μήκους του εξεταζόμενου, προς την πραγματική αντιστοιχία. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η μεγέθυνση, τόσο μικρότερη περιοχή του δείγματος σαρώνεται.
- **Μέγεθος Δέσμης (Spot Size):** Είναι το μέγεθος της διαμέτρου της δέσμης. Μεγαλύτερο μέγεθος δέσμης συνεπάγεται περισσότερο σήμα, αλληλοεπικάλυψη των περιοχών που εξετάζεται, επομένως χειρότερη ανάλυση (resolution) αλλά και λιγότερα “χιόνια” λόγω της αύξησης του S/N λόγου.
- **Συχνότητα ανανέωσης (dwell time) :** Δηλαδή, ο χρόνος παραμονής της δέσμης ηλεκτρονίων σε κάθε σημείο. Μεγαλύτερος χρόνος παραμονής συνεπάγεται περισσότερο σήμα, άρα μεγαλύτερος λόγος S/N, με απλά λόγια, περιορισμός του “χιονιού”.

- Λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N): Με δεδομένο ότι δεν είναι εφικτή η παρέμβαση στο θόρυβο (N), προκειμένου να βελτιωθεί ο λόγος S/N, προκαλείται αύξηση του σήματος (S).

Με βάση όλα τα παραπάνω, είναι προφανές ότι μια ευκρινής αναπαράσταση μέσω του SEM, είναι πολυπαραγοντικό ζήτημα και δεν καθορίζεται μονοσήμαντα από τη μεγέθυνση ή το μέγεθος της δέσμης, αλλά από το συνδυασμό και των τριών παραμέτρων.

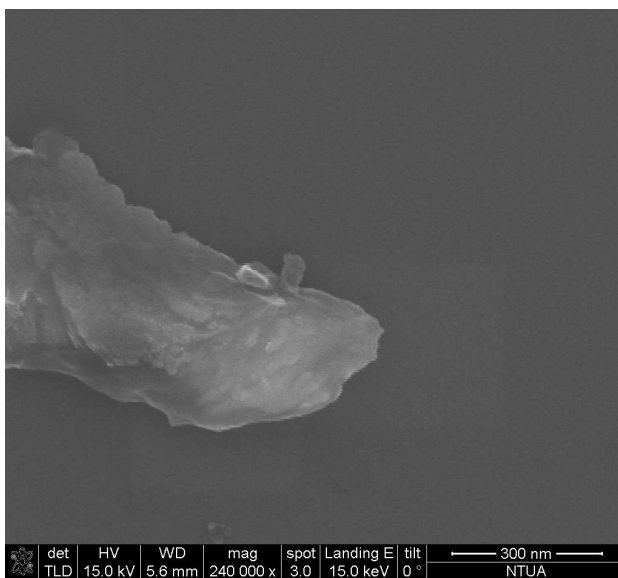
Αποτελέσματα χαρακτηρισμού

Μορφολογικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε τόσο σε δείγματα 38N ακτινοβολημένα με Nd:YAG laser 6ns, όσο και σε δείγματα που είχαν υποστεί ακτινοβολία με TEA CO₂ laser 80ns.

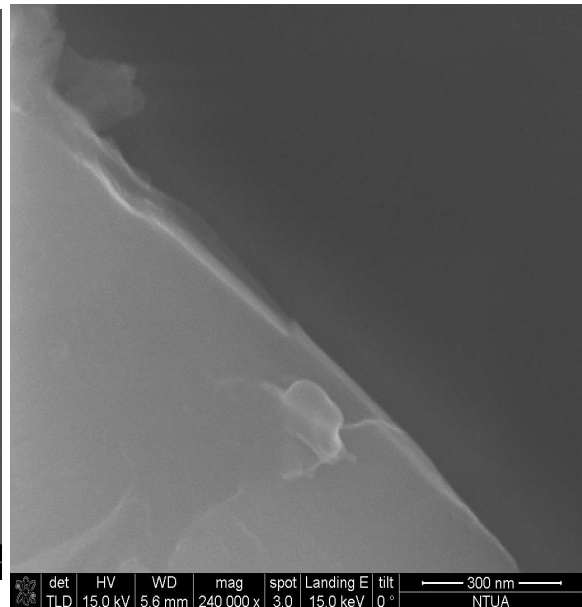
Θα παρουσιαστούν αρχικά οι ακτινοβολήσεις με Nd:YAG laser, αφού λόγω της μεγαλύτερης απορροφησιμότητας του ντοπαρισμένου δείγματος πυριτίου στο μήκος κύματος εκπομπής Nd:YAG laser, μπορούν να μελετηθούν εκτενέστερα τα φαινόμενα αποδόμησης της επιφάνειας.

Nd:YAG laser

Αρχικά, πραγματοποιείται μεγάλη μεγέθυνση σε ένα μικρό σημείο της επιφάνειας πιθανώς οργανικό, ώστε να εστιάσει η δέσμη και να ξεκινήσει η “ψηλάφηση” σε όλη την επιφάνεια του δείγματος.

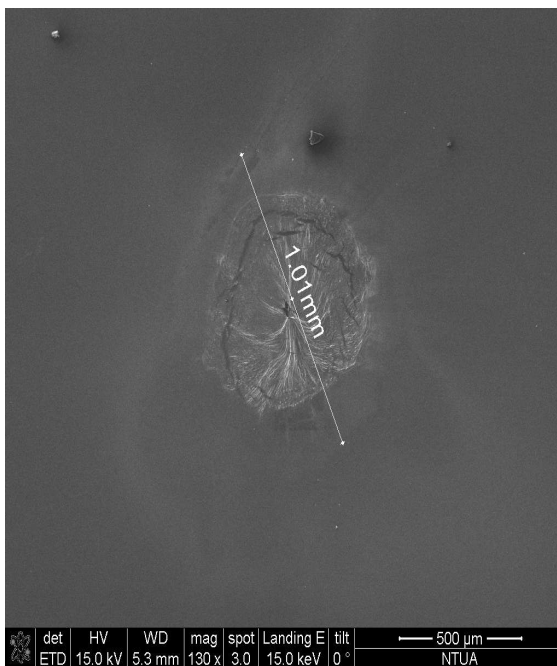


Εικόνα 92: 'Άγνωστη επικάλυψη, χρήσιμη όμως για το καλιμπράρισμα της διάταξης.

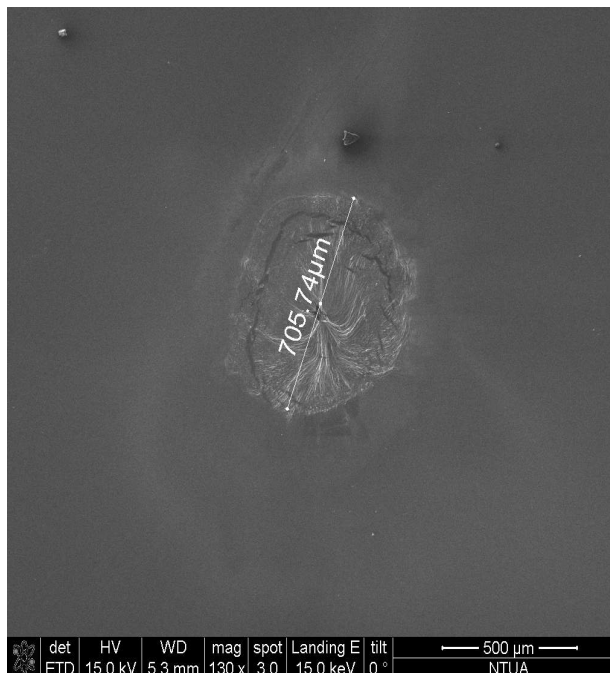


Εικόνα 91: Αντίστοιχη ,εμφανής, δομή.

Έχοντας επιλέξει ένα ακτινοβολημένο δείγμα στην εστία, η αποδόμηση ήταν εμφανής. Πολύ περισσότερο, όταν το δείγμα έχει ακτινοβοληθεί με τη μέγιστη τιμή ενέργειας δέσμης του Nd:YAG laser, τα 166,6 mJ για το συγκεκριμένο σημείο. Με τη χρήση μετρητικού βοηθητικού μέσου, επιχειρήθηκε να εκφραστούν κάποιες βασικές παράμετροι της αποδόμησης, όπως η εξωτερική διάμετρος του αποδομημένου σημείου, η εσωτερική, “τραχύτερη”, αλλά και άλλα ενδιαφέροντα σημεία.



Εικόνα 94: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, εξωτερική ακτίνα.

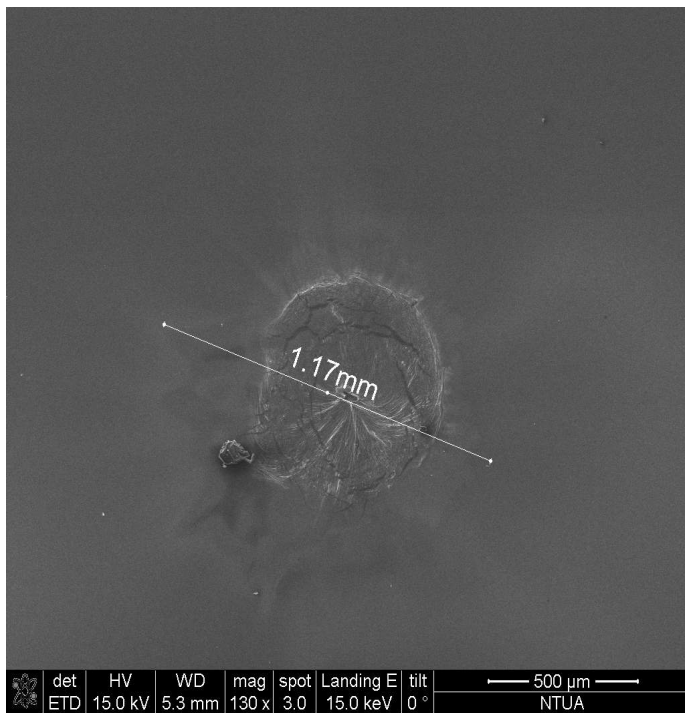


Εικόνα 93: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, εσωτερική ακτίνα περιοχής αποδόμησης.

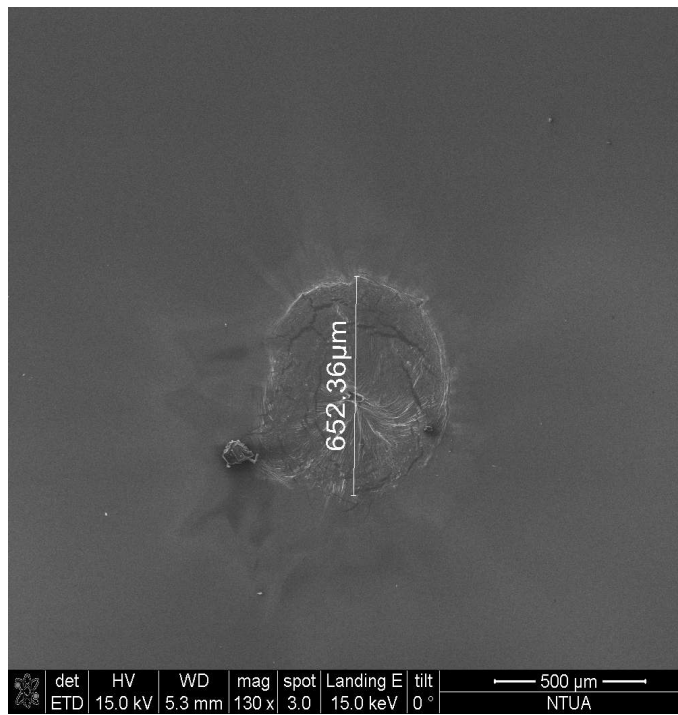
Παρατηρείται η ανάπτυξη ενός δακτυλίου, με πάχος περίπου 300 nm. Ο δακτύλιος αυτός, φαίνεται να μην έχει υποστεί τόσο έντονη θερμική επίδραση, όσο το κέντρο της δέσμης, παρόλα αυτά, είναι εμφανής η αλλοίωση που εκφράζεται μέσω ενός διακριτού αποχρωματισμού. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η γκαουσιανή μορφή της δέσμης, προκαλεί ανομοιόμορφη χωρική κατανομή θερμοκρασίας, και κατ' επέκταση ανομοιόμορφη τήξη και αποδόμηση.

Ακολουθεί μια ακόμη ακτινοβολήση, υπό τις ίδιες συνθήκες, με παρόμοιες εσωτερικές και εξωτερικές διαμέτρους, αλλά και μορφολογία αποδόμησης.

Είναι εμφανές ότι κατά προσέγγιση, οι τιμές της πρώτης και της δεύτερης ακτινοβόλησης, είναι ίδιες.

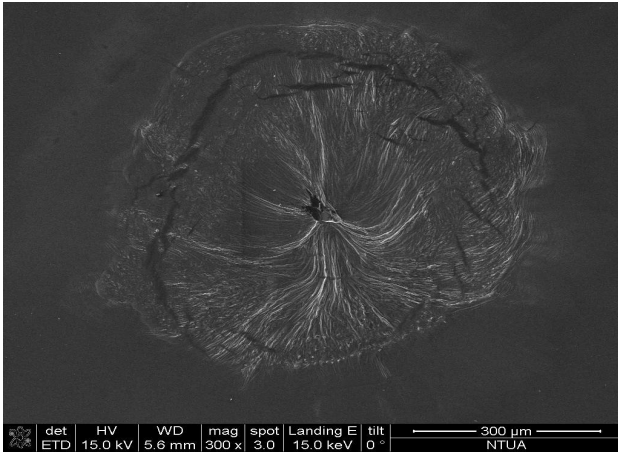


Εικόνα 96: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, εξωτερική ακτίνα.

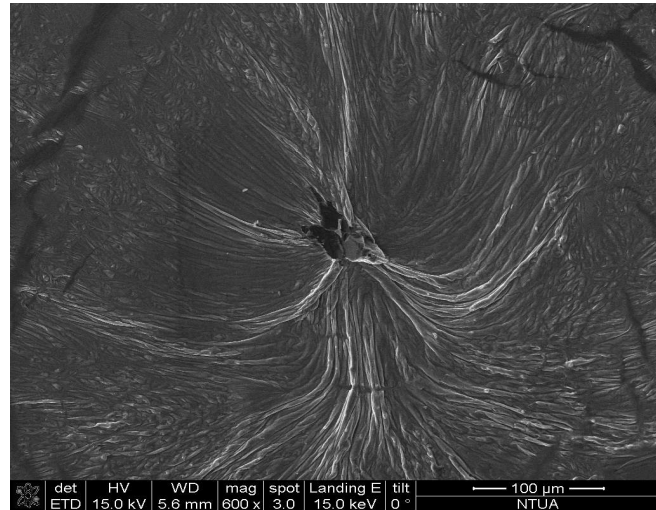


Εικόνα 95: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, εσωτερική ακτίνα.

Μια καλύτερη μεγέθυνση της αποδομημένης περιοχής, δίνει καλύτερη πληροφορία για την “αρχιτεκτονική” της αποδομημένης περιοχής. Μεγενθύνοντας 300X και 600X, προκύπτει αντίστοιχα:



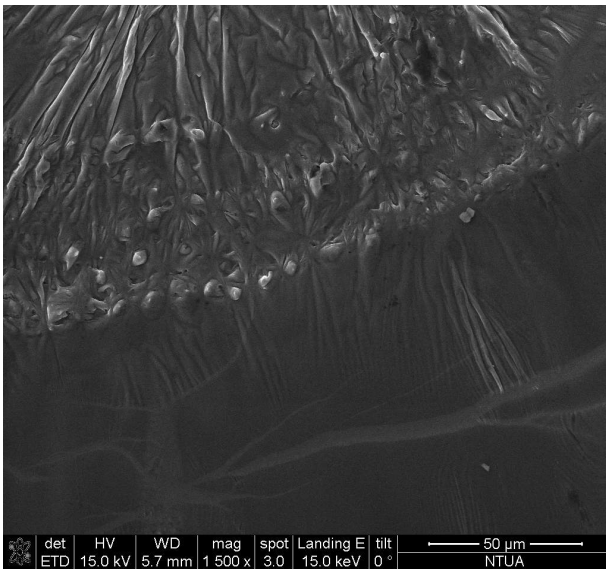
Εικόνα 97: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέση, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 300X.



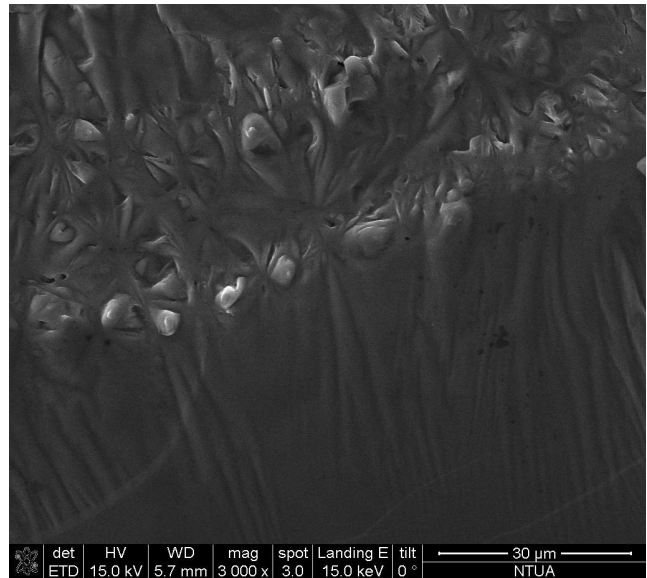
Εικόνα 98: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέση, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 600X.

Φαίνεται δηλαδή, στην περίπτωση της μεγάλης μεγέθυνσης, ο κρατήρας αποδόμησης που έχει προκληθεί στην επιφάνεια, να αποκτά στο κέντρο του, μια υπερυψωμένη αναδόμηση, ως αποτέλεσμα της έντονης ακτινοβολήσης. Είναι χαρακτηριστικό πως στο κέντρο του κρατήρα, φαίνεται να έχει προκληθεί ένα έντονο “όρος” (εικόνα 11), σε διαφορετικό επίπεδο από την υπόλοιπη περιφέρεια.

Μια μετακίνηση στην περιφέρεια της αποδομημένης περιοχής, δίνει περισσότερη πληροφορία σχετικά με τα φαινόμενα αποδόμησης που πραγματοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, στην άκρη, υπό μεγέθυνση 1.500X, αποτυπώνεται μια περιοχή:

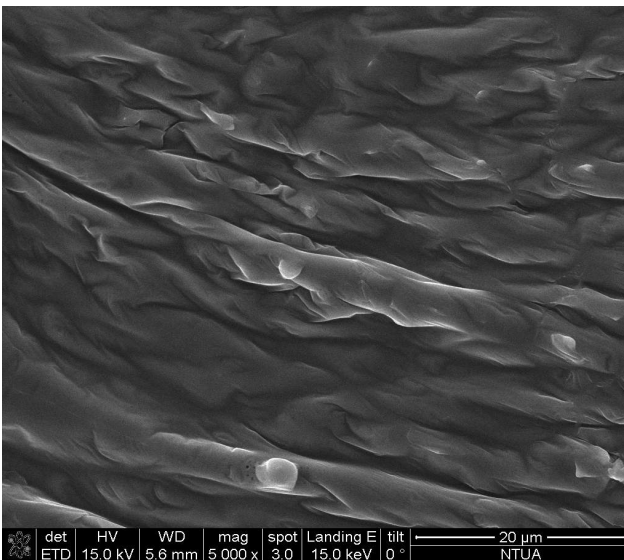


Εικόνα 100: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 1.500X ,περιφέρεια δακτυλίου.

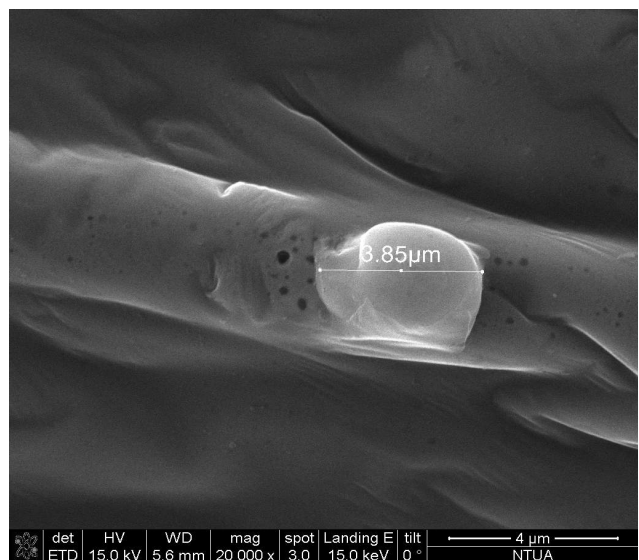


Εικόνα 99: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 3.000X zoom ,περιφέρεια δακτυλίου.

Οι περιφερειακές δομές φαίνεται να έχουν αναπτυχθεί με μια παρόμοια γεωμετρία, με μια “ινώδη” διάταξη, με απολήξεις στο κέντρο του κρατήρα. Αυτές οι αναδομημένες περιοχές, έχουν πλάτος γύρω στα 5μm και πυκνή διάταξη. Στις επόμενες καταγραφές, διακρίνεται καλύτερα η μορφολογία τους και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά:



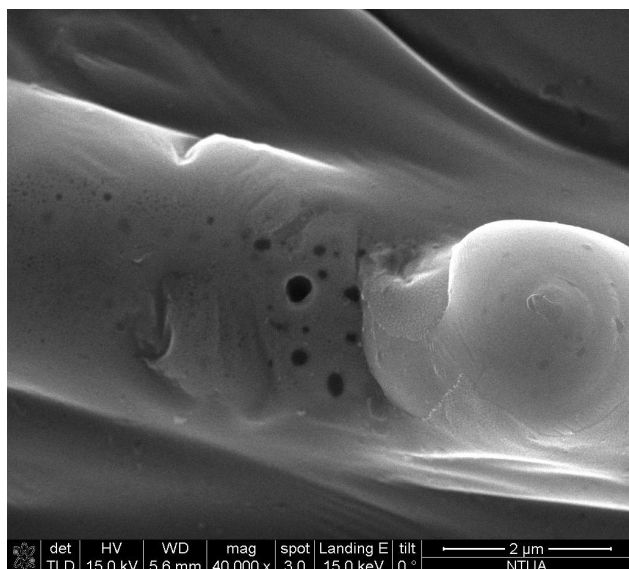
Εικόνα 101: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 5000X zoom, εσωτερικό κρατήρα, τυχαίο σημείο.



