

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΉΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΙΑ ΚΟΥΦΟΠΟΥΛΟΥ

«ΕΓΧΑΡΑΞΗ ΔΙΑΦΑΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ ΜΕ LASER»

ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΕΣ:

ΜΑΡΙΑ ΚΑΝΔΥΛΑ, ΚΥΡΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ, ΙΘΦΧ/ΕΙΕ ΙΩΑΝΝΑ ΖΕΡΓΙΩΤΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΣΕΜΦΕ/ΕΜΠ

AOHNA, 02/2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΉΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

«Εγχάραξη διαφανών ηλεκτροδίων με laser»

"Laser scribing of transparent electrodes"

ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

ΜΑΡΙΑ ΚΟΥΦΟΠΟΥΛΟΥ

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

ΙΩΑΝΝΑ ΖΕΡΓΙΩΤΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΣΕΜΦΕ/ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)

ΜΑΡΙΑ ΚΑΝΔΥΛΑ, ΚΥΡΙΑ ΕΡΕΥΝΗΤΡΙΑ, ΙΘΦΧ/ΕΙΕ (Συν-επιβλέπουσα)

ΙΩΑΝΝΗΣ ΡΑΠΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΣΕΜΦΕ/ΕΜΠ (Μέλος)

AOHNA, 02/2023

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συντέλεσαν στην πραγματοποίησή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Δρ. Μαρία Κάνδυλα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και όλες τις ευκαιρίες και εμπειρίες που μου έδωσε με την ένταξή μου στο εργαστήριό της. Θα ήθελα να την ευχαριστήσω ακόμα για την καθοδήγησή της και τις γνώσεις της, τόσο στον θεωρητικό όσο και στο πειραματικό τομέα, καθόλη την πορεία της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ επίσης την Δρ. Ιωάννα Ζεργιώτη για την καθοδήγησή της στην ακαδημαϊκή μου πορεία και τις ευκαιρίες που μου έδωσε. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Ράπτη για την προθυμία του να είναι μέλος της εξεταστικής μου επιτροπή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νίκο Χρόνη ο οποίος με εμπιστεύτηκε για την υλοποίηση μέρους του πρότζεκτ του και μου έδωσε την ευκαιρία να παρακολουθήσω της έρευνα των φοιτητών του σε διαφορετικούς τομείς από τον δικό μου.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους ίδιους του φοιτητές, Δημήτρη Μπαρμπάκο και Βαρβάρα Μουζή, για την συνεργασία μας και την ευκαιρία που μου έδωσαν να γνωρίσω την ερευνά τους. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω πολύ τους φοιτητές Γιώργο Χατζηγιαννάκη και Νίκη Διαμαντοπούλου, του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών, οι οποίοι ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο πρότζεκτ πριν ξεκινήσω την διπλωματική μου και το αναλάβω.

Ευχαριστίες οφείλω και στον ερευνητή Δρ. Γιώργο Μούσδη (Ε.Ι.Ε.) για την βοήθειά του στις μετρήσεις φασματοσκοπίας υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου (UV-VIS-NIR spectroscopy), αλλά και στην διδακτορική φοιτήτρια Αλεξάνδρα Σινάνη (Ε.Ι.Ε.) για την καθοδήγηση και επίβλεψή της στις μετρήσεις του Προφιλομέτρου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να πω και σε όλους τους φοιτητές του εργαστηρίου για την υποστήριξή τους και το θερμό εργασιακό κλίμα του εργαστηρίου (Ε.Ι.Ε.)

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με στήριξαν και με στηρίζουν σε όλη αυτή την προσπάθεια.

.....

Μαρία Κουφοπούλου

© (2023) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις

και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ'αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία βασίζεται σε πειραματική κυρίως έρευνα με θέμα την εγχάραξη του υλικού ΙΤΟ από υπόστρωμα ΡΕΤ με την χρήση ακτινοβολίας laser. Στο πρώτο μέρος της εργασίας, γίνεται μια θεωρητική εισαγωγή σε πεδία χρήσιμα για την κατανόηση και αξιολόγηση των πειραμάτων, τα οποία αναλύονται στο δεύτερο μέρος της εργασίας.