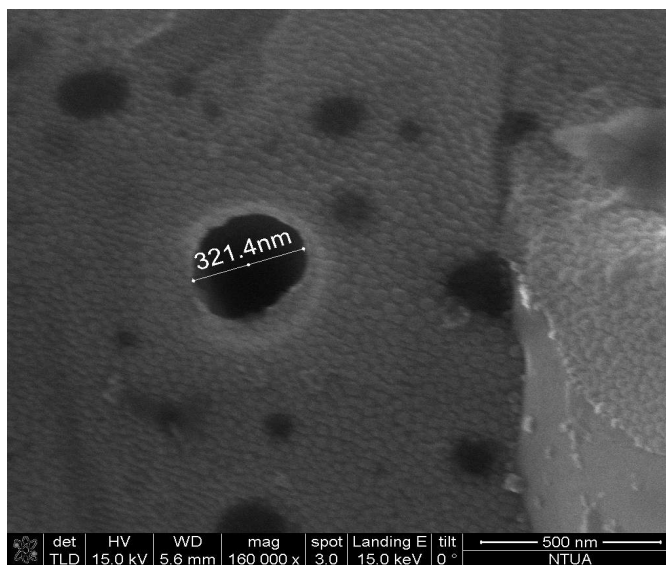
Εικόνα 102: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 20000X zoom, εσωτερικό κρατήρα, τυχαίο σημείο.

Φαίνεται η “ινώδης” διάταξη, αν και σχετικά ομοιόμορφη, προκαλεί μια έντονη τραχύτητα

στην επιφάνεια, καθώς διακρίνονται αιχμές ή μικρές χαραγές, αλλά και κάποιες περισσότερο ασαφείς περιοδικές δομές, με διάμετρο περίπου 4 μm (εικόνα 15). Μια μεγαλύτερη μεγέθυνση της περιοχής που μελετάται, αποτυπώνεται στις αμέσως επόμενες καταγραφές:



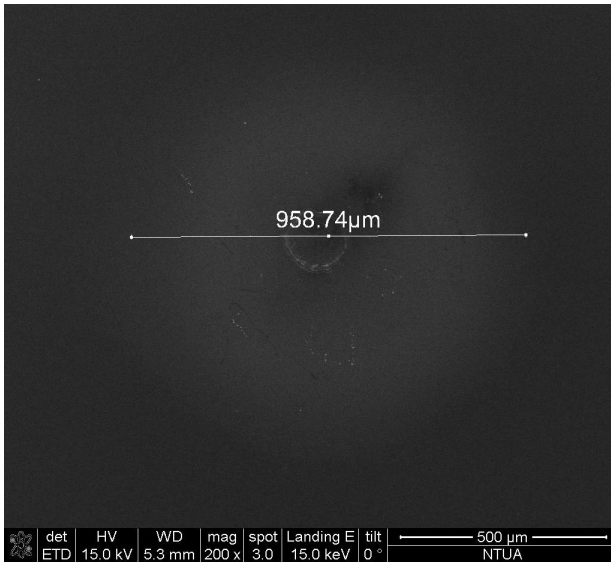
Εικόνα 103: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 40000X zoom, εσωτερικό κρατήρα, τυχαίο σημείο.



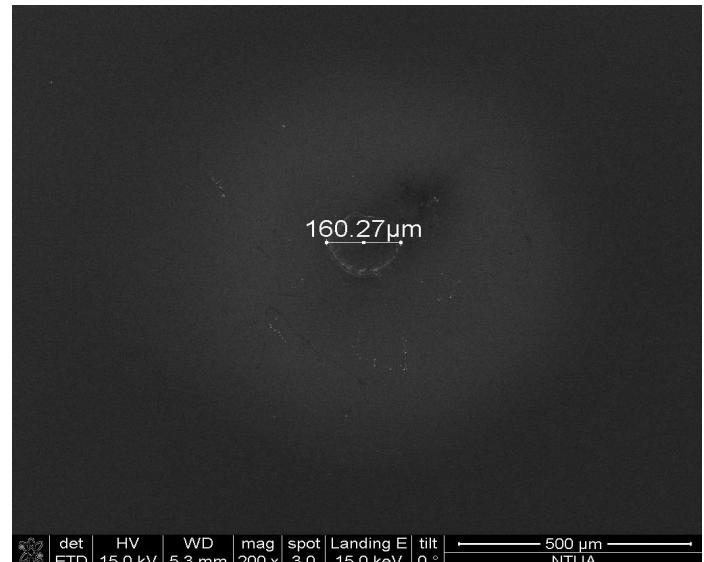
Εικόνα 104: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 166,6 mJ, 160000X zoom, εσωτερικό κρατήρα, τυχαίο σημείο.

Κοντά στις αποχρωματισμένες δομές που περιγράφηκαν λίγο πιο πάνω (εικόνα 102) με διάμετρο 4 περίπου μm , παρατηρούνται κάποιες μικρές κυκλικές κοιλότητες, με έντονα εντοπισμένη τοπικότητα και μέση διάσταση περίπου 200-300 nm (εικόνα 104).

Στη περίπτωση που η τιμή της ενέργειας της δέσμης περιοριστεί στα 8,3 mJ, προκαλείται και πάλι εμφανής αποδόμηση, η οποία μελετάται διεξοδικά στον κρατηρα, στην περιφέρειά της, με μεγαλύτερη μεγέθυνση που φανερώνει κάποια ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της αποδόμησης. Έτσι, για τα 8,3 mJ, στην εστία ,έχουμε:



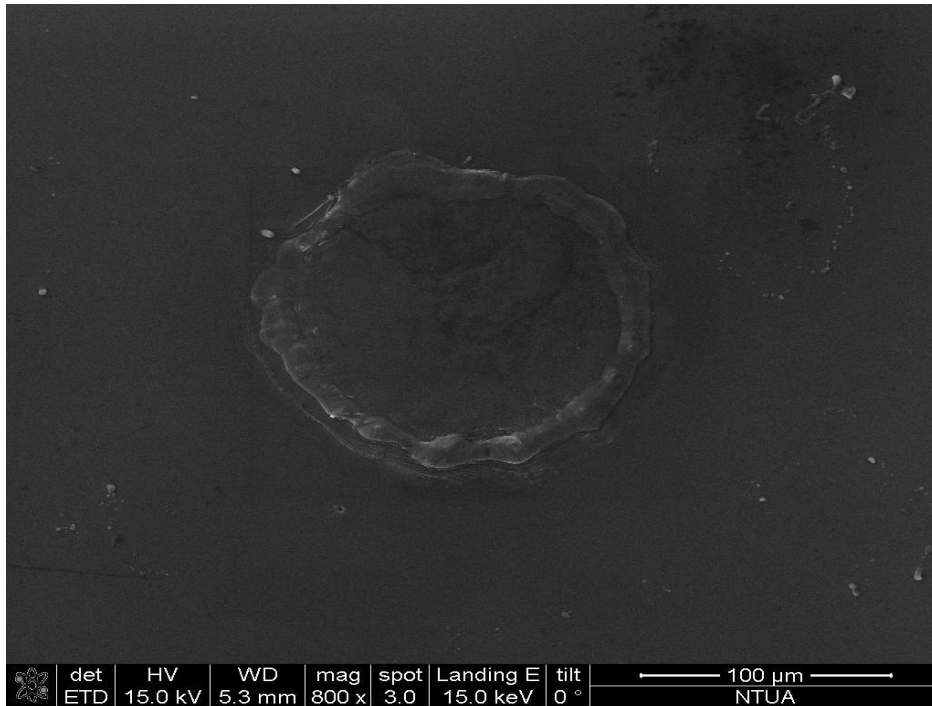
Εικόνα 105: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 200X zoom, εξωτερική διάμετρος.



Εικόνα 106: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 200X zoom, εσωτερική διάμετρος (160,27 μm).

Συγκρίνοντας τις εικόνες 105 και 106 με τις 95 και 96 αντίστοιχα, είναι εμφανές πως η έντονα αποδομημένη περιοχή έχει περιοριστεί χωρικά σε μια μικρότερη περιοχή διαμέτρου 160 μm, αλλά η διάμετρος της ακτινοβολημένης περιοχής, διατηρείται περίπου στο 1mm. Απόρροια των παραπάνω, είναι η αύξηση του εσωτερικού, αποχρωματισμένου δακτυλίου στα 800 μm περίπου. Με λίγα λόγια, με μικρότερη έξοδο στο laser, πραγματοποιείται ίδια μεν διάμετρος ακτινοβολήσης, αλλά περιορίζεται η έντονα αποδομημένη περιοχή και ενισχύεται η περιοχή με την μικρότερη θερμική επίδραση.

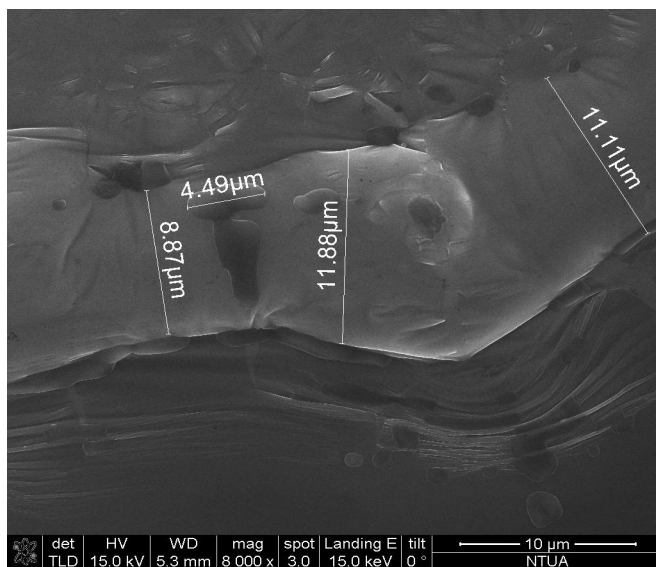
Μεγεθυνόντας περισσότερο στην περιοχή της αποδόμησης, διακρίνονται καλύτερα οι λεπτομέρειες του παλμού, όπως φαίνεται και στην καταγραφή που ακολουθεί:



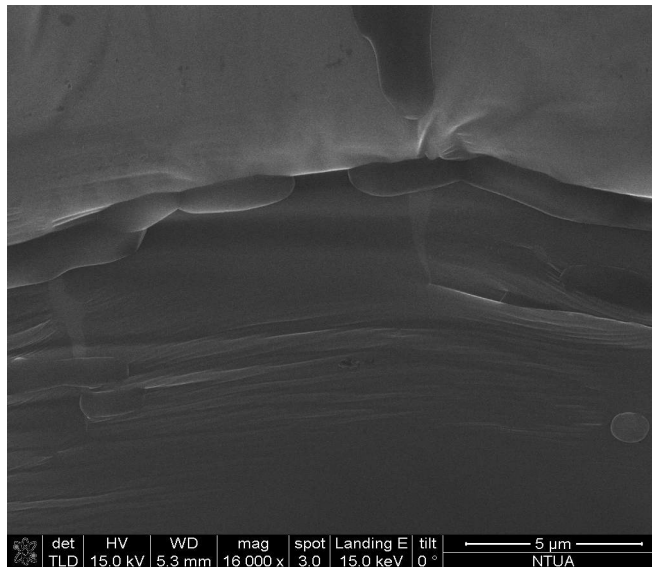
Εικόνα 107: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 800X zoom , κρατήρας αποδόμησης.

Διακρίνεται ο κρατήρας αποδόμησης, με έντονα αναπτυγμένο και πιθανόν ανυψωμένο τον κλειστό περιφερειακό του δακτύλιο και ελλειψοειδή γεωμετρία. Συγκρίνοντας την εικόνα 107, με τις εικόνες 97 και 98, παρατηρείται άμβλυνση της τραχύτητας και αναδόμησης του κρατήρα. Σε αντίθεση με την έντονη ακτινοβολία των ενέργειας 166,6 mJ, εδώ δεν παρατηρείται έντονη ανάπτυξη “ινώδων” τμημάτων αλλά έντονος και εμφανής αποχρωματισμός.

Λόγω της εμφανούς ανάπτυξης του κλειστού περιφειακού δακτυλίου (χείλος), πραγματοποιήθηκαν λήψεις περισσότερο μεγενθυμένες στην περιοχή, ώστε να αναλυθεί καλύτερα το φαινόμενο της αποδόμησης. Έτσι, προκύπτει:



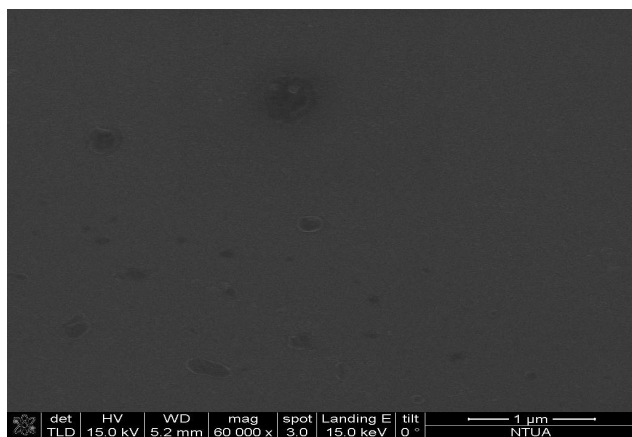
Εικόνα 109: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 8.000X zoom, κρατήρας αποδόμησης, πάχος "χείλους".



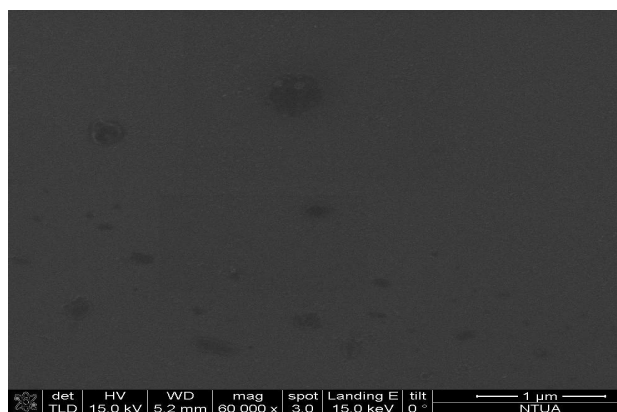
Εικόνα 108: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 16.000X zoom, κρατήρας αποδόμησης, εξωτερικό "χείλος".

Το έντονο και πιθανά ανυψωμένο "χείλος" της περιφέρειας του κρατήρα αποδόμησης, έχει περίπου πάχος 10 μm και διακρίνεται ότι εσωτερικά αλλά και εξωτερικά του, έχει υποστεί αναδιάταξη σε αυτήν την περιοχή. Διακρίνονται και πάλι κάποιες περιοχές με μια "ινώδη" τραχύτητα, απισχασμένες όμως σε σύγκριση με την δεσμη ενέργειας δέσμης 166,6 mJ.

Διερευνώντας τις περιοχές εκτός του κρατήρα αποδόμησης, αντλούνται οι παρακάτω καταγραφές:

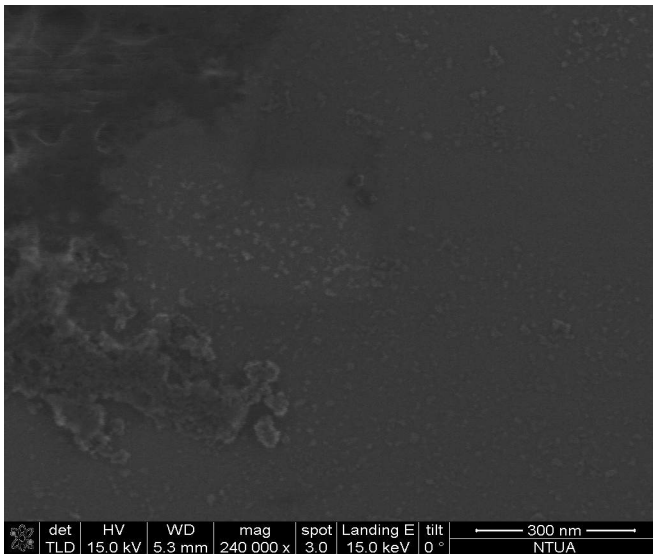


Εικόνα 110: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 60.000X zoom, περιοχή εξωτερικά του κρατήρα αποδόμησης.

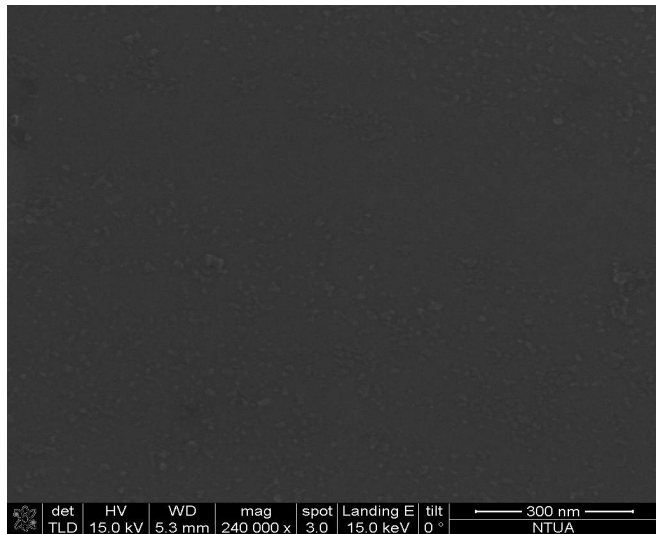


Εικόνα 111: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 60.000X zoom, περιοχή εξωτερικά του κρατήρα αποδόμησης.

Μεγενθύνοντας ακόμη περισσότερο (με μεγέθυνση στις 240.000X) στη διερευνηθείσα περιοχή εκτός του δακτυλίου αποδόμησης, προκύπτει η εμφάνιση των παρακάτω δομών:



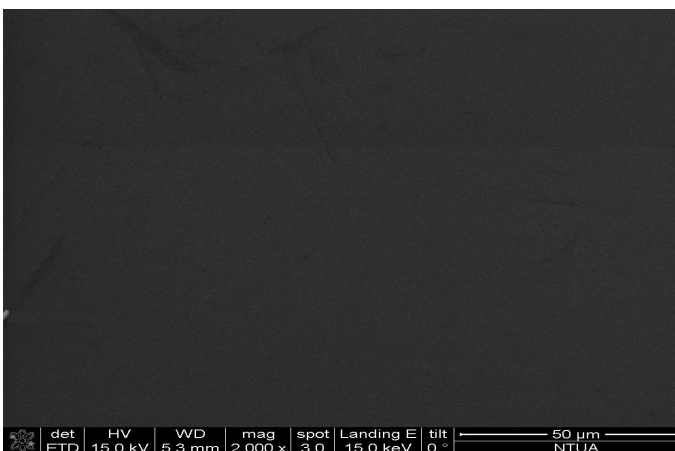
Εικόνα 112: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 240.000X zoom, περιοχή εξωτερικά του κρατήρα αποδόμησης.



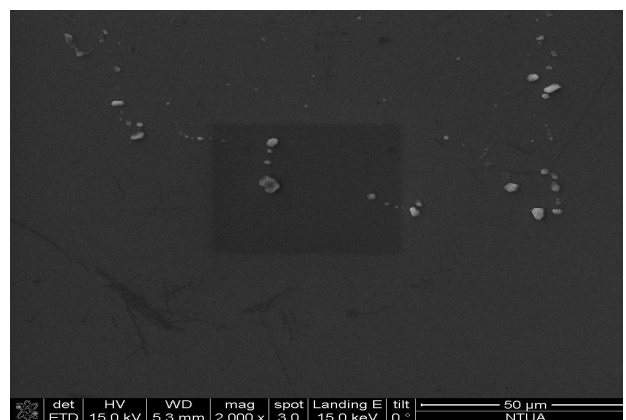
Εικόνα 113: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 240.000X zoom, περιοχή εξωτερικά του κρατήρα αποδόμησης.

Παρατηρούνται κάποιες “κοκκώδεις” δομές, σχετικά πυκνές μεταξύ τους, πυκνότερες σε σημεία πιο κοντά προς το κέντρο της δέσμης. Οι πιο έντονες και μεγαλύτερες δομές, πιθανό να περιέχουν τήγματα και ανακρυσταλλωμένα τμήματα (ή θραύσματα) της ακτινοβολημένης επιφάνειας.

Μετατοπίζοντας τη δέσμη του μικροσκοπίου προς το κέντρο του κρατήρα, επιχειρείται να μελετηθεί διεξοδικά υπό μεγέθυνση, αυτό το κομμάτι της ακτινοβολημένης επιφάνειας.

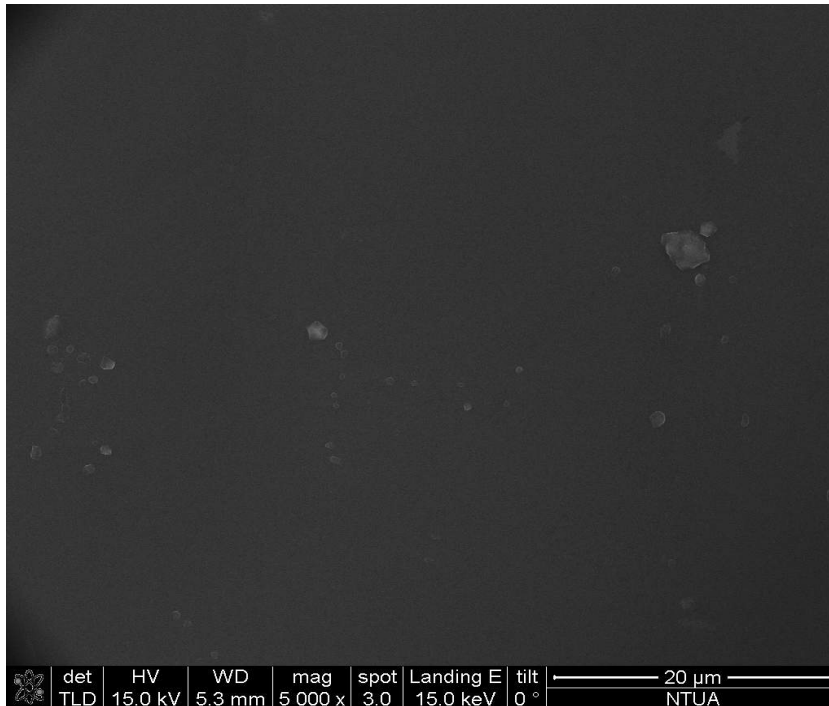


Εικόνα 115: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 2.000X zoom, περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.



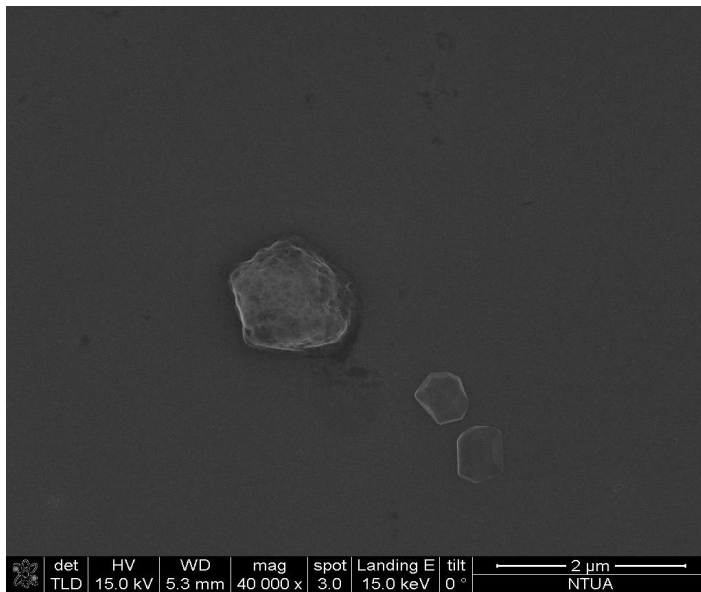
Εικόνα 114: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 2.000X zoom, περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.

Στις παραπάνω απεικονίσεις, η μεγέθυνση είναι ακόμη σχετικά μικρή, ωστόσο διακρίνεται ένας ελαφρύς αποχρωματισμός στην επιφάνεια καθώς και η ανάπτυξη κάποιων άτακτων δομών. Ενισχύοντας τη μεγέθυνση, διακρίνονται καλύτερα οι δομές που αναπτύχθηκαν στο μέσον του κρατήρα:

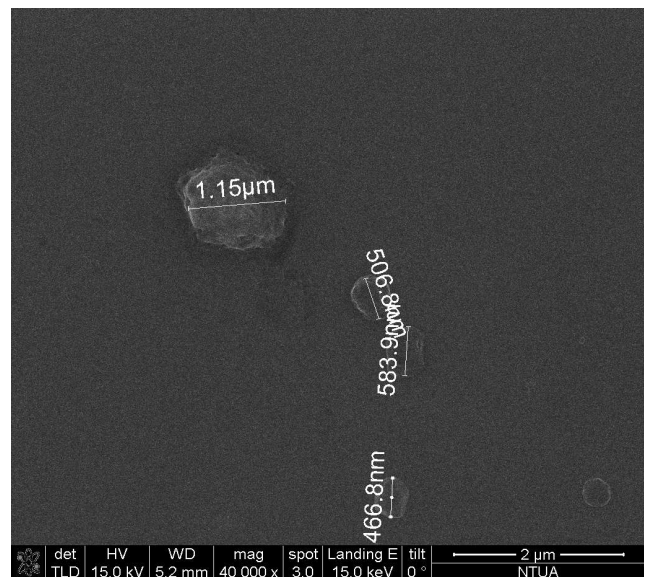


Εικόνα 116: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 5000X zoom, περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.

Μία ακόμη μεγαλύτερη μεγέθυνση ώστε να παρατηρηθούν οι δομές που διακρίνονται στην “εικόνα 29”, δίνει πληροφορίες για το μέγεθος, τη διάταξη και τα χαρακτηριστικά τους.



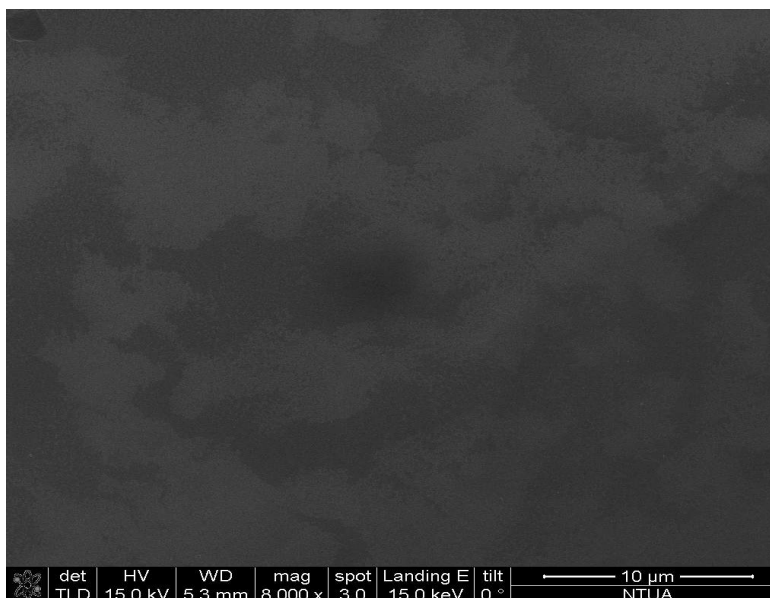
Εικόνα 117: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 40000X zoom, περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.



Εικόνα 118: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 40000X zoom, περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης, διαστάσεις δομών.

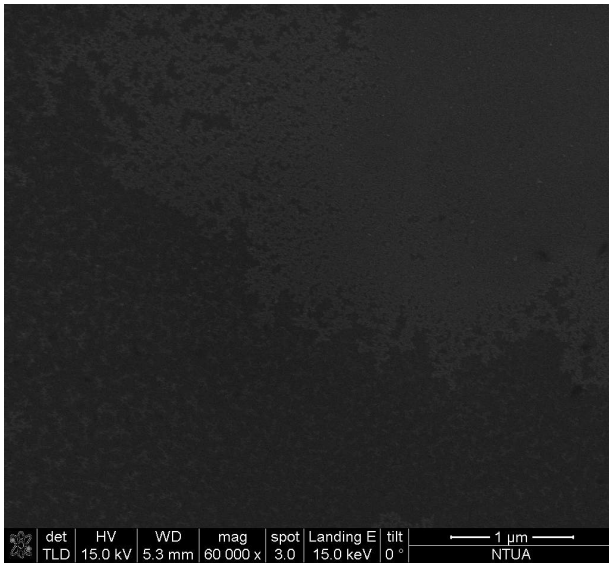
Οι παραπάνω δομές πιθανό να αποτελούν τηγμένα και ανακρυσταλλωμένα θραύσματα, που προέκυψαν από την παλμική ακτινοβολή, παρουσιάζουν σφαιρική δομή, με διαστάσεις μικρότερες του 1 μm.

Όσον αφορά την περιοχή που δε διακρίνονται σφαιρικές δομές αλλά παρατηρείται αποχρωματισμός, μελετήθηκε και αυτή και παρατίθεται :

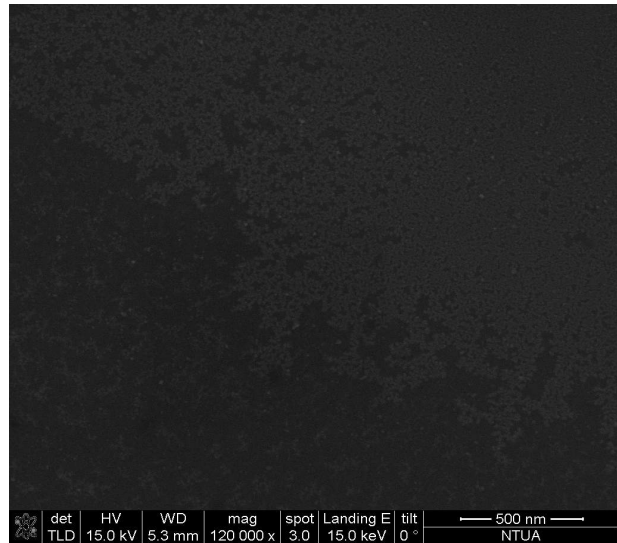


Εικόνα 119: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 8.000X zoom, αποχρωματισμένη περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.

Με χρήση ενισχυμένης μεγέθυνσης, αρχικά 60.000X και στη συνέχεια 120.000X, επιχειρήθηκε να μελετηθεί η ασαφής, ελαφρώς αποχρωματισμένη περιοχή:

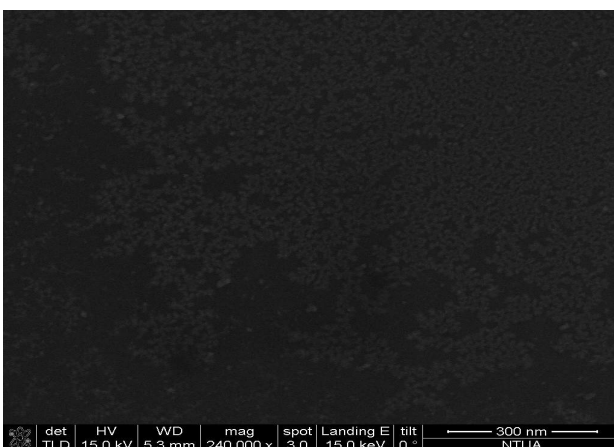


Εικόνα 121: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 60.000X zoom, αποχρωματισμένη περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.

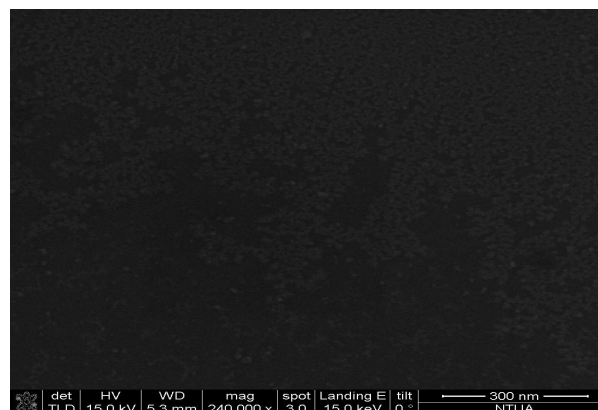


Εικόνα 120: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 120.000X zoom, αποχρωματισμένη περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.

Στις τελευταίες 2 καταγραφές (εικόνες 120, 121), παρατηρείται μια σχετική ομοιότητα της μορφολογίας εντός του κρατήρα αποδόμησης, με αυτήν εκτός του κρατήρα αποδόμησης (εικόνες 112 – 113). Ο αποχρωματισμός δηλαδή, παρουσιάζεται ξανά ως μια κοκκώδης αναδόμηση μεγάλης πυκνότητας και ομοιομοφίας. Μια απόπειρα ευκρινέστερης καταγραφής της μορφολογίας της δομής σε λειτουργία μεγαλύτερης μεγέθυνσης, απεικονίζεται στις επόμενες 2 λήψεις:



Εικόνα 123: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 240.000X zoom, αποχρωματισμένη περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης.



Εικόνα 122: Αποδόμηση με Nd:YAG, 1064 nm, εστιασμένη δέσμη, 1 παλμός, ενέργειας 8,3 mJ, 240.000X zoom, αποχρωματισμένη περιοχή στο μέσον του κρατήρα αποδόμησης, περιοχή II.

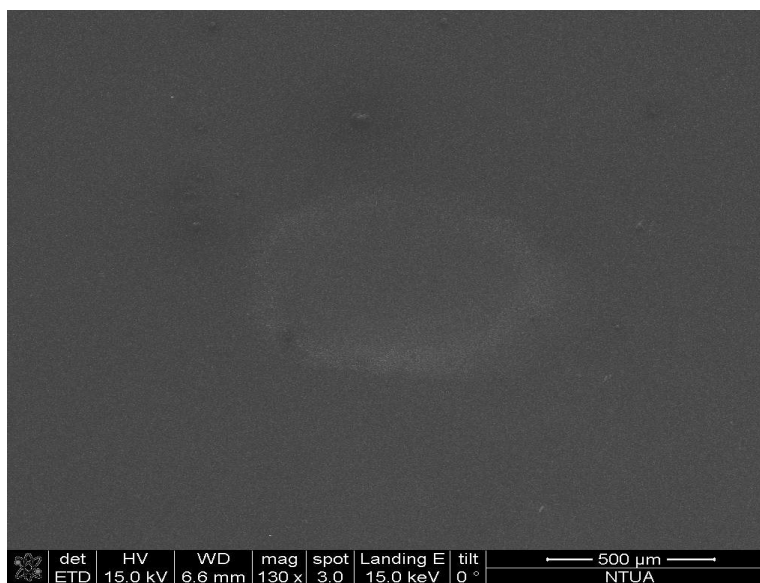
Και σε αυτήν την περίπτωση, παρόλη την εξαιρετικά μεγάλη μεγέθυνση, η μορφολογία διακρίνεται με τα ίδια χαρακτηριστικά όπως στις προηγούμενες καταγραφές (εικόνες 120-121).

Συνοψίζοντας, μελετήθηκε μορφολογικά ακτινοβολήση (δείγματος 38N) παλμικού laser Nd:YAG στα 1064 nm, σε εστιασμένη θέση, με ενέργεια δέσμης 8,3 mJ αλλά και 166,6 mJ, για έναν παλμό για την κάθε περίπτωση. Η αποδόμηση προκλήθηκε και στις 2 παραμέτρους ακτινοβολήσης, με εξωτερική διάμετρο της αποδομημένης περιοχής περίπου στο 1 mm. Στην περίπτωση της μέγιστης τιμής ενέργειας 166,6 mJ, η έντονη αποδόμηση ήταν περισσότερο διευρυμένη χωρικά, ενώ στην ελάχιστη τιμή ενέργειας 8,3 mJ, η έντονη ακτινοβολήση ήταν χωρικά περιορισμένη (160 μm). Επιπρόσθετα, στην έντονη ακτινοβολήση, ο κρατήρας αποδόμησης εμφάνισε δομές με έντονη “ινώδη τραχύτητα”, ενώ στην περιορισμένη ακτινοβολήση, παρατηρήθηκε κυρίως έντονος αποχρωματισμός, ως αποτέλεσμα μικρών πυκνωμένων “κόκκων”.

Μορφολογικός χαρακτηρισμός δειγμάτων από TEA: CO₂ laser

Με τον ίδιο τρόπο, επιχειρείται μορφολογική ανάλυση των δειγμάτων που έχουν υποστεί ακτινοβολήση με παλμικό CO₂ laser.

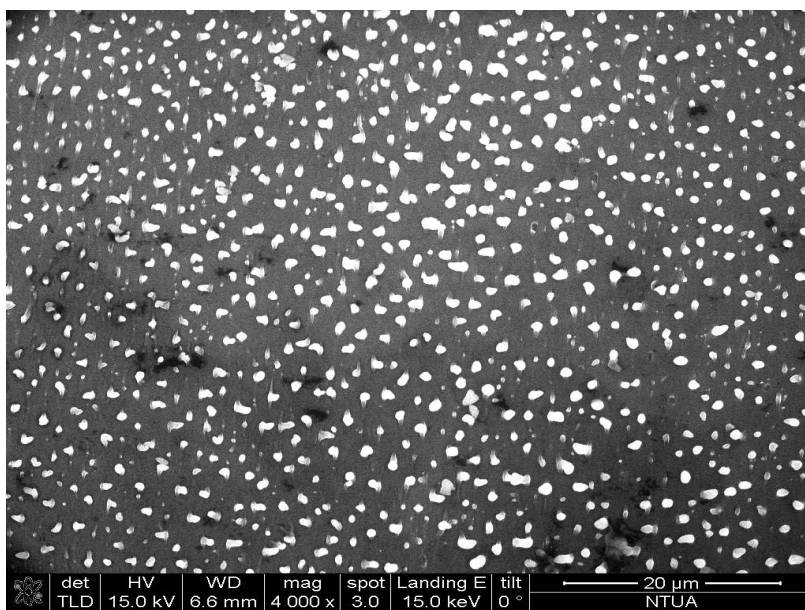
Αρχικά, μελετήθηκε και χαρακτηρίστηκε ένα δείγμα 38N που είχε υποστεί ακτινοβολήση με 200 συνεχόμενους παλμούς στην εστία. Η αποδόμηση ήταν εμφανής και εκτεταμένη δια γυμνού οφθαλμού, εξετάστηκε όμως, ώστε να υπάρχει μια συγκρίσιμη αποδόμηση με αυτήν του Nd:YAG laser που μελετήθηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα, είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 124: Αποδόμηση με CO₂ laser, 10,6 μm, εστιασμένη δέσμη, 200 παλμοί, ενέργειας 86,6 mJ, 130X zoom.

Μια πρώτη καταγραφή με μικρή μεγέθυνση που στόχευε να δείξει την γενική μορφολογία του παλμού, δείχνει ότι η μικρή απορροφησιμότητα του δείγματος στο μήκος κύματος εκπομπής του CO₂ laser, παρουσιάζει λιγότερο έντονη αποδόμηση σε σχέση με τα 1064 nm. Το πλαίσιο σύγκρισης αφορά τόσο την εικόνα αυτή καθ'αυτή, αλλά και τις παραμέτρους ακτινοβολίας. Αυτή τη φορά, το δείγμα έχει δεχτεί 200 συνεχόμενους παλμούς, σε αντίθεση με το μοναδικό παλμό ακτινοβολίας στα 1064 nm. Επιπλέον, μια σύγκριση της εικόνας “124” με τις εικόνες “95” και “96”, φανερώνει ότι η εσωτερική αποδόμηση είναι περισσότερο ομοιόμορφη στην εικόνα “124”, χωρίς να παρουσιάζει 2 διακριτές περιοχές εντονότερης και ηπιότερης θερμικής επίδρασης όπως στη περίπτωση των “95” και “96”.

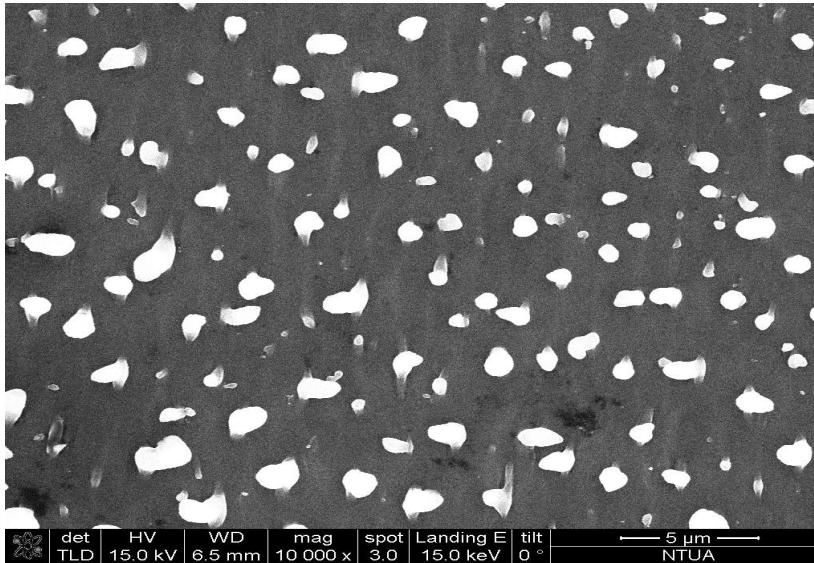
Ο παλμός έχει διάμετρο περίπου 700 μm και στις επόμενες, μεγενθυμένες καταγραφές, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μορφολογία του δακτυλίου του:



Εικόνα 125: Αποδόμηση με CO₂ laser, 10,6 μm, εστιασμένη δέσμη, 200 παλμοί, ενέργειας 86,6 mJ, 4000X zoom, δακτύλιος κρατήρα αποδόμησης.

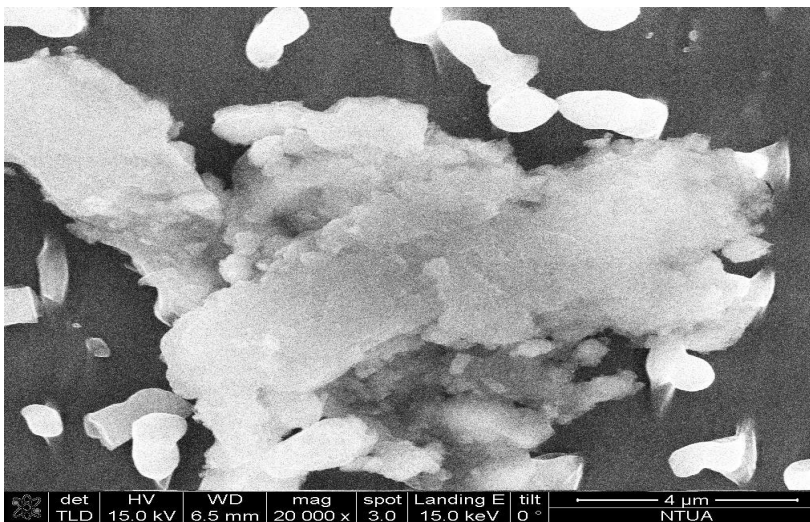
Στην εικόνα 125 που αφορά καταγραφή στο δακτύλιο της αποδόμησης, παρατηρείται ένας έντονος μετασχηματισμός, με την ανάπτυξη δομών ιδιαίτερα πυκνών, ομοιόμορφα διατεταγμένων, ελλειπτικής γεωμετρίας, διαμέτρου περίπου 1-2 μm, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1-2 μm.

Με την πραγματοποίηση ακόμα μεγαλύτερης μεγέθυνσης, καταγράφεται:



Εικόνα 126: Αποδόμηση με CO₂ laser, 10,6 μm, εστιασμένη δέσμη, 200 παλμοί, ενέργειας 86,6 mJ, 10000X zoom, πυκνές δομές.

Η εικόνα δε δίνει περισσότερη πληροφορία για τη μορφολογία των δομών αυτών, γι' αυτό και εκτελείται μέτρηση με μεγαλύτερη τιμή μεγέθυνσης:

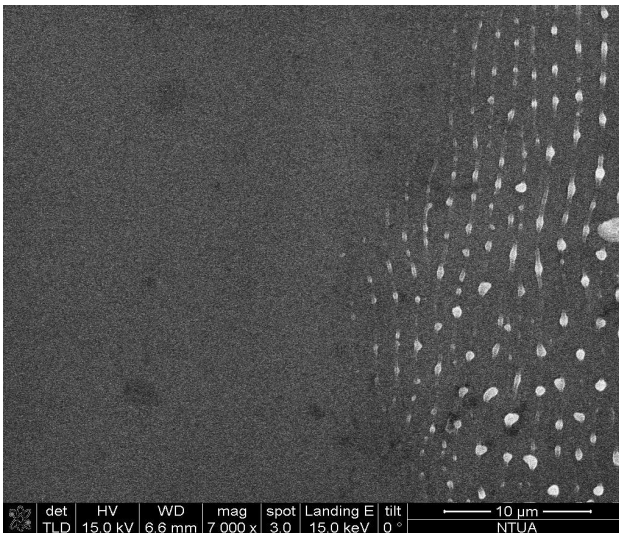


Εικόνα 127: Αποδόμηση με CO₂ laser, 10,6 μm, εστιασμένη δέσμη, 200 παλμοί, ενέργειας 86,6 mJ, 20000X zoom, πυκνές δομές.