Αρχικά η αλληλεπίδραση της ύλης με την ακτινοβολία laser εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, τόσο της δέσμης laser, όσο και των ιδιοτήτων του υλικού αλλά και του περιβάλλοντος κατεργασίας. Οι φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την κατεργασία της ύλης με ακτινοβολία laser χωρίζονται σε τρείς βασικούς μηχανισμούς, τον φωτοθερμικό, τον φωτοχημικό και τον φωτομηχανικό. Οι τρεις μηχανισμοί διαφέρουν στον τρόπο αποδόμησης του υλικού αλλά και στο αποτέλεσμα της κάθε αποδόμησης. Συνήθως κατά την επεξεργασία των υλικών υπάρχει συνδυασμός των τριών αυτών μηχανισμών. Οι εφαρμογές της κατεργασίας των υλικών με laser είναι ποικίλες και ευρέως διαδεδομένες στην βιομηχανία.

Υπάρχουν αρκετές έρευνες για την κατεργασία του ΙΤΟ με laser. Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την αποδόμηση και μελετώνται στην βιβλιογραφία αυτή, είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας laser, η διάρκεια του παλμού laser, ο βαθμός επικάλυψης των σημείων αποδόμησης, το πάχος των υμενίων ΙΤΟ αλλά και ο μηχανισμός της αποδόμησης, ο οποίος εξαρτάται από το υπόστρωμα του δείγματος. Το υλικό κατεργασίας είναι η σταθερά με την οποία ξεκίνησε η πειραματική έρευνα της διπλωματικής.

Για την επίτευξη της αποδόμησης του ΙΤΟ από υπόστρωμα ΡΕΤ έπρεπε να βρεθούν οι ιδανικές συνθήκες κατεργασίας. Στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε επιλέχθηκε η κατεργασία με ένα Nd:YAG laser, στην 3^η αρμονική του συχνότητα (355 nm). Για την απεικόνιση και την μελέτη τον αποτελεσμάτων της αποδόμησης χρησιμοποιήθηκε οπτική μικροσκοπία, προφιλομετρία και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Για την εύρεση των οπτικών ιδιοτήτων του δείγματος ITO/PET διεξάχθηκε φασματοσκοπία υπεριώδους-ορατούεγγύς υπέρυθρου.

Κατά την πειραματική διαδικασία, στόχος ήταν να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός της εστιακής απόσταση του φακού, της απόσταση του φακού ως προς το δείγμα, του πλήθους παλμών laser ανά σημείο αποδόμησης, της ενέργεια παλμού laser, της ταχύτητα της

κινούμενης βάσης και της χρήση διαφράγματος ή μη ώστε η αποδόμηση να έχει την καλύτερη δυνατή μορφή. Με της ιδανικές αυτές συνθήκες αποδόμησης εγχαράχθηκαν σχέδια στο δείγμα ώστε να είναι λειτουργικό σαν ηλεκτρική αντίσταση. Η αντίσταση αυτή βασίζεται στην ιδιότητα του υλικού ITO να είναι ηλεκτρικά αγώγιμο.

Ο σκοπός της ανάπτυξης αυτών των αντιστάσεων είναι η λειτουργία τους αρχικά ως θερμαντήρες με τελικό στόχο να χρησιμοποιηθούν ως αντιμικροβιακές επιφάνειες.

Λέξεις κλειδιά:

Αποδόμηση με laser, εγχάραξη λεπτών υμενίων, κατεργασία ITO

Abstract

This thesis is based mainly on experimental research on scribing of ITO material from PET substrate using laser radiation. In the first part of the thesis, a theoretical introduction to fields useful for the understanding and evaluation of the experiments is given. The experimental part is discussed in the second part of the thesis.

Firstly, the interaction of the materials with the laser radiation depends on several parameters such as the laser beam conditions, the properties of the material and the processing environment. The physical processes that take place during the treatment of matter with laser radiation are divided into three basic mechanisms, the photothermal, photochemical and photomechanical. The three mechanisms differ in the way the material is ablated and in the result of each ablation. Usually in the processing of materials there is a combination of these three mechanisms. There are numerous applications of laser treatment of materials with widespread appeal in industry.

There are several studies on the laser treatment of ITO. The main parameters affecting the ablation that are presented in literature are the wavelength of the laser radiation, the duration of the laser pulse, the overlap of the ablated spots, the thickness of the ITO films and the mechanism of ablation, which depends on the substrate material. The material of ITO on a substrate of PET was the constant with which the experimental research of the thesis was started.

To achieve the ablation of ITO from PET substrate, the ideal processing conditions had to be found. In the experimental setup, processing with a Nd:YAG laser, at its 3rd harmonic frequency (355 nm), was chosen. Optical microscopy, profilometry and scanning electron microscopy were used to visualize and study the results of the ablation. Ultraviolet-visible-near-infrared spectroscopy was performed to illustrate the optical properties of the ITO/PET sample.