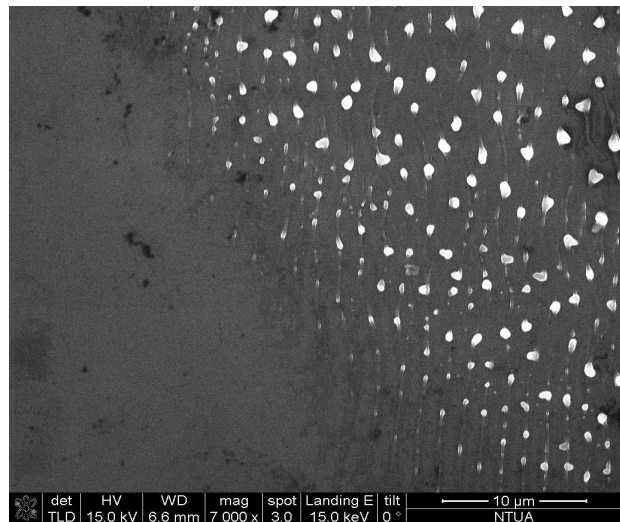
Εντοπίστηκε μια περιοχή μεγαλύτερη και περισσότερο ασαφής μορφολογικά, με μήκος περίπου 10 μm. Η δομή αυτή, γεινιάζει με τις ελλειπτικές δομές που παρατήρηθηκαν στις λήψεις

“125” και “126”, και ίσως αποτελεί κάποιο συσσωμάτωμά τους. Παρόλα αυτά, πέρα από αυτήν την εντοπισμένη ιδιαιτερότητα στην ολότητα της εξεταζόμενης επιφάνειας, η ομοιομορφία της αναδομημένης περιοχής, με τα μικρά, ισαπέχοντα ελλειψοειδή, είναι άξια αναφοράς.

Στην περίπτωση που το μικροσκόπιο στραφεί στο “χείλος” του κρατήρα αποδόμησης, το αποτέλεσμα θα έχει τη μορφή των παρακάτω απεικονίσεων:



Εικόνα 128: Αποδόμηση με CO₂ laser, 10,6 μm, εστιασμένη δέσμη, 200 παλμοί, ενέργειας 86,6 mJ, 7.000X zoom, πυκνές δομές, χείλος κρατήρα, περιοχή I.



Εικόνα 129: Αποδόμηση με CO₂ laser, 10,6 μm, εστιασμένη δέσμη, 200 παλμοί, ενέργειας 86,6 mJ, 7.000X zoom, πυκνές δομές, χείλος κρατήρα, περιοχή II.

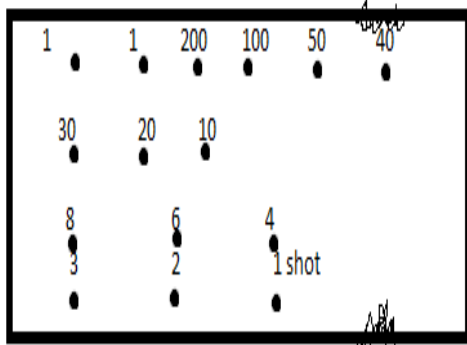
Αν και η μεγέθυνση είναι μικρότερη σε σχέση με την “εικόνα 127”, παρατηρείται ότι οι δομές αυτές ακολουθούν μια περιοδικότητα 2 μm περίπου και στοιχίζονται σε κατακόρυφες γραμμές.

Αυτή η λεπτομέρεια, προκαλεί εύλογες συγκρίσεις με τις δομές που παρατηρήθηκαν στις εικόνες “102” και “103” για την ακτινοβόληση με Nd:YAG laser. Εκεί, διακρίνονταν κάποιες “ινώδεις” δομές, με ενσωματωμένες σφαιρικές, έντονα αποχρωματισμένες μορφοποιήσεις πάχους 4 μm. Ίσως αν πραγματοποιούνταν μια πιο έντονη ακτινοβόληση με CO₂ laser, με εκτεταμένη αποδόμηση του δείγματος, να μαρτυρούσε περισσότερη πληροφορία σχετικά με τη μορφή και τις συνθήκες εμφάνισης τέτοιων δομών.

Από την άλλη, είναι εξαιρετικά εμφανής, η απίσχναση των δομών αυτών όταν απομακρύνονται από το κέντρο της δέσμης, φτάνοντας να περιοριστούν ολοκληρωτικά, λίγο πέρα από τον δακτύλιο αποδόμησης.

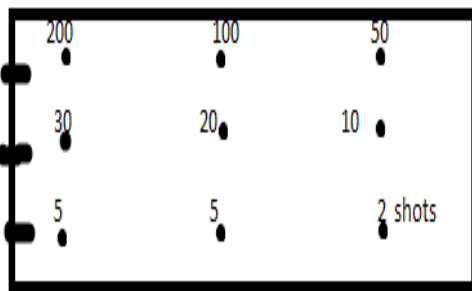
Ακολούθησε χαρακτηρισμός δειγμάτων 38N που δεν είχαν υποστεί κάποια εμφανή

αποδόμηση. Για τα δείγματα αυτά, που αριθμούνται στα 4, περιγράφηκε και ταξινομήθηκε λεπτομερώς το πρωτόκολλο ακτινοβόλησης τους, στο κεφάλαιο 3. Παρατίθεται εκ νέου η τοπολογία των δειγμάτων, προς πλήρη κατανόηση της διαδικασίας.



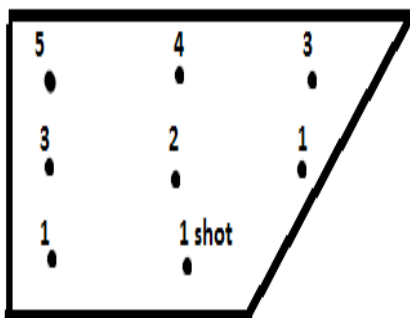
Δείγμα 1. 4 εκατοστά αφεστιαση,χωρις προθερμανση,

το βημα ηταν περιπου 4 mm οριζοντια, και 3 mm κατακορυφα για τη δευτερη γραμμη, και 2 mm κατακορυφα για την τριτη και τεταρτη γραμμη .μαρκαρισηκε με ενα σπασιματακι πανω και κατω στη δεξια μερια του wafer.



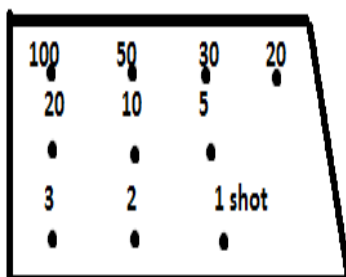
Δείγμα 2. 6 εκατοστά αφεστιαση,χωρις προθερμανση

το βημα ηταν περιπου 6 mm οριζοντια, και 4 mm κατακορυφα για την δευτερη γραμμη ,και 3mm για την τριτη γραμμη. Μαρκαριστηκε με τρεις οριζοντιες γραμμες αριστερα του wafer.



Δείγμα 3. 4 εκατοστά αφεστιαση, ΜΕ προθερμανση 400C.

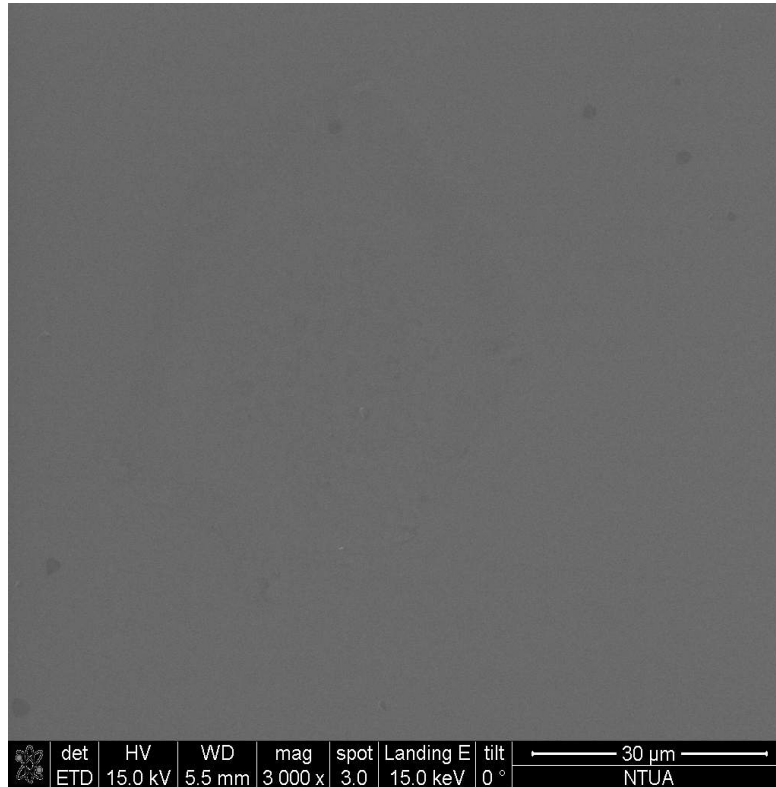
Το βημα ηταν περιπου 4 mm οριζοντια, και 3 mm κατακορυφα. Μαρκαριστηκε στη πισω μερια του, με το συμβολο "4 +".



Δείγμα 4. 6 εκατοστά αφεστιαση, ΜΕ προθερμανση ,400 C.

Το βημα ηταν περιπου 5 mm οριζοντια ,και 4 mm κατακορυφα για τη δευτερη σειρα ,και 3 mm κατακορυφα για τη τριτη σειρα. Μαρκαριστηκε στη πισω μερια του , με το συμβολο "6+"

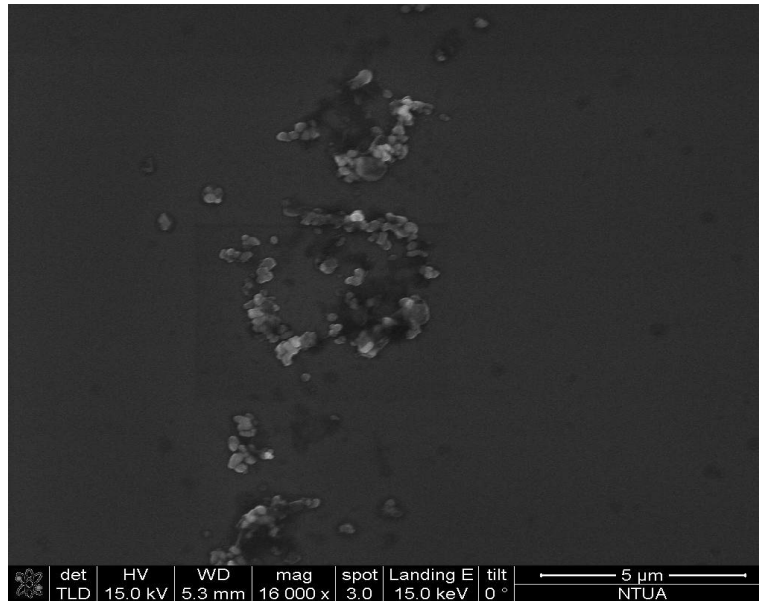
Το “δείγμα #1” λοιπόν, σαρώθηκε απο άκρη σε άκρη, προκειμένου να εντοπιστούν επιφανειακές αποδομήσεις. Τα σημεία που εντοπίστηκαν και φέρουν έναν ανεπαίσθητο αποχρωματισμό, είναι αυτά που ακολουθούν:



Εικόνα 130: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, ενέργειας 86,6 mJ, 3.000X zoom

Σε αυτό το σημείο, παρατηρήθηκε και καταγράφηκε ένας εξαιρετικά ελαφρύς αποχρωματισμός ελλειπτικής γεωμετρίας, με διάμετρο τα 40 περίπου μm. Ωστόσο, αυτός ο αποχρωματισμός είναι εξαιρετικά δυσδιάκριτος, αφού έγινε ανεπαίσθητα εμφανής σε τιμή μεγάλης μεγέθυνσης. Συγκρίνοντας την εικόνα “130” με τις εικόνες “93” και “94”, η μορφολογική διαφορά είναι εξαιρετικά μεγάλη. Είναι ενδεικτικό πως ο κρατήρας αποδόμησης για τις εικόνες “93” και “94”, γίνεται διακριτός με την ελάχιστη μεγέθυνση (μόλις 130X), ενώ σε αυτήν την περίπτωση η μεγέθυνση έχει αυξηθεί στις 3.000X, χωρίς όμως καμιά εμφανή αποδόμηση.

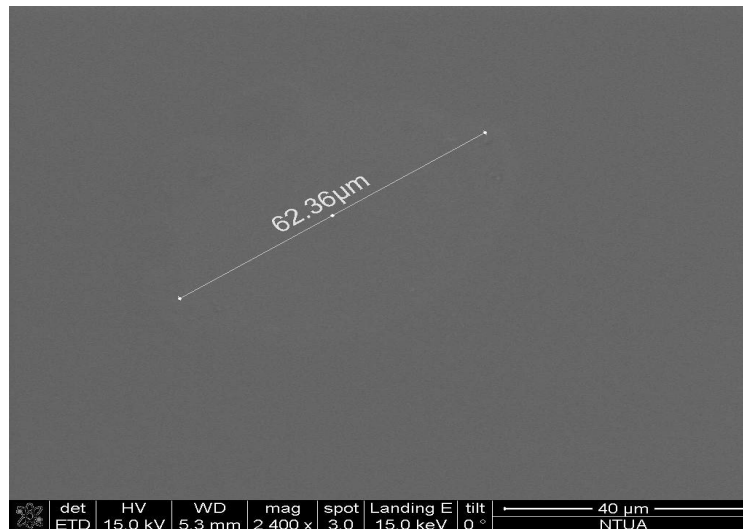
Η σάρωση της επιφάνειας του δείγματος #1 συνεχίστηκε και καταχωρήθηκαν επίσης οι εξής λήψεις:



Εικόνα 131: Δείγμα #1, ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, ενέργειας 86,6 mJ, 16.000X zoom, περιοχή II.

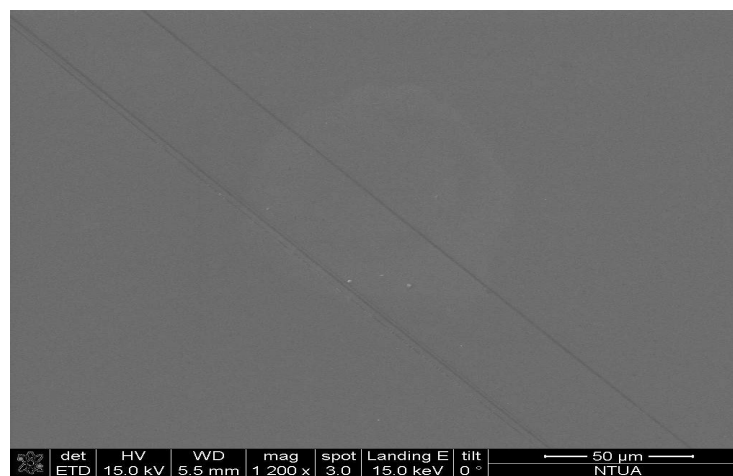
Στην εικόνα “131”, διακρίνονται κάποιες διάσπαρτες και σχετικά πυκνές δομές, αρκετά αποχρωματισμένες. Είναι γεγονός ότι φέρουν μορφολογικές ομοιότητες με αντίστοιχες δομές που καταγράφησαν στις εικόνες “117” και “118”, ωστόσο, οι δομές της εικόνας “131”, φαίνεται να είναι μικρότερες διαστασιολογικά. Με δεδομένο ότι δε παρατηρήθηκαν σε άλλο σημείο του “δείγματος #1”, πιθανολογείται ότι συνιστούν εξωγενείς αλλοιώσεις (οργανικά υπολείμματα, κατασκευαστικές ατέλειες) και όχι απαραίτητα αποτελέσματα ακτινοβόλησης.

Σε άλλο σημείο της επιφάνειας, εντοπίστηκε ένας άλλος ελλειπτικός αποχρωματισμός, που παρατίθεται:



Εικόνα 132: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, ενέργειας 86,6 mJ, 2.400X zoom, περιοχή III.

Και αυτήν τη φορά, ο αποχρωματισμός είναι εξαιρετικά ελαφρύς και δυσδιάκριτος, έχει διάμετρο περίπου 60 μm και εντοπίστηκε στη περιοχή, στην κάτω μεριά του δείγματος #1. Τέλος, για το ίδιο δείγμα, εντοπίστηκε ένα ακόμη σημείο με παρόμοια χαρακτηριστικά:



Εικόνα 133: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, ενέργειας 86,6 mJ, 1200X zoom, περιοχή IV.

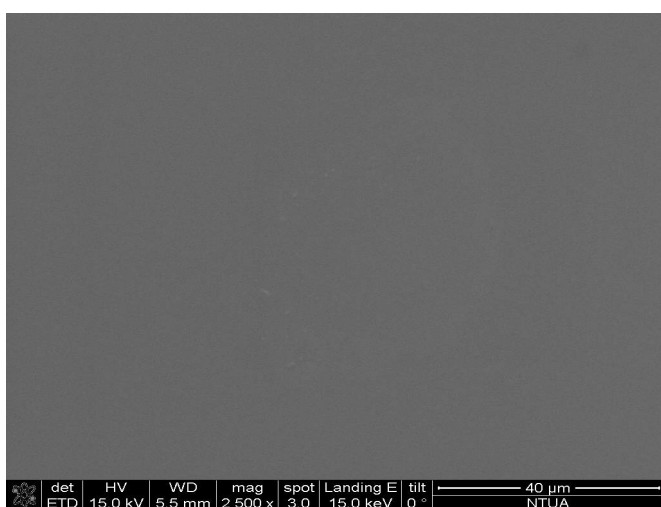
Η περιοχή IV, εντοπίστηκε στη κάτω πλευρά του δείγματος. Οι διαγώνιες γραμμές που διακρίνονται, οφείλονται σε επιφανειακές χαραγές.

Συνοψίζοντας, για το δείγμα #1, παρατηρήθηκαν και εντοπίστηκαν μόλις 4 ελαφρώς

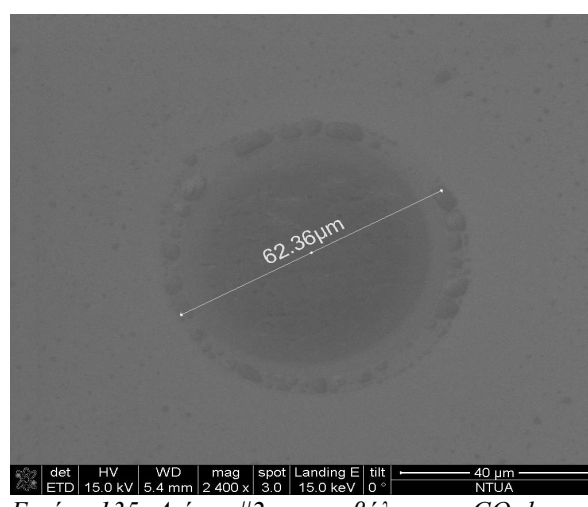
αλλοιωμένες περιοχές, με 3 απο τις 4 περιοχές, να εμφανίζουν έναν ελαφρύ αποχρωματισμό σε μια ακτίνα 60 περίπου μm . Λόγω του πλήθους των διαφορετικών ακτινοβολήσεων που πραγματοποιήθηκαν πάνω στην επιφάνεια του “δείγματος #1”, είναι δύσκολο να ταυτιστεί η θέση των ακτινοβολημένων περιοχών με τις αποχρωματισμένες περιοχές. Και το γεγονός είναι οτι οι αποχρωματισμένες περιοχές δεν παρατηρούνται ποσοτικά σε 15 διαφορετικές θέσεις, όπως θα μπορούσε να συμβεί λόγω των 15 διαφορετικών ακτινοβολήσεων που υπέστη το δείγμα.

Παρόλα αυτά, η μελέτη και των επόμενων δειγμάτων, θα δώσει περισσότερη πληροφορία για τα φαινόμενα αποδόμησης και κατ' επέκταση, την ενδεχόμενη θερμική ανόπτηση.

Το “δείγμα #2”, μελετήθηκε και χαρακτηρίστηκε με παρόμοιο τρόπο:

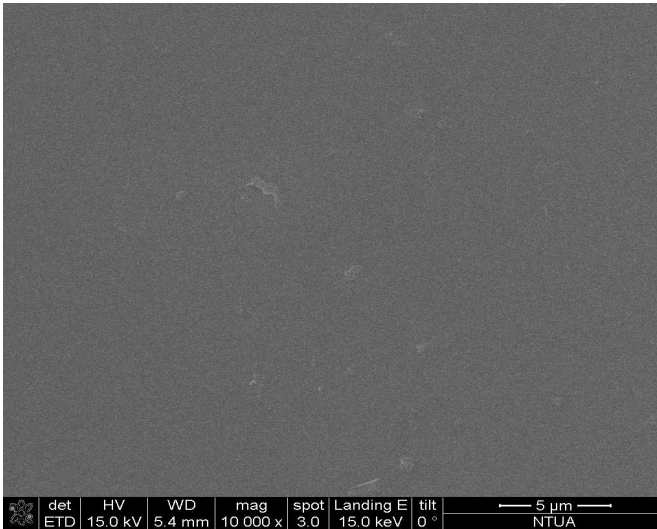


Εικόνα 134: Δείγμα #2, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 6 cm αφεστίασης, ενέργειας 86,6 mJ, 2.500X zoom, περιοχή I.

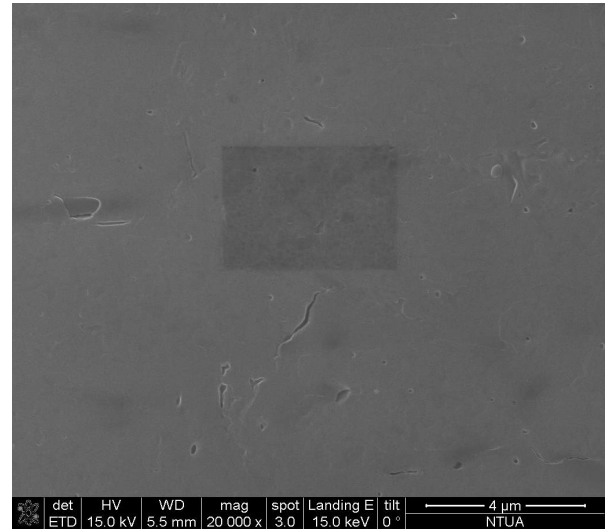


Εικόνα 135: Δείγμα #2, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 6 cm αφεστίασης, 27mJ/mm², 2.400 X zoom, περιοχή II.

Στην πρώτη περίπτωση, ο ελαφρώς αποχρωματισμένος δακτύλιος παρουσιάζει διάμετρο 30 περίπου μm , ενώ στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρείται μια περισσότερο έντονα αποχρωματισμένη περιοχή με διάμετρο 62 μm . Γι' αυτό το σημείο, δε μπορεί να γίνει απευθείας ταυτοποίηση του πλήθους των παλμών που υπέστη, παρά η καταγραφή των χαρακτηριστικών του. Ενισχύοντας τη μεγέθυνση σε 10.000X και 20.000X αντίστοιχα, διακρίνονται:



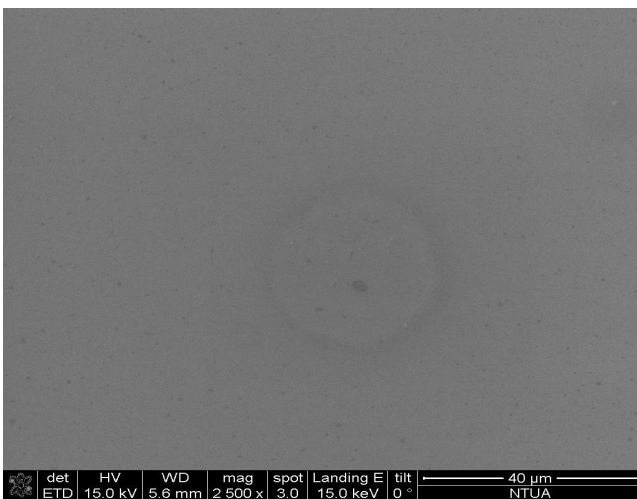
Εικόνα 136: Δείγμα #2, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 6 cm αφεστίασης, 27mJ/mm², 10.000X zoom, περιοχή III.



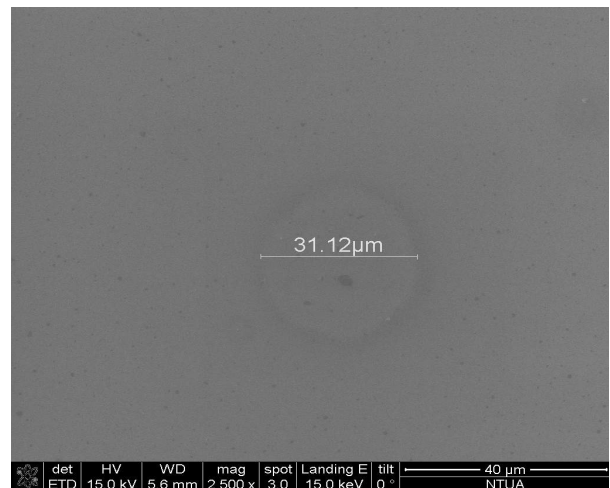
Εικόνα 137: Δείγμα #2, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 6 cm αφεστίασης, 27mJ/mm², 20.000X zoom, περιοχή IV.

Οι σχηματιζόμενες κηλίδες που γίναν διακριτές με μεγάλη μεγέθυνση, δύσκολα γίνονται διακριτές και ίσως αποτελούν οργανικά κατάλοιπα.

Το “δείγμα #3”, που αφορά ίδια πυκνότητα ενέργειας, αλλά έχει υποστεί προθέρμανση στους 400 °C, μελετήθηκε με τον ίδιο τρόπο. Τα αποτελέσματα της μέτρησης, παρατίθενται στις καταγραφές που ακολουθούν:



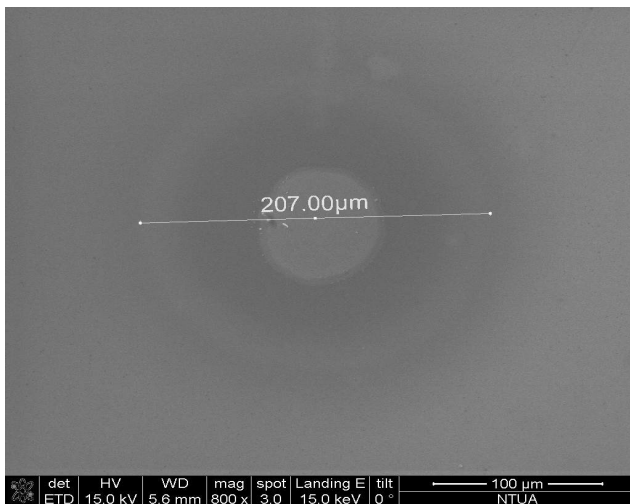
Εικόνα 139: Δείγμα #3, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 2500X zoom, περιοχή I.



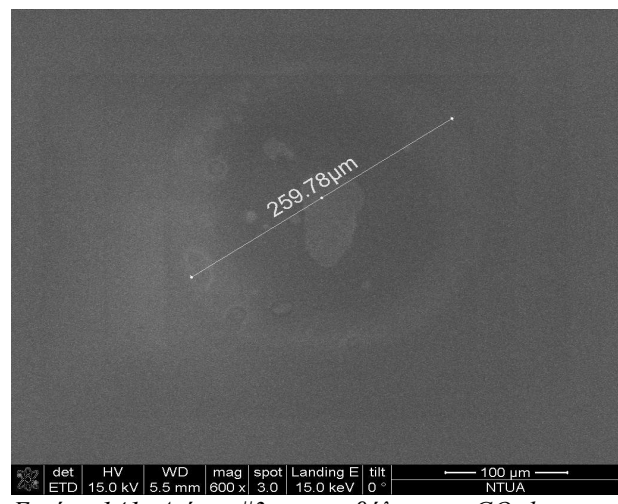
Εικόνα 138: Δείγμα #3, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 2500X zoom, περιοχή I, διαστάσεις.

Λόγω της μεγάλης αλλαγής απορροφησιμότητας εξ' αιτίας της προθέρμανσης με άμεση συνέπεια την αλλαγή στο κατώφλι αποδόμησης, το “δείγμα #3”, περιελάμβανε λιγότερους παλμούς σε πλήθος και σε εύρος. Είναι χαρακτηριστικό ότι η περιοχή μέγιστης θερμικής επίδρασης αφορούσε 5 μόλις διαδοχικούς παλμούς. Η “περιοχή Ι”, που εντοπίστηκε στις καταγραφές “138” και “139”, εντοπίζεται πάνω αριστερά στην κάτοψη του δείγματος.

Ίσως δηλαδή μπορεί να αποτελεί την ακτινοβολή που αφορά τους 5 παλμούς. Για το ίδιο δείγμα ,σε μια άλλη περιοχή, εντοπίστηκαν άλλοι 2 στιγματισμοί:

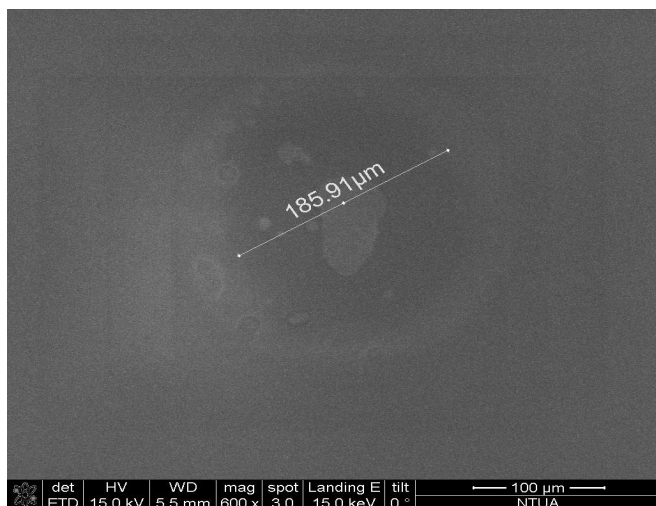


Εικόνα 140: Δείγμα #3, ακτινοβολή με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 800X zoom, περιοχή II.

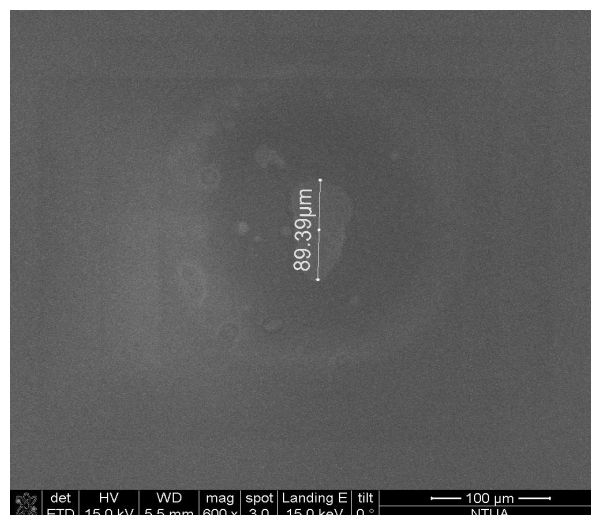


Εικόνα 141: Δείγμα #3, ακτινοβολή με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 600 X zoom, περιοχή III.

Η τελευταία απεικόνιση, εντοπίστηκε και χαρακτηρίστηκε με τη χρήση οπισθοσκεδαζόμενης δέσμης. Η εξωτερική διάμετρος φαίνεται να είναι στα 200 – 250 μm. Εκτενέστερη μελέτη στη περιοχή III της λήψης 54, δίνει τις παρακάτω διαστασιολογικές αναφορές:

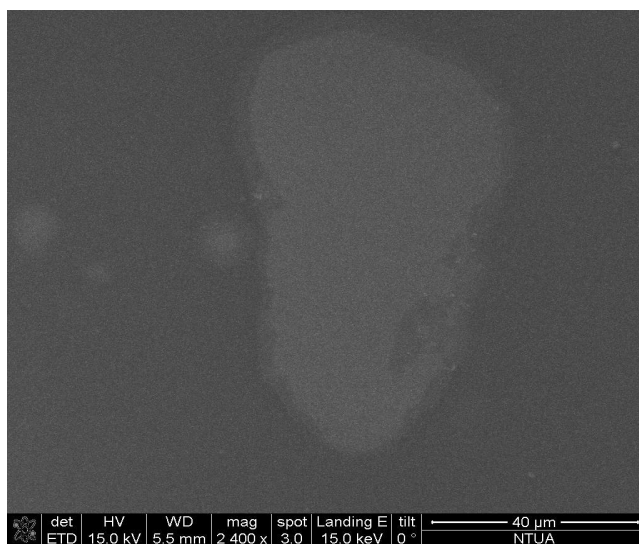


Εικόνα 142: Δείγμα #3, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 600X zoom, περιοχή III, εσωτερικός δακτύλιος.

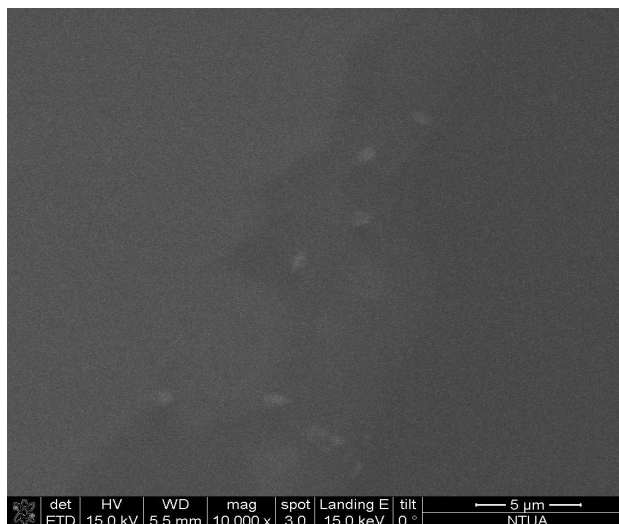


Εικόνα 143: Δείγμα #3, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 600X zoom, περιοχή III, εσωτερική διάμετρος (89,39 μm).

Αυξάνοντας τη μεγέθυνση (με χρήση οπισθοσκεδαζόμενης δέσμης) προκειμένου να προσδιοριστούν τυχόν μορφολογικές αλλοιώσεις στην εσωτερική διάμετρο, καταγράφονται οι εξής περιοχές:



Εικόνα 145: Δείγμα #3, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 2.400X zoom, περιοχή III, εσωτερική διάμετρος.



Εικόνα 144: Δείγμα #3, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 400 °C προθέρμανσης, 10.000X zoom, περιοχή III.

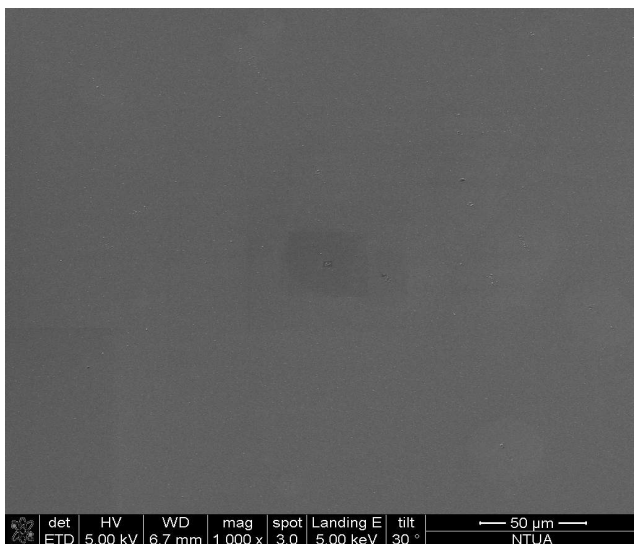
Πέραν του αποχρωματισμού και σε αντίθεση με τις προηγούμενες αναλύσεις, παρόλη τη μεγάλη μεγέθυνση, δεν διακρίνεται ευκρινώς κάποια δομή με συγκεκριμένα μορφολογικά

χαρακτηριστικά.

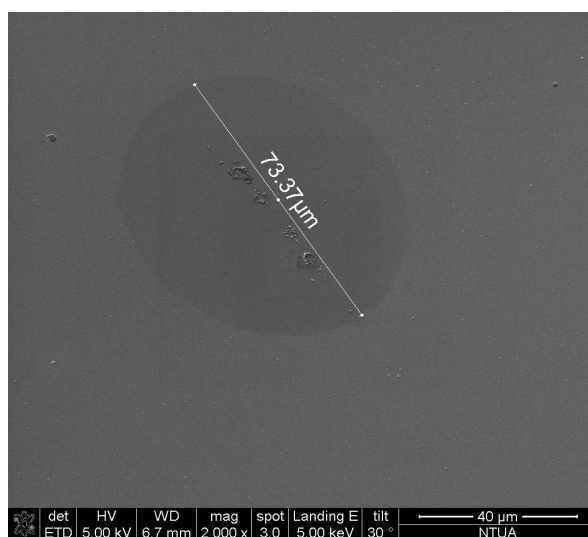
Η ανάλυση του “δείγματος #4”, δεν παρουσίασε κάποια ενδεχόμενη επιφανειακή αλλοίωση και γι' αυτόν το λόγο και δεν παρατίθεται. Επειδή λοιπόν, τα 4 δείγματα παρόλο το πλήθος των παλμών που δέχτηκαν, υπέστησαν αλλοιώσεις σε πολύ λίγες περιοχές, επανεξετάστηκαν υπό κλίση (tilt) 30 μοιρών. Έτσι, η επιφάνεια θα σκιαγραφούνταν καλύτερα και θα εντοπιζόνταν περιοχές και δομές, που δεν έγιναν αντιληπτές σε επίπεδη παρατήρηση.

Καταγραφή υπό κλίση 30 μοιρών

Για το “δείγμα #1”, υπό κλίση 30 μοιρών, καταγράφηκε:

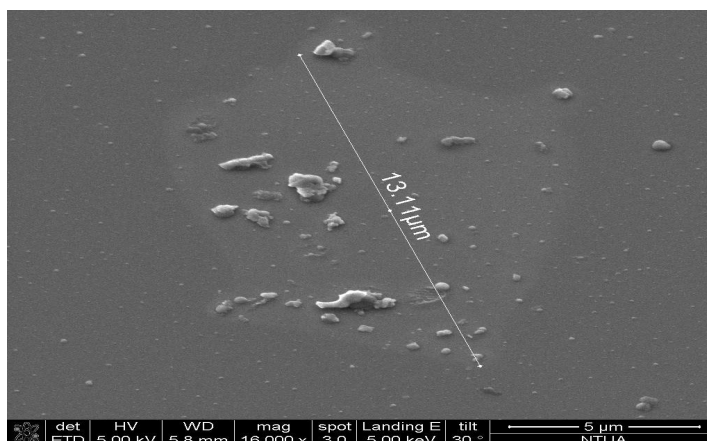


Εικόνα 146: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 1.000X zoom, κλίση 30°, περιοχή I.



Εικόνα 147: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 2.000X zoom, κλίση 30°, περιοχή I, διαστάσεις.

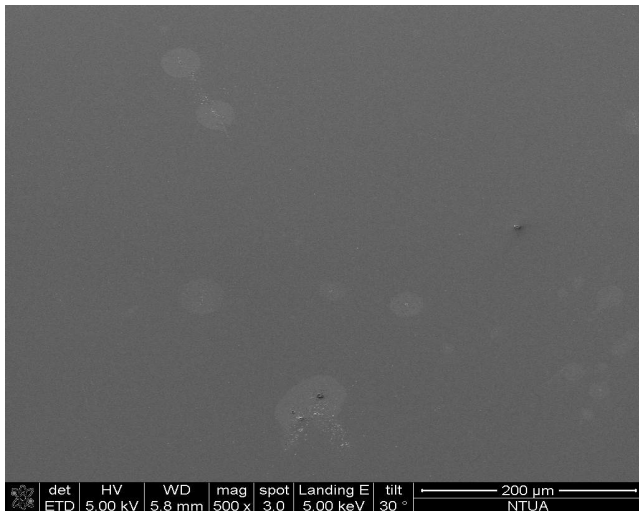
Εντός μιας αποχρωματισμένης, σχετικά κυκλικής περιοχής με διάμετρο 73 μm περίπου,



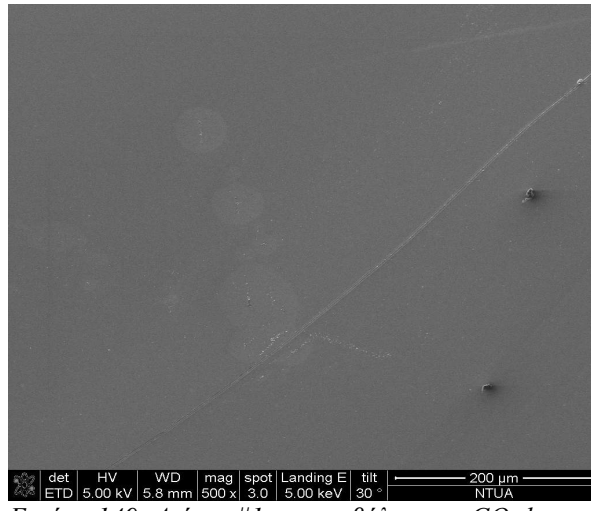
Εικόνα 148: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 16.000X zoom, κλίση 30°, περιοχή I, καταγραφή δομών.

διακρίνονται κάποιες διατεταγμένες στη σειρά δομές.

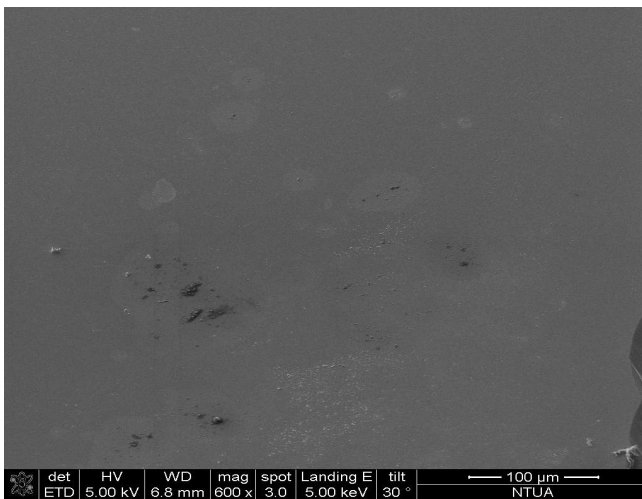
Οι δομές αυτές, έχουν κοκκώδη δομή και στο κέντρο τους παρουσιάζουν έναν ενισχυμένο αποχρωματισμό. Απομεγεθυνόντας, γίνεται εμφανής η χωρική κατανομή αυτών των περιοχών:



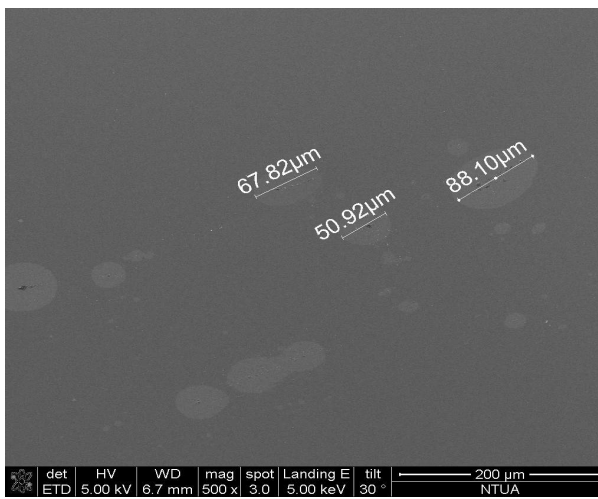
Εικόνα 150: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 500X zoom, κλίση 30°, περιοχή II, καταγραφή δομών.



Εικόνα 149: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 500X zoom, κλίση 30°, περιοχή III, καταγραφή δομών.



Εικόνα 151: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 600X zoom, κλίση 30°, περιοχή IV, καταγραφή δομών.



Εικόνα 152: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 500X zoom, κλίση 30°, περιοχή V, καταγραφή διαστάσεων δομών.