During the experimental procedure, the aim was to find the appropriate combination of the focal length of the lens, the distance of the lens from the sample, the number of laser pulses per spot, the laser's pulse energy, the translation speed of the base and the use of aperture or not in order to get the best possible ablation. With these ideal conditions, patterns were scribed into

the sample to make it functional as an electrical resistor. This resistance is based on the property of the ITO material to be electrically conductive.

The purpose of developing these resistors is to function initially as heaters with the goal of using them as antimicrobial surfaces.

Keywords:

Laser ablation, scribing of thin films, ITO machining

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	6
Abstract	8
Περιεχόμενα	10
Εισαγωγή	13
Ι. Θεωρητικό μέρος	14
 Αλληλεπίδραση laser με ύλη 	14
 Παράγοντες που καθορίζουν την αλληλεπίδραση των υλικών με laser 	14
1.1.1. Παράμετροι laser	14
1.1.2. Ιδιότητες υλικού	15
1.1.3. Συνθήκες περιβάλλοντος κατεργασίας	16
1.2. Φυσικές διαδικασίες κατά την ακτινοβόληση ενός υλικού με laser	16
1.2.1. Φωτοθερμικός μηχανισμός	17
1.2.2. Φωτοχημικός μηχανισμός	20
1.2.3. Φωτομηχανικός μηχανισμός	20
1.3. Εφαρμογές κατεργασίας υλικού με laser	22
2. Αποδόμηση ITO με laser	24
2.1. Επίδραση μήκους κύματος δέσμης laser	25
2.2. Επίδραση διάρκειας παλμού laser	27
2.3. Επίδραση βαθμού επικάλυψης σημείων αποδόμησης	27
2.4. Επίδραση πάχους υμενίου ΙΤΟ	28
2.5. Μηχανισμός αποδόμησης ΙΤΟ	31
3. Υλικό κατεργασίας	33
3.1. Οξείδιο κασσίτερου ινδίου (ITO)	33
3.2. Δείγμα ITO/PET	34

II.	Πειρο	αματικό μέρος
4	Пε	ιραματικές τεχνικές35
	4.1.	Πειραματική διάταξη εγχάραξης laser:35
	4.2.	Nd:YAG Laser
	4.3.	Υπολογισμός ταχύτητας σάρωσης
	4.4.	Υπολογισμός διαμέτρου δέσμης laser
	4.5.	Εστιακή απόσταση φακού
	4.6.	Χρήση διαφράγματος στην δέσμη40
	4.7.	Σχεδιασμός και υπολογισμός αντιστάσεων41
	4.8.	Οπτικό μικροσκόπιο43
	4.9.	Προφιλόμετρο44
	4.10.	Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)45
	4.11.	Φασματοσκοπία υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου (UV-VIS-NIR
	spect	roscopy)46
5	Пε	ιράματα laser αποδόμησης του ΙΤΟ47
	5.1.	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ITO/PET47
	5.1. 5.2.	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ
	5.1.5.2.5.2	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ47 Προσδιορισμός βέλτιστων συνθηκών αποδόμησης του ΙΤΟ49 .1. Αποδόμηση ΙΤΟ με φακό εστίασης F = 50 mm50
	5.1.5.2.5.25.2	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ
	5.1. 5.2. 5.2 5.2	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ITO/PET
	5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ITO/PET
	5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2 5.2	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ITO/PET
	5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2 5.2 5.3. 5.3	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ
	5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2 5.3 5.3	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ
	5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2 5.3. 5.3	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ
	5.1. 5.2. 5.2 5.2 5.2 5.2 5.3 5.3 5.3	Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ

5.5.	Συζήτηση αποτελεσμάτων	67
6. Eo	ραρμογή θέρμανσης επιφανειών	68
6.1.	Αξιολόγηση αντίστασης ως θερμαντήρα	68
6.2.	Αντιμικροβιακή επιφάνεια	70
Βιβλιογρο	αφία	72
Παράρτη	μα 1	75

Εισαγωγή

Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε με την συνεργασία του Τομέα Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, και του Ινστιτούτου Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών.

Τα πειράματα της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών, στο εργαστήριο Laser structuring and functionalization of material and devices της Δρ. Μαρίας Κάνδυλα, του Ινστιτούτου Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας.