Οι διάσπαρτες αποχρωματισμένες δομές που καταγράφηκαν, έχουν διαστάσεις περίπου 50 – 100 μm και διατάσσονται άτακτα μεταξύ τους, με διαχωριστικές αποστάσεις άλλοτε 50 μm, άλλοτε

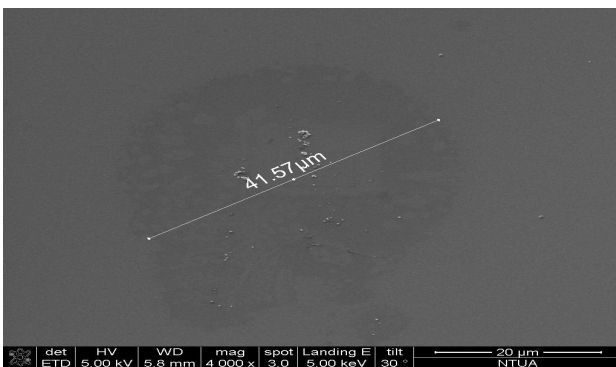
100 μm . Αυτή η άτακτη διαμόρφωση, με δεδομένη τη μεγάλη της διασπορά, είναι δύσκολο να αναπαριστά παλμούς υπό απόκλιση (ενδεχόμενη περίθλαση) της δέσμης laser.

Όπως επίσης είναι παράδοξο να εμφανίζονται σε τόσα πολλά σημεία, την ίδια στιγμή που ο στόχος (το δείγμα – wafer) ήταν αρκετά στερεωμένο ώστε να μην μετατοπίζεται απο τους παλμούς, και μετατοπίζονταν σταθερά τόσο οριζόντια, όσο και κατακόρυφα με τη χρήση ειδικής βάσης με βερνιέρο στους 2 άξονες.

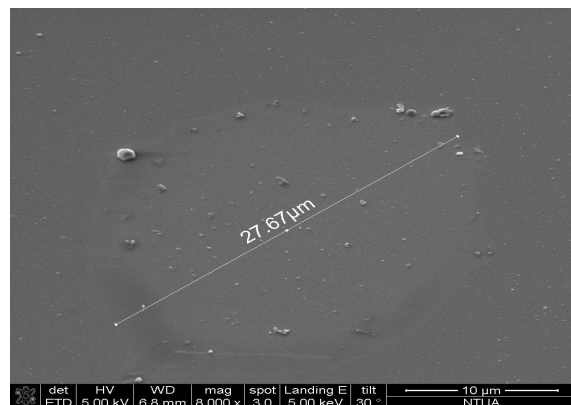
Με δεδομένο λοιπόν, το πλήθος, τη διασπορά, αλλά και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτών των αποχρωματισμών, ενδέχεται τα παραπάνω μορφώματα να μην συνιστούν αλλοιώσεις παλμών (αφού οι παλμοί είχαν συγκεκριμένο προφίλ TEM_{00} και δεν απέκλιναν απο την πορεία τους), αλλά εξωγενείς (λόγου χάρη χημικές) ή κατασκευαστικές αλλοιώσεις.

Ανεξάρτητα απο την αδυναμία ταυτοποίησης των παραπάνω δομών, ο χαρακτηρισμός του δείγματος συνεχίστηκε σε όλη την επιφάνεια.

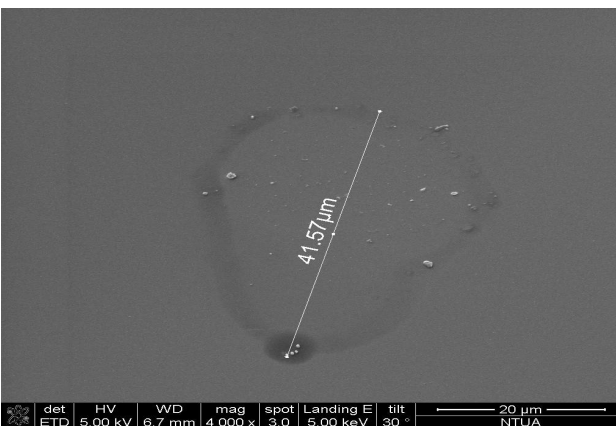
Έτσι, οι παραπάνω δομές, μελετηθήκαν υπο μεγέθυνση και παρατίθενται τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά:



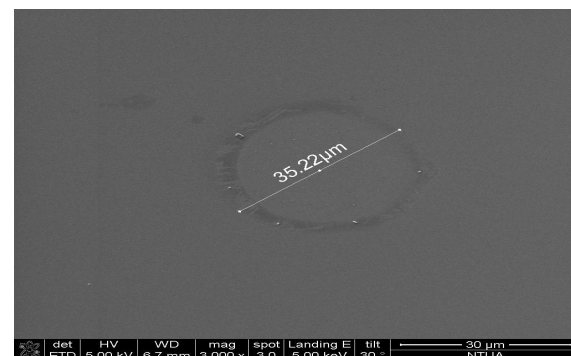
Εικόνα 153: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 4.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή διαστάσεων δομών.



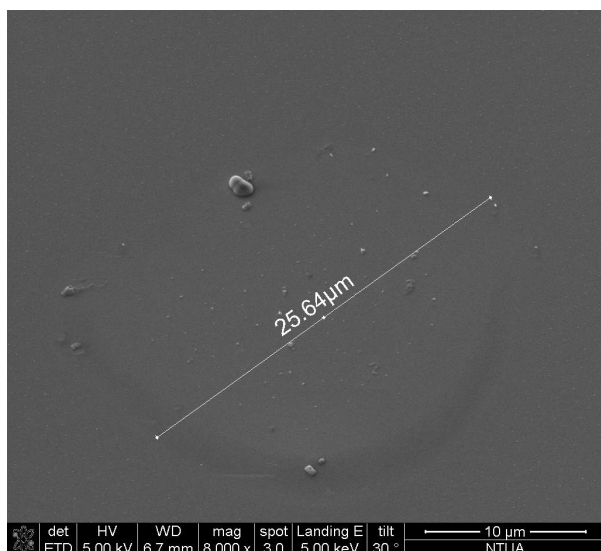
Εικόνα 154: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 8.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή διαστάσεων δομών.



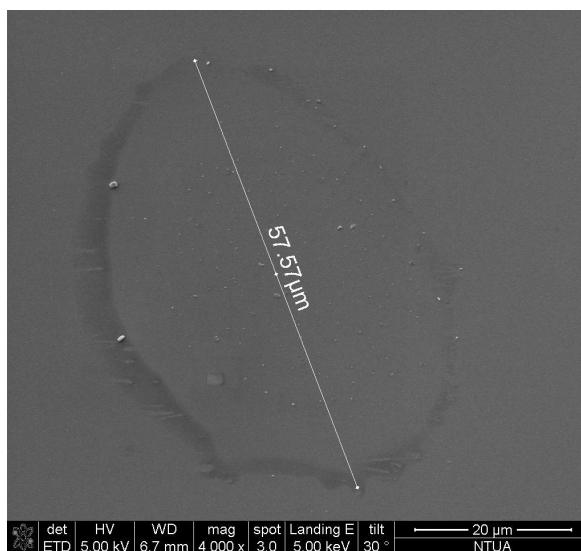
Εικόνα 155: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 4.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή διαστάσεων δομών.



Εικόνα 156: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 3.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή διαστάσεων δομών.

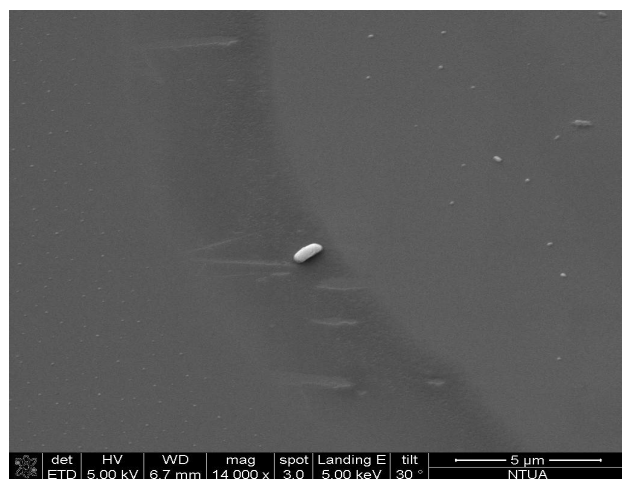


Εικόνα 157: Δείγμα #1, ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 8.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή διαστάσεων δομών.

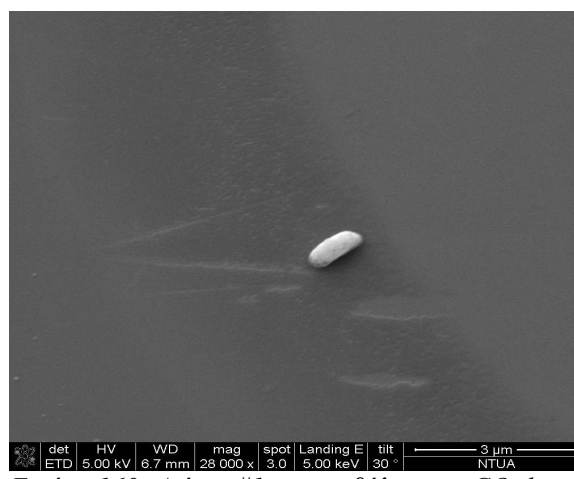


Εικόνα 158: Δείγμα #1, ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 4.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή διαστάσεων δομών.

Η μέση διάμετρος αυτών των περιοχών είναι περίπου 40 μικρόμετρα, εντός της περιοχής διακρίνονται οι κοκκώδεις δομές (αντίστοιχες με αυτές των καταγραφών “60” και “61”), όπως επίσης διακρίνεται και ένας περιφερειακός δακτύλιος, αποχρωματισμένος, με πάχος και μορφολογία που περιγράφεται παρακάτω:

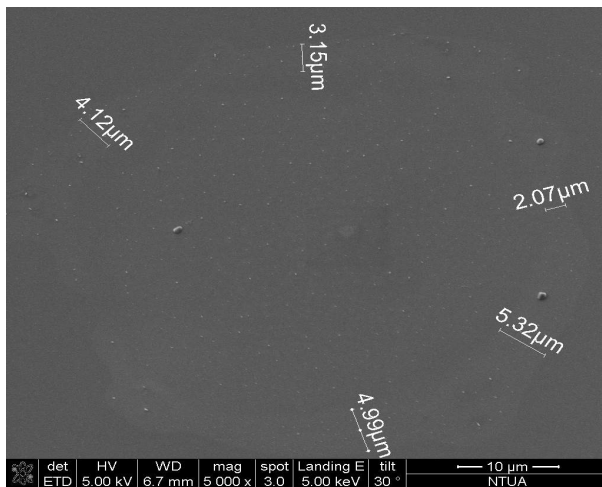


Εικόνα 159: Δείγμα #1, ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 14.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομών (μεγέθυνση εικόνας 71).

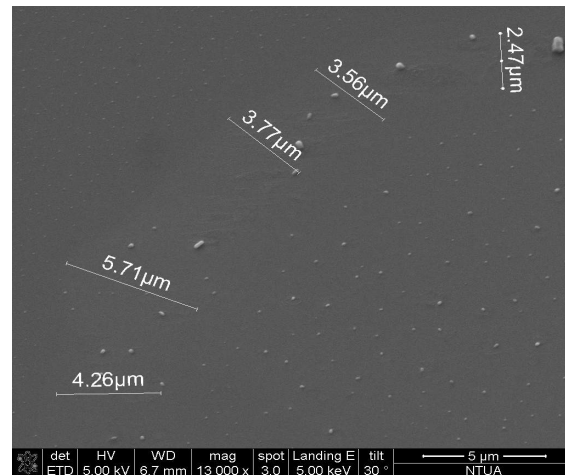


Εικόνα 160: Δείγμα #1, ακτινοβόληση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 28.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομών (μεγέθυνση εικόνας 71).

Το πάχος του δακτυλίου είναι κατά προσέγγιση 3-4 μm , και πέρα από κάποιες οριζόντιες “χαραγές” εμφανίζει στα σημεία εντονότερου αποχρωματισμού, πορώδη υφή. Αυτή η μορφολογία

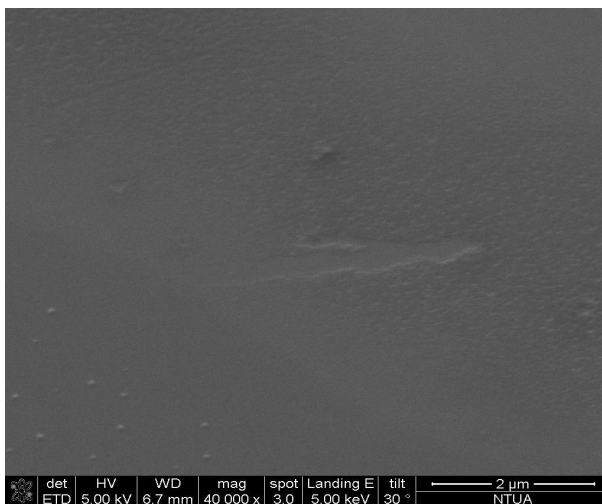


Εικόνα 162: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 5.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή πάχους δακτυλίου.

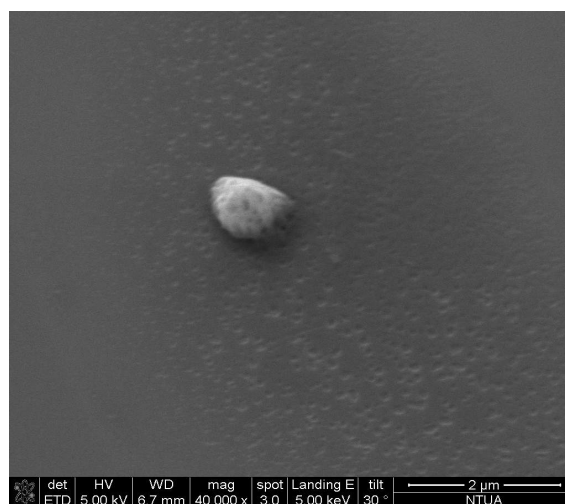


Εικόνα 161: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 13.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή πάχους δακτυλίου.

εμφανίζεται και σε άλλα σημεία του δείγματος:



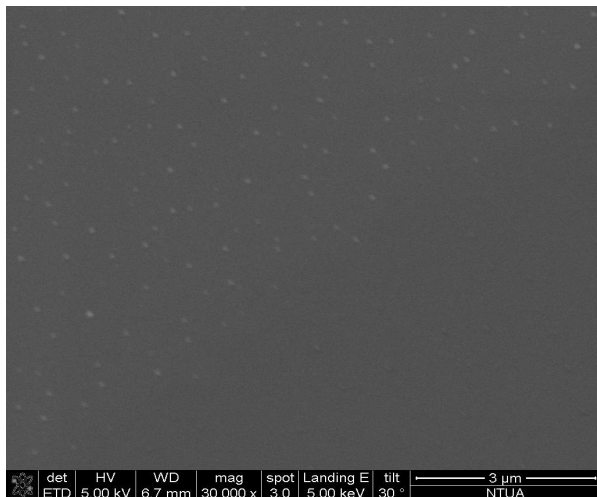
Εικόνα 163: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 40.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή υφής δακτυλίου.



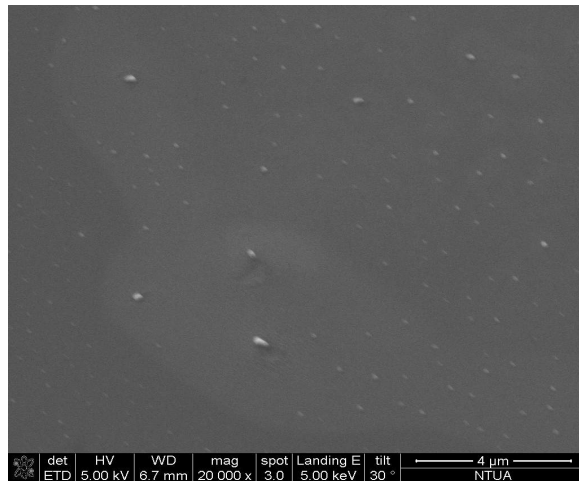
Εικόνα 164: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO_2 laser, 10,6 μm , 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm^2 , 40.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή υφής δακτυλίου.

Στις τελευταίες απεικονίσεις (εικόνες “163” και “164”), αποτυπώνεται πιο έντονα η

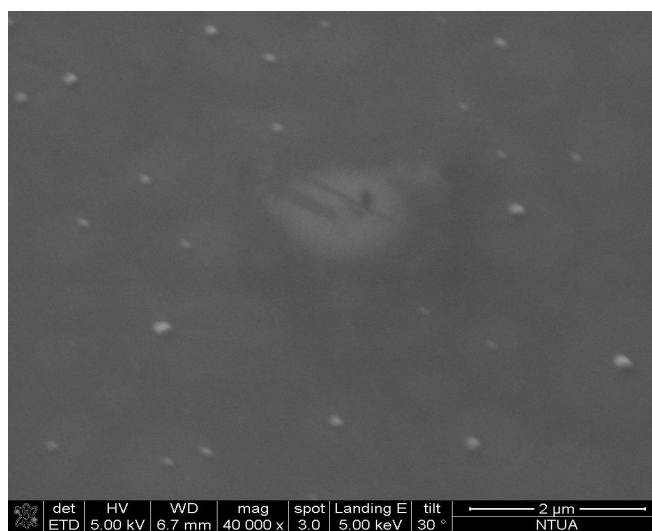
πορώδης, τραχιά, επιφάνεια του δακτυλίου. Οι πόροι φαίνεται να έχουν μέση διάμετρο περί τα 200 nm. Όσον αφορά την περιοχή εσωτερικά του δακτυλίου, εμφανίζονται σχετικά ομοιόμορφα στην έκταση της επιφάνειας, οι κοκκώδεις δομές:



Εικόνα 166: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 30.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομής εσωτερικά του δακτυλίου.

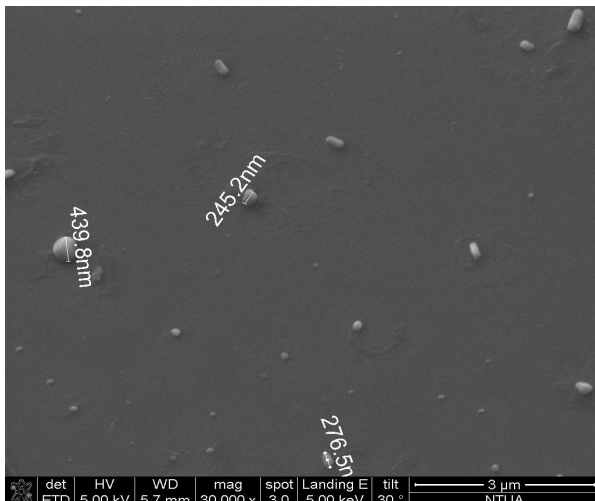


Εικόνα 165: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 20.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομής εσωτερικά του δακτυλίου.

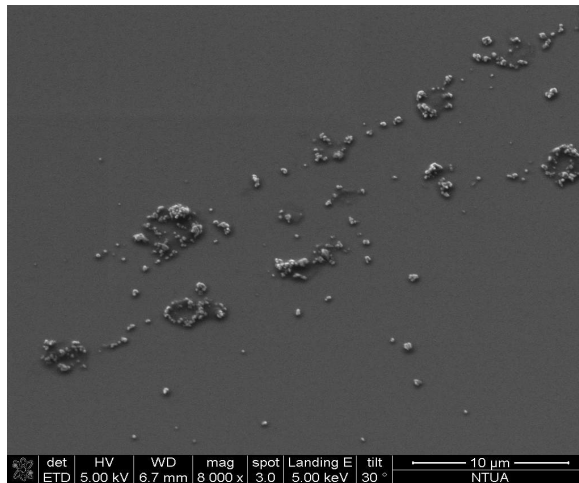


Εικόνα 167: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 40.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομής εσωτερικά του δακτυλίου.

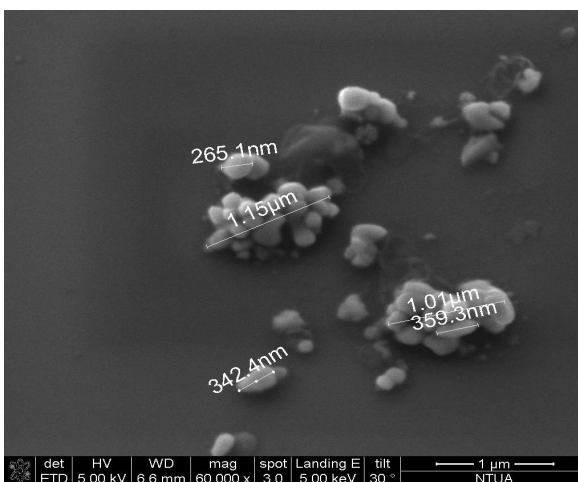
Μια καλύτερη μελέτη της μορφολογίας των δομών που διακρίνονται στις παραπάνω περιοχές, παρουσιάζεται στις καταγραφές που ακολουθούν:



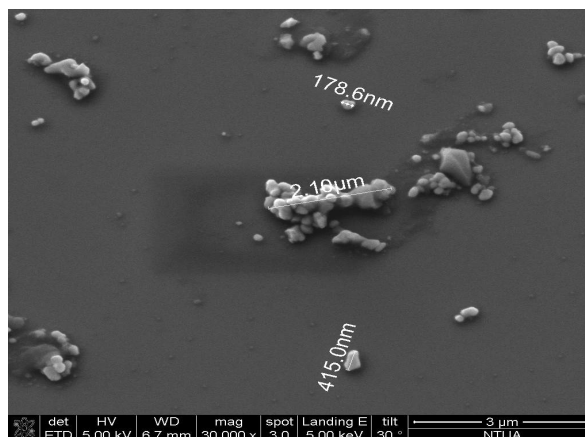
Εικόνα 168: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 30.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομών εσωτερικά του δακτυλίου.



Εικόνα 169: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 8.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομών εσωτερικά του δακτυλίου.



Εικόνα 170: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 80.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομών εσωτερικά του δακτυλίου.



Εικόνα 171: Δείγμα #1, ακτινοβολήση με CO₂ laser, 10,6 μm, 4 cm αφεστίασης, 48 mJ/mm², 30.000X zoom, κλίση 30°, καταγραφή δομών εσωτερικά του δακτυλίου.