Το θεωρητικό μέρος της εργασίας πραγματεύεται αρχικά την αλληλεπίδραση της δέσμης laser με την ύλη. Εδώ μελετώνται οι παράγοντες που καθορίζουν αυτή την αλληλεπίδραση, οι φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την ακτινοβόληση ενός υλικού με laser με έμφαση στην διαδικασία της αποδόμησης του υλικού και τέλος οι εφαρμογές της κατεργασίας υλικών με laser. Στην συνέχεια γίνεται μια εκτενής αναφορά της βιβλιογραφίας στην κατεργασία ITO με laser και τελικά αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του υλικού του δείγματος που χρησιμοποιείται στα πειράματα αποδόμησης.

Τα πειράματα που υλοποιήθηκαν έχουν σκοπό να πετύχουν μια όσο το δυνατόν καλύτερη εγχάραξη του ΙΤΟ από το υπόστρωμα ΡΕΤ. Πιο συγκεκριμένα στο δείγμα που χρησιμοποιείται γίνεται τοπική αφαίρεση του λεπτού στρώματος ΙΤΟ με την χρήση παλμών laser, αφήνοντας ανέπαφο το υπόστρωμα ΡΕΤ. Επιτυγχάνοντας τις συνθήκες εγχάραξης, είναι δυνατή η κατασκευή μοτίβων πάνω στο δείγμα τα οποία θα έχουν κάποια λειτουργικότητα, που σχετίζεται με την αγωγιμότητα του δείγματος. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής σχεδιάστηκαν και εγχαράχτηκαν ηλεκτρικές αντιστάσεις οι οποίες με κατάλληλη εφαρμογή ρεύματος λειτουργούν σαν θερμαντήρες.

Η ανάπτυξη αυτών των αντιστάσεων γίνεται στα πλαίσια της συνεργασία με τον κ. Νίκο Χρόνη, καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., με σκοπό την εφαρμογή των θερμαντήρων ως αντιμικροβιακές επιφάνειες.

Ι. Θεωρητικό μέρος

1. Αλληλεπίδραση laser με ύλη

1.1. Παράγοντες που καθορίζουν την αλληλεπίδραση των υλικών με laser

Η αλληλεπίδραση των υλικών με την ακτινοβολία laser μπορεί να διαφέρει σημαντικά αλλάζοντας μία από τις παραμέτρους του laser, του υλικού ή και των συνθηκών του περιβάλλοντος κατεργασίας.

1.1.1. Παράμετροι laser

Υπάρχει μια πληθώρα παραμέτρων laser που μπορούν να επηρεάσουν την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη.

Αρχικά η λειτουργία του laser σαν παλμικό ή συνεχές. Με ένα laser συνεχούς λειτουργίας η θερμότητα μπορεί να διεισδύσει σε μεγαλύτερο βάθος στο υλικό λόγω του μεγάλου χρόνου (μεγαλύτερου του 1 μs) αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με αυτό. Σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος αλληλεπίδρασης του υλικού με την ακτινοβολία καθορίζεται από την ταχύτητα σάρωσης της δέσμης πάνω στο υλικό αλλά και την διάμετρο της δέσμης πάνω σε αυτό. Αντίθετα στην ακτινοβόληση ενός υλικού με παλμικό laser η θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη είναι πολύ μικρότερη αφού στο μικρό χρόνο του κάθε παλμικό laser η θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη είναι από την νύρω περιοχή του υλικού. Το βάθος της θερμοεπηρεαζόμενης ζώνης εξαρτάται από την διάρκεια του κάθε παλμού (ps, ns, fs) αλλά και τον ρυθμό επαναληψιμότητας των laser. Τα fs laser να έχουν την μικρότερη θερμική επιρροή στην γύρω περιοχή του υλικού. Και σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα σάρωσης του υλικού αλλά και η διάμετρος της δέσμης πάνω το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης.

Χαρακτηριστικό κάθε laser είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει, αφού αυτό καθορίζεται από τα ενεργειακά επίπεδα του ενεργού υλικού του laser. Επιπλέον μήκη κύματος είναι δυνατόν να παραχθούν από το ίδιο laser, τοποθετώντας μονάδες παραγωγής αρμονικών που αποτελούνται από μη γραμμικούς κρυστάλλους. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας έχει άμεση εξάρτηση με την απορρόφηση της ακτινοβολίας από κάθε υλικό. Με άλλα λόγια

διαφορετικά μήκη κύματος μπορεί να έχουν διαφορετική ανταπόκριση ως προς της οπτικές ιδιότητες (απορρόφηση, διάδοση, ανάκλαση) ενός υλικού. Σε ημιαγώγιμα και μονωτικά υλικά, για να υπάρξει σημαντική απορρόφηση της ακτινοβολίας, πρέπει τα μεμονωμένα φωτόνια της δέσμης laser να έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη με το ενεργειακό χάσμα του υλικού. Όσο μεγαλύτερη η ενέργεια των φωτονίων τόσο μικρότερο το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας με ύλη, έχει η ροή ενέργειας και η ροή ισχύος (ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας) της δέσμης laser. Αν η ένταση της δέσμης είναι χαμηλότερη από κατώφλι τήξης του υλικού κατεργασίας τότε η αλληλεπίδραση της δέσμης με το υλικό μπορεί να προκαλέσει ποικίλες διεργασίες που εξαρτώνται από την θερμοκρασία όπως επιφανειακή σκλήρυνση του υλικού, κάμψη και ρωγμές. Για τιμές της έντασης της δέσμης laser λίγο μεγαλύτερες από το κατώφλι τήξης, η τοπική θέρμανση του υλικού μπορεί να προκαλέσει τοπικά λιώσιμο του υλικού. Για υψηλότερες εντάσεις πάνω από το κατώφλι αποδόμησης, το υλικό θα οδηγηθεί σε εξάτμιση και εξάχνωση.

Ακόμα, το προφίλ της δέσμης μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της δέσμης laser με το υλικό. Το προφίλ της δέσμης αναπαριστά την κατανομή της ενέργειας στην διατομή της δέσμης, αφήνοντας διαφορετικό αποτύπωμα στο υλικό ανάλογα με την κατανομή που ακολουθεί. [1]

1.1.2. Ιδιότητες υλικού

Σημαντικοί παράμετροι για τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης ύλης με ακτινοβολία είναι και οι ιδιότητες του ίδιου του υλικού.

Αρχικά όπως ήδη αναφέρθηκε η οπτικές ιδιότητες του υλικού, καθορίζουν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του με την ακτινοβολία, που εξαρτάται από το μήκος κύματός της. Χαρακτηριστικά όπως το ενεργειακό χάσμα του υλικού, η απορροφητικότητα, η διαπερατότητα και η ανακλαστικότητα για κάποιο μήκος κύματος διαμορφώνουν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης για κάθε δέσμη laser ανάλογα το μήκος κύματός της.

Η θερμική αγωγιμότητα του υλικού έχει καθοριστικό ρόλο στην μεταφορά της θερμότητας σε αυτό. Τυπικά τα υλικά με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας έχουν και χαμηλό θερμικό συντελεστή διάχυσης. Σε τέτοια υλικά η κατεργασία με laser μπορεί να προκαλέσει μικρή θερμοεπηρεαζόμενη ζώνη και στενή ζώνη λιωμένου υλικού. Το σημείο τήξης του υλικού αλλά και η θερμοχωρητικότητά του καθορίζουν επίσης την ισχύ της δέσμης laser που θα χρειαστεί για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία.

Τέλος επιρροή μπορεί να υπάρξει και από τις χημικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών, κυρίως με έμμεσο τρόπο. Η στοιχειομετρία, η πυκνότητα, η δομή του υλικού (άμορφο ή κρυσταλλικό), η μικροδομή του, συμπεριλαμβανομένου δομικών ατελειών και της πορωσιμότητας, αλλά και το πάχος του υλικού αλλάζουν την θερμική αγωγιμότητά του και την απορροφητικότητά του, με έμμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή του αποτελέσματος της αλληλεπίδρασης του υλικού με την ακτινοβολία. Ακόμα η γεωμετρία και η τραχύτητα της επιφάνειας του υλικού είναι δυνατό να μεταβάλουν τα ποσοστά σκέδασης και ανάκλασης της επιφάνειας επηρεάζοντας τα αποτελέσματα της κατεργασίας με μια δέσμη laser. [1]

1.1.3. Συνθήκες περιβάλλοντος κατεργασίας

Συνθήκες περιβάλλοντος όπως η θερμοκρασία και η επιλογή των στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή με το υλικό κατά την διάρκεια της κατεργασίας, όπως η ύπαρξη κενού, ατμοσφαιρικού αέρα, κάποιου άλλου αερίου ή υγρού στοιχείου, μπορεί να επηρεάσει σε κάποιες περιπτώσεις το αποτέλεσμα της κατεργασίας με laser.