Οι κοκκώδεις δομές που έχουν αναπτυχθεί, διατάσσονται άλλοτε ως μεμονωμένες δομές και άλλοτε ως συσσωματώματα. Στη πρώτη περίπτωση, διακρίνονται δομές διαμέτρου 200-400 nm, ενώ όταν αναπτύσσονται σε συσσωματώματα, η διαστάσεις αυτών υπολογίζονται στα 1-2 μm. Η άτακτη χωρική τους κατανομή δε φαίνεται να είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης τους με την ακτινοβολία, ωστόσο, όλα τα ενδεχόμενα εξετάζονται. Τα δείγματα #2, #3, και #4, δεν εξετάστηκαν υπό κλίση, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ταχύτερα η προετοιμασία για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό.

Συμπεράσματα ακτινοβολήσης με SEM

Μελετήθηκαν δείγματα που ακτινοβολήθηκαν τόσο με Nd:YAG laser, όσο και με CO₂ laser. Μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν δείγματα που είχαν εκτεταμένη αποδόμηση, όσο και δείγματα που δεν εμφάνισαν αποδόμηση.

Για τη πρώτη περίπτωση, εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά της αποδόμησης (διαστάσεις και δομή κρατήρα, διαστάσεις και δομή θερμικά αλληλεπιδρώσας περιοχής, δομή μη αλληλεπιδρώσας περιοχής).

Λόγω της μεγαλύτερης απορροφησιμότητας του πυριτίου στα 1064 nm, στο χαρακτηριστικό μήκος κύματος εκπομπής του Nd:YAG, η αποδόμηση ήταν πιο έντονη. Στην περίπτωση του CO₂ laser, -που έτσι και αλλιώς, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κεντροβαρίζει σε αυτό- στην περίπτωση της επίπεδης εξέτασης, εμφανίστηκαν κάποιες λίγες αλλοιώσεις (που είχαν περισσότερο τα χαρακτηριστικά μικρού αποχρωματισμού παρά εκτεταμένης επιφανειακής αλλοίωσης), αρκετά λιγότερες σε πλήθος, από το πλήθος των ακτινοβολήσεων για το κάθε δείγμα, με συνέπεια να μην θεωρείται σίγουρη η προέλευσή τους.

Στην περίπτωση της εξέτασης υπο κλίση 30 μοιρών, εντοπίστηκαν κάποιες ελλειπτικές περιοχές, διάσπαρτες, που απέχουν μεταξύ τους 50-200 μm, αποστάσεις δηλαδή, αρκετά μεγάλες για να διακαίολογούν απόκλιση της δέσμης, ή μετατόπιση του πακτωμένου δείγματος από τους παλμούς της ακτινοβολίας.

Φωτολιθογραφία – επιμετάλλωση

Εισαγωγή

Η διαδικασία του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού με τη χρήση της μεθόδου V.D.P., θεωρητικά μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς να είναι απαραίτητη η επιμετάλλωση των δειγμάτων καθώς άλλωστε, αυτά φέρουν ημιαγωγικές ιδιότητες στην επιφάνεια τους.

Ωστόσο, επειδή οι 4 ακίδες που χρησιμοποιούνται για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό, απαιτούν εφαρμογή φορτίου υπο συγκεκριμένη κλίση, είναι πολύ πιθανό να μην αποδώσουν σωστές καταγραφές αν δε πραγματοποιηθεί επιμετάλλωση της επιφάνειας με χρήση μάσκας.

Γι ' αυτόν το λόγο, μετά το μορφολογικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων, τα δείγματα #1, #2, #3, #4, που είχαν υποστεί ακτινοβόληση με CO₂ laser, διαμορφώθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου της φωτολιθογραφίας και κατόπιν της επιμετάλλωσης ώστε να φέρουν επαφές που θα διευκολύνουν τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό. Με αυτόν τον τρόπο, η επιφάνεια προς ανάλυση, αναπτύσσεται σε μικρά, διακριτά σημεία.

Φωτολιθογραφία

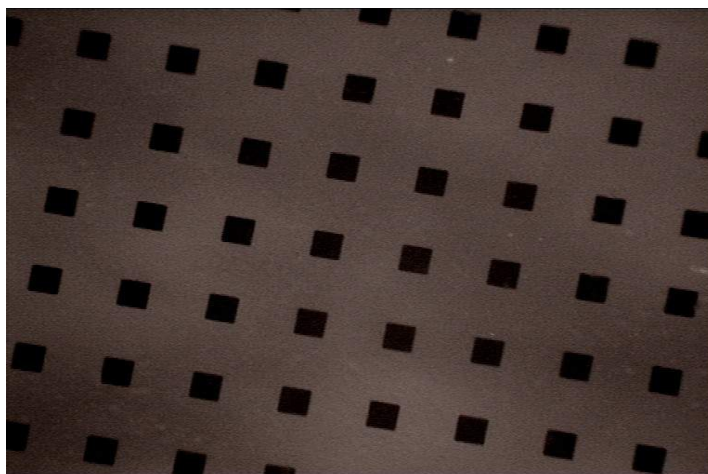
Είναι η μεταφορά γεωμετρικών σχημάτων από μία μάσκα σε ένα λεπτό υμένιο φωτοευπαθούς ρητίνης που επικαλύπτει τη λεία επιφάνεια ενός wafer ημιαγωγού. Η διεργασία είναι κατά κύριο λόγο, φωτοχημική και αναπτύχθηκε περισσότερο από 100 χρόνια πριν την ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής, ως μέθοδος μεταφοράς εικόνας σε χαρτί με χρήση ειδικών ρητινών.

Τα γεωμετρικά σχήματα καθορίζουν διάφορες περιοχές ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος όπως περιοχές για εμφύτευση, για ηλεκτρικές επαφές, σε διαδοχικά εγκάρσια επίπεδα μιας πολυεπίπεδης διάταξης.

Ειδικότερα, η μάσκα, είναι ουσιαστικά μια διάτρητη πρότυπη δομή που χρησιμοποιείται για να αναπαράγει ένα επιθυμητό αντικείμενο-μοντέλο σε wafer πυριτίου. Πρακτικά, η μάσκα είναι ένα επίπεδο γυαλί (διάφανο στην UV ακτινοβολία), είτε πλάκα χαλαζία με ένα απορροφητικό μεταλλικό πρότυπο, είτε ακόμη και μια εύκαμπτη ζελατίνη. Η μάσκα συνήθως σχεδιάζεται (σε μέγεθος μεταξύ 100 και 2000 φορές μεγαλύτερου του κυκλώματος) με χρήση προγράμματος CAD στο πρότυπο που προβλέπεται να γίνει χρήση και δημιουργείται συνήθως με χάραξη μέσω laser plotter .

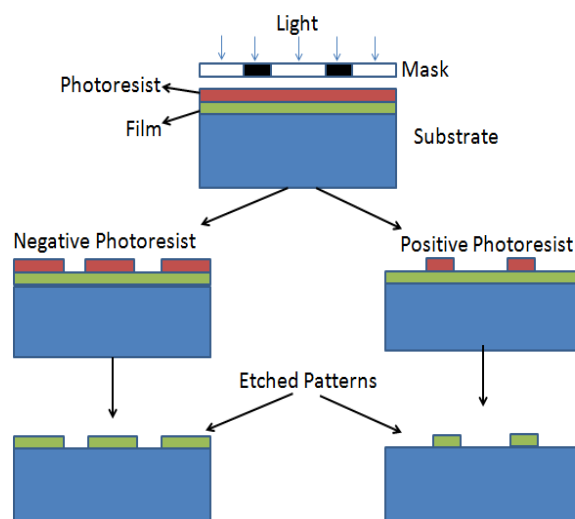
Με τη προϋπόθεση ότι το wafer έχει υποστεί σχολαστικό καθαρισμό, με τις μεθόδους RCA που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται εναπόθεση της ρητίνης. Στην περίπτωση της

παρεμβολής του μορφολογικού χαρακτηρισμού μετά το “piranha”, τα δείγματα εμβαπτίζονται σε λουτρό υπερήχων. Η ρητίνη είναι μια υγρή φωτοευαίσθητη ουσία που επικαλύπτεται στο wafer και διακρίνεται σε θετικού τύπου και αρνητικού τύπου. Στις θετικού τύπου ρητίνες εκτίθενται στο φώς τα σημεία που πρέπει να αφαιρεθούν από το υποκείμενο υλικό. Στη φωτολιθογραφία με χρήση αρνητικού τύπου ρητίνης, τα υλικά της εμφάνισης απομακρύνουν μόνον τα κομμάτια που δεν έχουν εκτεθεί στο UV.



Εικόνα 172: Μάσκα τύπου ζελατίνης, “Ted Pella inc, product number 16072”. Τα τετράγωνα είναι μεγέθους 75μm, με απόσταση απόσταση απο άκρη σε άκρη, τα 150 μm.

Στη προκειμένη περίπτωση, πραγματοποιήθηκε φωτολιθογραφία αρνητικού τύπου. Με δεδομένη την απαίτηση για ανάπτυξη “negative photoresist” και συνάμα την ιδιαιτερότητα της εύκαμπτης, ζελατινοειδούς μορφής της μάσκας, η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στον “Καθαρό Χώρο” του “Εργαστηρίου Νανοτεχνολογίας & Μικροσυστημάτων” στο “Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος”. Η επίστρωση της ρητίνης πραγματοποιείται (σε χώρο με ειδικό φωτισμό λόγω της φωτοευαισθησίας της ρητίνης), με την τοποθέτηση του δισκιδίου σε μια κάψουλα στην οποία περιστρέφεται το δισκίδιο με 3000-6000 rpm για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η φυγοκέντριση προκαλεί στην επιφάνεια μια ομοιόμορφη επίστρωση, ένα φιλμ με πάχος περίπου 1,5 μm, ενώ η περιττή ρητίνη αποβάλλεται μέσω μιας αντλίας.



Εικόνα 173: Τεχνικές φωτολιθογραφίας αρνητικού και θετικού τύπου.

Κατόπιν, προκειμένου να εξετασθεί ο διαλύτης που περιέχεται στη ρητίνη και συνάμα να ξεπεραστεί η θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης, το δισκίδιο τοποθετείται σε έναν ειδικό φούρνο, που θερμαίνεται για 10 περίπου λεπτά σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Αφαιρώντας το δείγμα από τον ειδικό φούρνο, η διαδικασία προχωρά στο στάδιο της έκθεσης.

Έτσι, με το δείγμα τοποθετημένο σε μια ειδική βάση, γίνεται εναπόθεση της μάσκας. Η ευθυγράμμιση που πρέπει να επιτευχθεί πρέπει να είναι απόλυτη, ώστε να μην υπάρξουν γεωμετρικές-δομικές αλλοιώσεις στα επόμενα στάδια. Η έκθεση πραγματοποιείται ακτινοβολώντας με μια δέσμη υπεριώδους, συνήθως για 6 περίπου δευτερόλεπτα. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν διάφορες τεχνικές έκθεσης, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς τις οπτικές τους ιδιότητες.

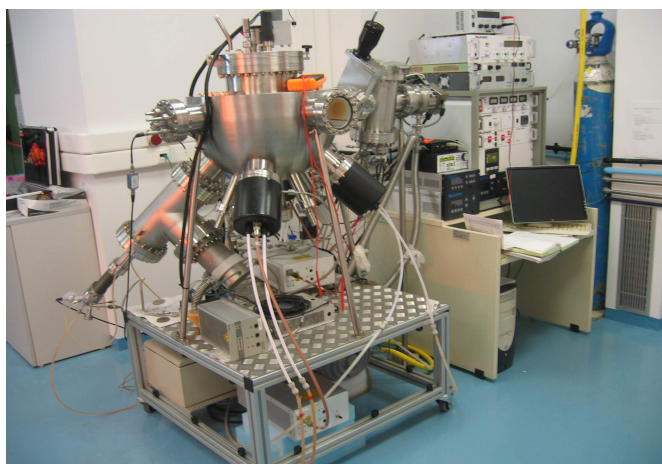
Μπορεί λοιπόν να πραγματοποιηθεί έκθεση σε άμεση επαφή της μάσκας με το υπόστρωμα, έκθεση σε μικρή απόσταση της μάσκας από το υπόστρωμα, και έκθεση με προβολή.

Η κάθε μέθοδος διαφοροποιείται ως προς τις οπτικές ιδιότητες, όπως λόγου χάρη, την διακριτική ικανότητα και ως προς την προστασία της μάσκας η του υποστρώματος από σωματίδια. Ακολουθεί εμφάνιση σε εμφανιστή (developer), για συγκεκριμένο και πάλι χρόνο μερικών δεκάδων δευτερολέπτων. Ο εμφανιστής, απομακρύνει τη ρητίνη από τα εκτεθειμένα σημεία, ώστε να διαμορφωθεί η επιφάνεια όπως έχει σχεδιαστεί. Το δισκίδιο καθαρίζεται με απιονισμένο νερό, απομακρύνοντας τα σταγονίδια που έχουν παραμείνει στην επιφάνεια και πλέον, έχει διαμορφωθεί ώστε να γίνει παρατηρήσιμο στο μικροσκόπιο. Η παρατήρηση επιβεβαιώνει πως μεταφέρθηκε το σχήμα της μάσκας στην επιφάνεια χωρίς ατέλειες.

Επιμετάλλωση

Στο επόμενο στάδιο, πραγματοποιήθηκε επιμετάλλωση με τη βοήθεια τεχνικών “e-gun evaporation”. Η επιμετάλλωση, εξυπηρετεί στη διασύνδεση των επί μέρους ηλεκτρονικών στοιχείων για την κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Όταν η επιφάνεια ενός στερεού βομβαρδίζεται με ενεργητικά σωματίδια (π.χ. επιταχυνόμενα ιόντα) τότε τα άτομα της επιφάνειας του στερεού οπισθοσκεδάζονται λόγω κρούσεων μεταξύ προσπιπτόντων ιόντων και επιφανειακών ατόμων. Δηλαδή, όταν ένα λεπτό φύλλο βομβαρδίζεται με ενεργητικά σωματίδια κάποια από τα σκεδαζόμενα άτομα εισέρχονται στο φύλλο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται “transmission sputtering”. Ένα αδρανές αέριο, όπως το αργό, τοποθετείται μέσα στο θάλαμο που βρίσκεται ο στόχος. Ο στόχος βρίσκεται σε επαφή με μία κάθοδο και το υπόστρωμα σε επαφή με μία άνοδο. Κατόπιν, εφαρμόζεται υψηλή τάση ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο και δημιουργείται πλάσμα λόγω ιοντισμού των ιόντων του αερίου. Το πλάσμα περιέχει τόσο ουδέτερα άτομα αερίου όσο και ίσες ποσότητες κατιόντων αργού και ελεύθερων ηλεκτρονίων. Στο ηλεκτρόδιο της καθόδου τοποθετείται ο στόχος του υλικού προς εναπόθεση, ενώ στην άνοδο τοποθετείται το υπόστρωμα στο οποίο θα γίνει η εναπόθεση. Τα θετικά ιόντα του πλάσματος επιταχύνονται προς το αρνητικά πολωμένο ηλεκτρόδιο. Η τάση η οποία εφαρμόζεται στην άνοδο μπορεί να φέρει τα ιόντα να έχουν ενέργειες ακόμα και αρκετές χιλιάδες eV καθώς προσπίπτουν στο στόχο. Καθώς, λοιπόν, προσπίπτουν στο στόχο εξάγουν άτομα του στόχου τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να κινηθούν μέσα στο πλάσμα και να συμπυκνωθούν στην επιφάνεια του υποστρώματος.

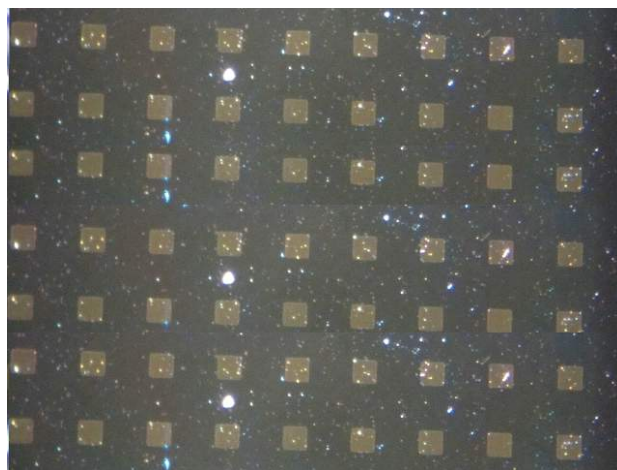


Εικόνα 174: Η διάταξη που χρησιμοποιείται για την εναπόθεση των υμενίων. Απο αριστερά προς δεξιά, διακρίνεται ο θάλαμος Ultra High Vacuum, οι αντλίες, το διάφραγμα, η διαμέριση που τοποθετούνται τα δισκίδια, η κονσόλα ελέγχου και η φιάλη αργού.

Στην περίπτωση των δειγμάτων προς ηλεκτρικό χαρακτηρισμό, θα εναποτεθεί Τιτάνιο και Χρυσός. Με δεδομένο ότι το τιτάνιο είναι δύστηκτο, θα γίνει χρήση μεγαλύτερης ισχύος, μέσω της κονσόλας που ελέγχει και αναπαριστά όλες τις παραμέτρους της διάταξης. Η κονσόλα απεικονίζει το ρυθμό εναπόθεσης, το πάχος της εναποτεθείσας επιφάνειας και τον χρόνο . Προκείμενου να μην υπάρξουν αλλοιώσεις, ο ρυθμός εναπόθεσης διατηρείται σταθερός. Αυξάνοντας αργά και σταθερά την ισχύ προκαλείται θέρμανση στο σύστημα. Όταν μεταβεί στην προβλεπόμενη τιμή ισχύος ,το υλικό εναποτίθεται πάνω στο δείγμα.

Η συνεχής καταγραφή των ενδείξεων της κονσόλας, είναι εξαιρετικά σημαντική για μια πετυχημένη, επιθυμητή εναπόθεση. Τη στιγμή που η κονσόλα θα καταγράψει πάχος 0,005 k Anstrom, θα έχουν εναποτεθεί 5 nm Τιτανίου. Με παρόμοιο τρόπο, πραγματοποιείται και η εναπόθεση χρυσού, αλλάζοντας τις παραμέτρους μέσω του “mode”. Για την περίπτωση των υπό επεξεργασία δειγμάτων, το συνολικό πάχος Ti + Au, δε θα ξεπεράσει τα 30 – 35 nm. Η εναπόθεση χρυσού γίνεται με διαφορετικό ρυθμό απο αυτήν του τιτανίου, καθώς ο χρυσός είναι πολύτιμο υλικό και αποφεύγεται η απότομη τήξη του.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, ανοίγει το διαχωριστικό. Ο θάλαμος πλημμυρίζει με αργό, ώστε να ανέβει η πίεση. Τα πτερύγια των αντλιών turbo, επιβραδύνονται ομαλά. Αρχικά, απενεργοποιούνται οι αντλίες turbo και κατόπιν, οι μηχανικές αντλίες. Σιγά σιγά, εισχωρεί η ατμοσφαιρική πίεση και τα δείγματα είναι έτοιμα.



Εικόνα 175: Δείγμα επιμεταλλωμένο, έτοιμο προς ηλεκτρικό χαρακτηρισμό.

Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός

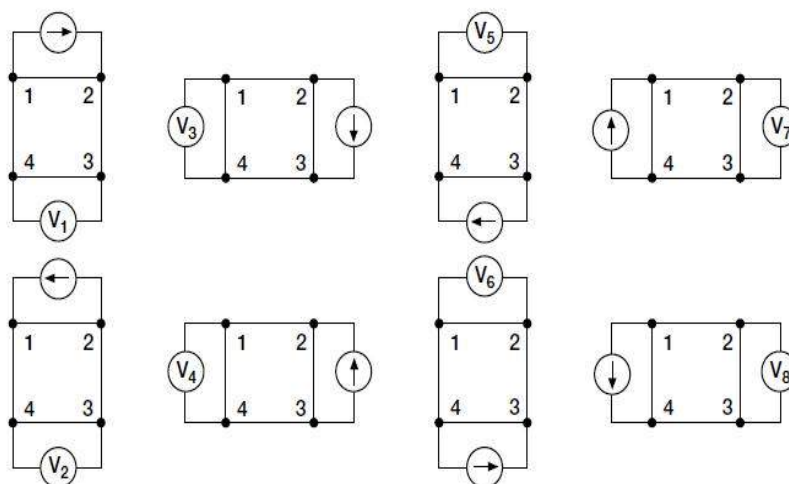
Σύντομη θεωρία

Το φυσικό μέγεθος που συνδέεται με την ενεργοποίηση των προσμείξεων και κατά συνέπεια με τη -σχετική- επιτυχία της θερμικής ανόπτησης, είναι η επιφανειακή αντίσταση (sheet resistance). Ορίζεται ως το πηλίκο της ειδικής αντίστασης του υλικού (ρ), προς το πάχος του δείγματος του υλικού (t),

$$\text{Δηλαδή: } R_s = \rho/t$$

Η επιφανειακή αντίσταση, μετράται σε Ohm ανά τετράγωνο και συμβολίζεται ως Ω / \square (Ohm per square)^[18]. Η πειραματική μεθοδος που προσδιορίζει την επιφανειακή αντίσταση, σ'αυτήν την περίπτωση είναι η “μέθοδος των 4 ακίδων” η αλλιώς, “Van Der Pauw”^[18]. Η V.D.P., εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι μπορεί να πραγματοποιήσει ηλεκτρικό χαρακτηρισμό σε περιφεριακά κλειστές επιφάνειες δομών με ακανόνιστες γεωμετρίες. Οι μόνες προϋποθέσεις που ορίζονται, αφορούν τις ακίδες-επαφές να είναι αρκετά μικρές σε διαστάσεις, να βρίσκονται στην περιφέρεια και τέλος, η εξετασθείσα περιοχή, να είναι ομοιόμορφη, χωρίς να παρεμβάλλονται διατρήσεις και οπές.

Με τη βοήθεια μιας πηγής ρεύματος και ενός νανοβολτομέτρου, πραγματοποιείται σάρωση και για τις δύο πολικότητες με κάποιον ορισμένο εύρος ρευμάτων για τις 2 ακίδες, ενώ την ίδια στιγμή μετράται η τάση που αναπτύσσεται στα άλλα 2 σημεία. Για όλους τους δυνατούς συνδιασμούς, το πείραμα ολοκληρώνει το κύκλο του μετά απο 8 φάσεις.



Εικόνα 176: Οι 8 διαδοχικές εναλλαγές τάσης και φοράς ρεύματος, για τον πλήρη κύκλο της μεθόδου V.D.P. και την εξαγωγή της R_s .

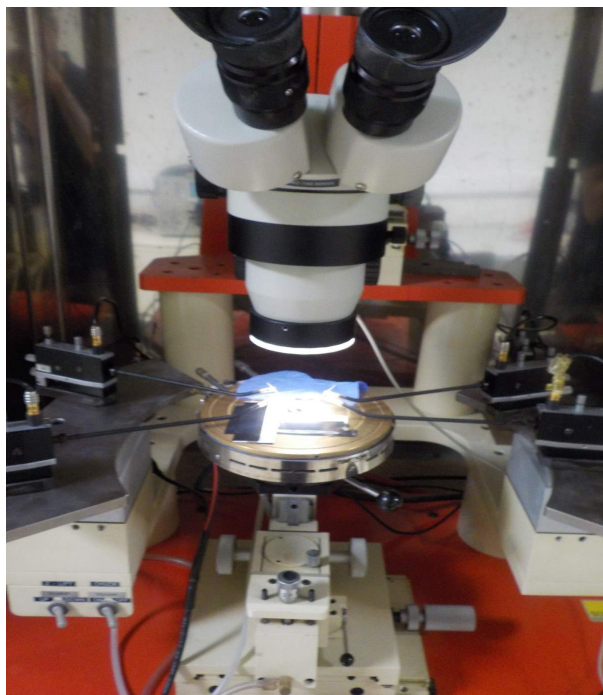
Πειραματική Παρουσίαση

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο “Εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού” του “Τομέα Φυσικής Ε.Μ.Π.”. Η διαδικασία περιελάμβανε ένα πλήθος διατάξεων μέτρησης και ανάλυσης της επιφανειακής αντίστασης των δειγμάτων. Βασικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν ένας σταθμός 4 ακίδων (4 probe station), μια πηγή ρεύματος, ένα νανοβολτόμετρο, ένας πολυπλέκτης και φυσικά, ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής.

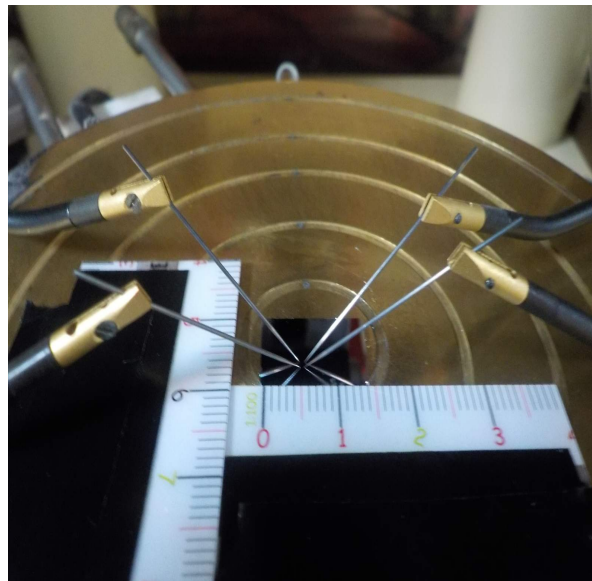
Ο σταθμός των 4 ακίδων είναι μία διάταξη, πάνω στην οποία συγκρατείται το δείγμα (για καλύτερη συγκράτηση στη βάση του σταθμού όπου τοποθετείται το δείγμα, λειτουργεί μια αντλία κενού). Η βάση μπορεί να μετακινηθεί και στις 3 διαστάσεις με χρήση μικροβερνιέρων, ενώ η βάση βρίσκεται στο οπτικό πεδίο ενός μικροσκοπίου, το οποίο μπορεί να μετακινηθεί και αυτό στις 3 διαστάσεις. Περιμετρικά της βάσης βρίσκονται οι 4 ακίδες, οι οποίες μπορούν να μετακινηθούν προς όλες τις δυνατές κατευθύνσεις με χρήση μικροβερνιέρων, ώστε να περικλείσουν την περιοχή μελέτης. Οι 4 ακίδες συνδέονται με τις υπόλοιπες διατάξεις, ενώ όλος ο σταθμός βρίσκεται γειωμένος. Όσον αφορά τις υπόλοιπες διατάξεις, η πηγή ρεύματος είναι η "Keithley 6220", το νανοβολτόμετρο είναι το "Keithley 2182 A"^[13]. Οι τρεις διατάξεις συνδέονται με συγκεκριμένη συνδεσμολογία μεταξύ τους, ώστε να λειτουργήσει σωστά το σύστημα, εναλλάσσοντας σωστά τις τάσεις και τα ρεύματα, με τη κάθε ακίδα του σταθμού να αντιστοιχεί στην ορθά ορισμένη συνδεσμολογία. Ένα καλώδιο δεδομένων διασυνδέει και τις 3 διατάξεις και μέσω μιας τέταρτης συσκευής (HP trackcard), καταλήγει στον υπολογιστή.



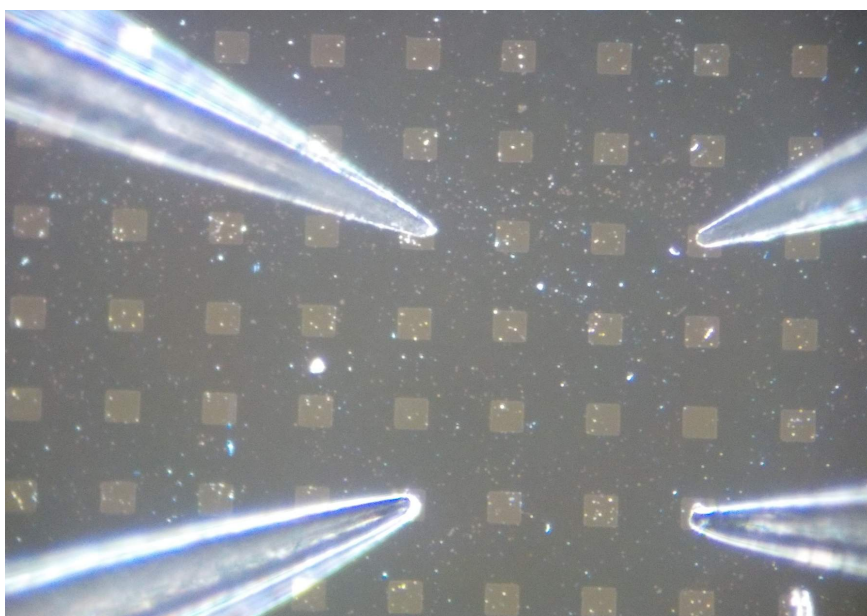
Εικόνα 177: Η συστοιχία των διατάξεων για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων. Διακρίνεται ο σταθμός των ακίδων (1), η πηγή ρεύματος (2), το νανοβολτόμετρο (3), ο πολυπλέκτης (4), η συσκευή μεταφοράς δεδομένων (5) και ο ηλεκτρονικός υπολογιστής (6).



Εικόνα 179: “SUSS MicroTec probe station”. Στο κέντρο, διακρίνεται το δείγμα και οι 4 ακίδες.



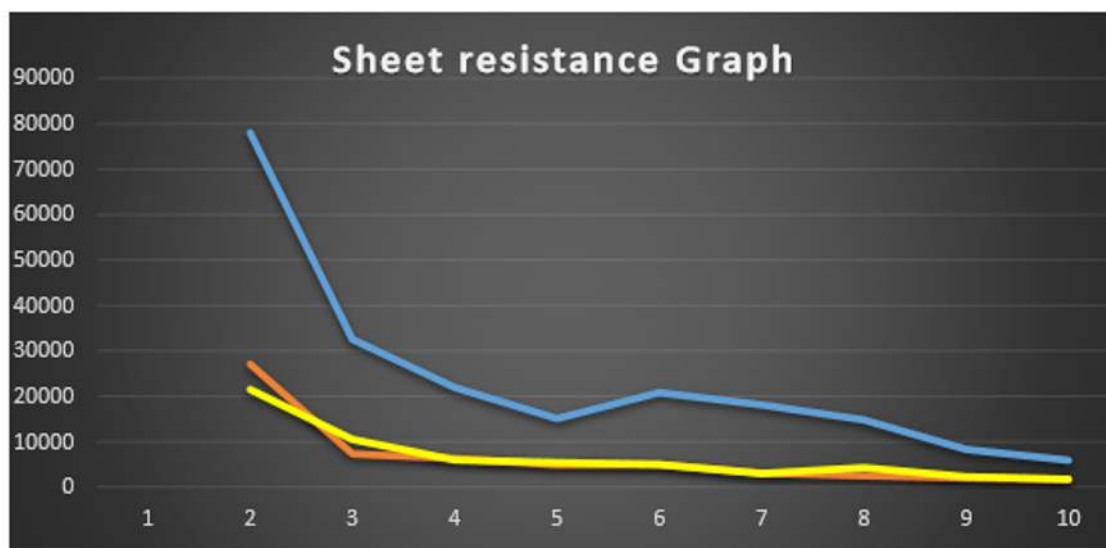
Εικόνα 178: Το δείγμα έτοιμο προς μέτρηση. Η επιφάνεια βαθμονομήθηκε ώστε να προσδιορίζεται η θέση του κάθε μετρήσιμου σημείου.



Εικόνα 180: Μεγέθυνση μέσω του ενσωματωμένου μικροσκοπίου της επιφάνειας μέτρησης. Διακρίνονται οι 4 ακίδες, τοποθετημένες πάνω στις 4 μεταλλικές επαφές.

Με τη χρήση ειδικού λογισμικού και την κατάλληλη παραμετροποίηση για τα εύρη ρευμάτων (10^{-6} με 10^{-4} A και βήμα 10 διαδοχικές μεταβάσεις), ενεργοποιείται ένας κύκλος μέτρησης και ταυτόχρονα χάρη στην αριθμητική επίλυση που έχει ενσωματωθεί στο ειδικό λογισμικό, καταγράφονται όλα τα μεγέθη που υπεισέρχονται στην εξίσωση του R_s [14]. Το εύρος των ρευμάτων είναι τέτοιο, καθώς για μικρότερες τιμές του 10^{-6} A, η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη (άρα μη αξιοποιήσιμη), ενώ για μεγαλύτερες τιμές των 10^{-4} A, οι μεταλλικές επαφές, πιθανό να καταστρέφονταν ή να αποδίδονταν στην R_s , ανοίκειες τιμές.

Για το δείγμα #1, επιχειρήθηκε να εντοπιστεί ένα σημείο απομακρυσμένο από ακτινοβολήσεις, ώστε να έχει υποστεί την ελάχιστη θερμική επίδραση και να λειτουργήσει ως αναφορά στις τιμές της επιφανειακής αντίστασης. Με δεδομένη την χωρική συγκέντρωση μεγάλου πλήθους ακτινοβολήσεων σε ένα μικρό δείγμα (λόγω περιορισμένου πλήθους διαθέσιμων δειγμάτων 38N), ήταν δύσκολο να εντοπιστεί περιοχή ελάχιστης θερμικής επίδρασης. Παρόλα αυτά, η σάρωση της επιφάνειας του δείγματος από άκρη σε άκρη, εμφάνισε περιοχές με μεγαλύτερο R_s , περίπου στα 9000-10000 Ω/\square . Στις υπόλοιπες περιοχές, οι τιμές της επιφανειακής αντίστασης, παρουσίασαν κατακόρυφη πτώση αγγίζοντας τιμές 1700, 1500, 1200, έως και 900 Ω/\square .

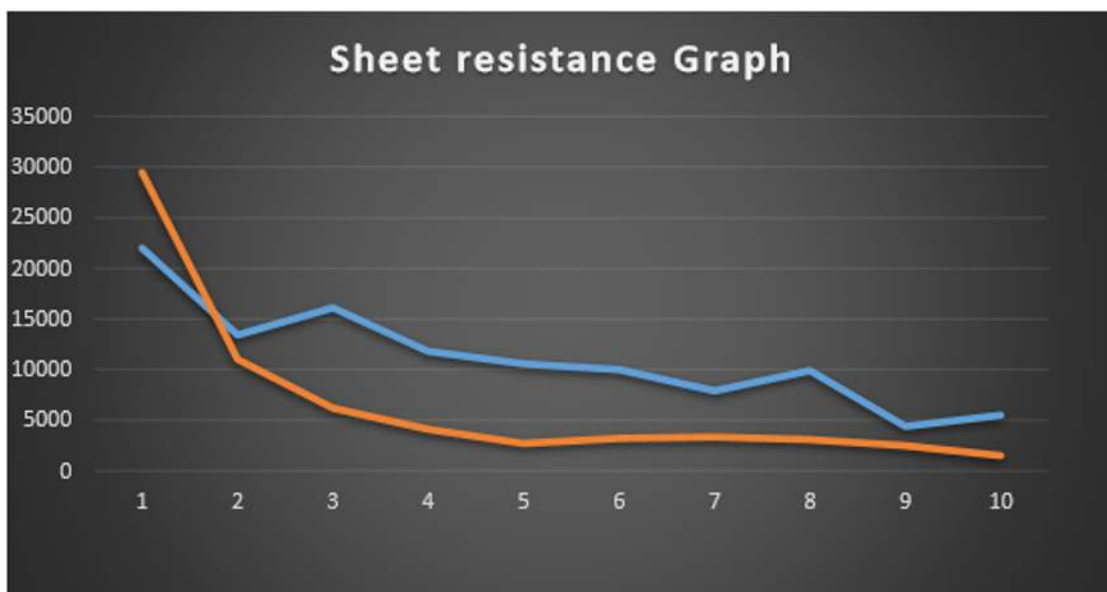


Εικόνα 181: Γραφική παράσταση της επιφανειακής αντίστασης R_s συναρτήσει της μεταβολής των ρευμάτων, για το δείγμα #1.

Στο παραπάνω διάγραμμα αναπαριστώνται 3 διαφορετικές περιοχές του δείγματος. Η μπλέ γραφική παράσταση αφορά ένα σημείο που δεν έχει ακτινοβοληθεί και έχει υποστεί την ελάχιστη θερμική επίδραση. Οι υπόλοιπες 2 γραφικές παραστάσεις (κίτρινη και πορτοκαλί) αφορούν 2

σημεία που έχουν ακτινοβοληθεί και εμφανίζουν ελάχιστη επιφανειακή αντίσταση στα 1000 με 1500 Ω/\square .

Όσον αφορά το δείγμα #3 που αφορούσε την ίδια πυκνότητα ενέργειας αλλά με προθέρμανση στους 400 °C, ακολουθήθηκε πάλι, η ίδια διαδικασία. Εντοπίστηκε ένα σημείο με την ελάχιστη θερμική επίδραση, ώστε να λειτουργήσει ως αναφορά. Σ' αυτό το σημείο, οι τιμές της επιφανειακής αντίστασης, παρουσιάζουν ελάχιστη τιμή στα 10000 Ω/\square . Στα υπόλοιπα σημεία, εντοπίστηκαν περιοχές, στις οποίες η ακτινοβολήση επέφερε μεγάλη μείωση της επιφανειακής αντίστασης, της τάξης των 1500 περίπου Ω/\square .



Εικόνα 182: Γραφική παράσταση της επιφανειακής αντίστασης R_s , συναρτήσει της μεταβολής των ρευμάτων για το δείγμα #3.

Αντίστοιχα με το δείγμα #1 και εδώ, η μπλέ γραφική παράσταση αφορά ένα σημείο που δεν έχει ακτινοβοληθεί. Η πορτοκαλί γραφική παράσταση, αφορά ένα σημείο εντός της περιοχής ακτινοβολήσης, για το οποίο η ελάχιστη επιφανειακή αντίσταση έχει τιμή γύρω στα 1300 με 1500 Ω/\square .

Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος ακτινοβολήσεων σε δείγματα, ώστε να εντοπιστούν ακτινοβολημένες περιοχές χωρίς αποδόμηση, στις οποίες μετρήθηκε η επιφανειακή τους αντίσταση. Για το CO₂ laser, μελετήθηκαν ακτινοβολήσεις χωρίς προθέρμανση αλλά και ακτινοβολήσεις που είχαν υποστεί προθέρμανση στους 400 °C. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός με τη χρήση της μεθόδου Van Der Pauw, εμφάνισε αξιόλογη μείωση της επιφανειακής αντίστασης από τα 10000 Ω/□ στις μη ακτινοβολημένες περιοχές στα 1500 περίπου Ω/□, για τις ακτινοβολημένες περιοχές.

Ωστόσο, η συσσώρευση πολλών ακτινοβολήσεων σε μικρά δείγματα wafer διαστάσεων 1x1,5 cm, παρόλο τον αρχικό σχεδιασμό για διατήρηση αποστάσεων αποφυγής επικάλυψης, παρατηρήθηκαν φαινόμενα αλληλοεπικάλυψης παλμών, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η αντιστοίχιση του πλήθους των παλμών με τις εξεταζόμενες περιοχές.

Στις ίδιες τιμές κυμάνθηκαν και τα δείγματα που είχαν υποστεί προθέρμανση στους 400 °C. Φαίνεται δηλαδή, η προθέρμανση σε αυτήν τη θερμοκρασία, να μην λειτουργεί προωθητικά για την ενεργοποίηση των προσμείξεων.

Κατα συνέπεια, ένας νέος κύκλος πειραμάτων για τις εντοπισμένες πυκνότητες ενέργειας αλλά με μεγαλύτερη διαθεσιμότητα δειγμάτων, ώστε το κάθε δείγμα να αντιστοιχεί σε μια μόνο ακτινοβολήση, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση τροχοδεικτικού laser και χρήση διαμαντίου “stylus” για τον εντοπισμό της ακτινοβοληθείσας περιοχής, θα αποτύπωνε με περισσότερη σαφήνεια την ποσοτική μεταβολή της επιφανειακής αντίστασης στην επιφάνεια των ακτινοβολημένων περιοχών. Ενισχυτικά, θα μπορούσε να ενσωματωθεί και μια διαταξη προθέρμανσης στους 650 βαθμούς, ώστε να προσδιοριστεί η ελάχιστη δυνατή R_s.

Όσον αφορά τη μελέτη της διάχυσης των προσμείξεων, αυτή δεν μπορεί να τεκμηριωθεί με βάση τις υπάρχουσες υποδομές, αλλά θα πρέπει να μελετηθεί με χρήση της μεθόδου SIMS. Με βάση παλιότερες δημοσιεύσεις, η ακτινοβολήση στο καθεστώς των ns απέδιδε μικρότερες τιμές διάχυσης σε σύγκριση με ακτινοβολήσεις της τάξης των ms, ωστόσο μια τέτοια εκτίμηση δεν μπορεί να υιοθετηθεί de jure, καθώς αφορούσε άλλες παραμέτρους ακτινοβολήσης.

Βιβλιογραφία

- [1]: “Ανόπτηση Πυριτίου με laser για το σχηματισμό ρηχών επαφών p-n”. Αντώνιος Φλωράκης, Διδακτορική διατριβή”, Ε.Μ.Π., 2011
- [2]: “Πειραματική Μελέτη και προσομοίωση της ταχείας ανόπτησης πυριτίου και γερμανίου σε καθεστώς μη τήξης”. Σπύρος Σταθόπουλος, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., 2015
- [3]: “Οπτοηλεκτρονική: Μια εισαγωγή”, John Wilson- John Hawkes, επιστημονική επιμέλεια: Α.Α Σεραφετινίδης, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [4]: “Αρχές Των lasers” Ο. Svelto, μεταφραση Α. Σεραφετινίδης – Γ. Κουρούκλης, εκδόσεις Συμμετρία.
- [5]: “Εφαρμοσμένη οπτική με θέματα οπτικοηλεκτρονικής και Laser”, Δ. Ζευγώλης, εκδόσεις Τζιόλα, 2007.
- [6]: “Gramming more components onto Integrated Circuits” , G. E Moore, Electronics Magazine 1965.
- [7]: Semiconductor Industry Association. International Technology Roadmap for Semiconductors.
- [8]: “Revolution in Miniature: The history and impact of semiconductor electronics”, E. Braun – S MacDonald, Cambridge University Press 1982.
- [9]: “Laser Beam Interactions with materials”, M.V. Allmen – A. Blatter, Springer – Verlag New York Inc, 1987.
- [10]: “CO₂ laser annealing of silicon”, K. Naukkarinen, J. of Applied Physics, 1982.
- [11]: “CO₂ laser annealing charecteristics of high-dose Boron- and Arsenic – implanted silicon”, M. Bloomberg, J. of Applied Physics, 1983.
- [12]: “Laser Processing and Chemistry, D Bauerle” , Springer.
- [13]: “Low Level Measurements, 5th edition”, KEITHLEY.
- [14]: “Semiconductor Material & Device Charecterization”, D. K. Shroder , Wiley publications, 1998.
- [15]: “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων” S.O Kasap, εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [16]: “Σημειώσεις Νανοηλεκτρονικών διατάξεων” , Δ.Π.Μ.Σ “Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις”, Δ. Τσουκάλας, Ε.Μ.Π.
- [17]: “Laser: Ξετυλίγοντας το νήμα της ανακάλυψης και των εφαρμογών”, Ζαχαρίας - Σιδέρης Χριστοδουλόπουλος, Μεταπτυχιακή Εργασία Ε.Μ.Π., 2015.
- [18]: “A method For Measuring The resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape”, Philips Res., 1958.
- [19]: “ Physics of Semiconductor Devices”, S.M Sze – Kwok K. NG.

Δημοσιεύσεις

Τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας δημοσιεύτηκαν στο διεθνές συνέδριο:
International Conference and School on Quantum Electronics “Laser Physics and Applications”,
που πραγματοποιήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2016, υπό την αιγίδα του “SPIE” στη Βουλγαρία:

Annealing of Boron doped Si-Wafers using pulsed infrared lasers

I. Tsilikas¹, V. Papadimitriou¹ and A.A. Serafetinides^{1*}.

S. Stathopoulos², L. Patsiouras², D. Tsoukalas².

*1,2Physics Department, School of Applied Mathematical and Physical Sciences,
1“Optoelectronics, Laser and their Applications Laboratory”*

2“Electronic Nanomaterials and Devices Group”

National Technical University of Athens, Zografou Campus, Athens 15780, Greece.

**corresponding author, A.A. Serafetinides tel. +30 210 7722931, e-mail aseraf@central.ntua.gr*