Συγκεκριμένα για την κατεργασία λεπτών υμενίων, η επιλογή του κατάλληλου υλικού ως υπόστρωμα είναι πολύ σημαντική. Το υλικό του υποστρώματος, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το κατώφλι τήξης και το κατώφλι αποδόμησης του υμενίου. Τέλος η διαφορά στον συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ του υλικού του υποστρώματος και του λεπτού υμενίου μπορεί να προκαλέσει μικρορωγμές και αποδόμηση κατά την ταχεία θέρμανση των υλικών με ακτινοβολία laser.[1]

1.2. Φυσικές διαδικασίες κατά την ακτινοβόληση ενός υλικού με laser

Κατά την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη παρουσιάζονται διάφορα φαινόμενα όπως ανάκλαση, περίθλαση, απορρόφηση, σκέδαση, και διάδοση της ακτινοβολίας από το υλικό. Το πιο σημαντικό και απαραίτητο από αυτά τα φαινόμενα, κατά την κατεργασία υλικού με δέσμη laser, είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Με την απορρόφηση της ακτινοβολίας από το υλικό ακολουθούν μια σειρά φυσικών διαδικασιών. Μια από αυτές τις διαδικασίες είναι και η αποδόμηση.

Η διαδικασία της αποδόμησης βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς και χρησιμοποιείται ευρέως για την κατεργασία πολλών υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, γυαλιά, πολυμερή αλλά και οργανικούς ιστούς. Για κάθε ένα από τα παραπάνω υλικά, ο μηχανισμός της αποδόμησης μπορεί να διαφέρει. Οι τρείς πιο διαδεδομένοι μηχανισμοί αποδόμησης που έχουν περιγράφει είναι οι εξής:

- Φωτοθερμικός
- Φωτοχημικός
- Φωτομηχανικός

Ο μηχανισμός που θα δράσει σε κάθε κατεργασία εξαρτάται από έναν συνδυασμό των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.1. Παρόλο της ύπαρξης μεγάλου όγκου δημοσιεύσεων για την διαδικασία της αποδόμησης, η θεωρητική μελέτη της βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Η κατανόηση όλων των μηχανισμών αποδόμησης για κάθε διαφορετική παράμετρο είναι περιορισμένη. Σε πολλές περιπτώσεις η αποδόμηση ενός υλικού δεν πραγματοποιείται αποκλειστικά από έναν μηχανισμό αλλά και από τον συνδυασμό τους [2]– [5].

1.2.1. Φωτοθερμικός μηχανισμός

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας laser προκαλεί μια σειρά φυσικών διαδικασιών οι οποίες επιτρέπουν την κατεργασία του υλικού από το laser. Οι διεργασίες αυτές είναι η θέρμανση, η τήξη , η εξάτμιση, η δημιουργία πλάσματος και η αποδόμηση του υλικού. Αναλογικά με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 1.1 είναι δυνατή η κατεργασία υλικών με αυτές τις φυσικές διεργασίες [6], [3].

Θέρμανση υλικού

Με την απορρόφηση της ακτινοβολίας laser, το υλικό μπορεί να θερμανθεί τοπικά για μικρό χρόνο και να ψυχθεί απότομα. Σε αυτή την διαδικασία προϋπόθεση είναι ότι δεν θα υπάρξει αλλαγή φάσης του υλικού. Ανάλογα με την διάρκεια παλμού του laser, στην επιφάνεια του υλικού παρατηρείται σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας λαμβάνοντας την μέγιστή τιμή στο τέλος της διάρκειας του παλμού με τον οποίο αλληλοεπιδρούσε. Μετά το τέλος του παλμού η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υλικού μειώνεται ραγδαία. Σε βαθύτερα της επιφάνειας σημεία του υλικού, η θερμοκρασία ακολουθεί παρόμοια κατανομή μεγίστου και ελαχίστου συγκριτικά με το χρόνο ακτινοβόλησης. Σε αυτή την περίπτωση όμως η μέγιστη θερμοκρασία είναι μικρότερη και λαμβάνεται λίγο μετά το πέρας του παλμού, με την χρονική αυτή διαφορά να αυξάνεται συναρτήσει του βάθους από την επιφάνεια του υλικού [6]. Αυτή η διαδικασία αναπαρίσταται θεωρητικά στο διάγραμμα της Εικόνας 1.1.



Εικόνα 1.1 Διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για διάφορα βάθη από την επιφάνεια του υλικού (τροποποιημένη εικόνα από [7]).

Τήξη υλικού

Σε αυτή την διαδικασία η ροή ισχύος του laser είναι τέτοια ώστε να ξεπερνάει το κατώφλι τήξεως του υλικού. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται αλλαγή φάσης του υλικού, από την στερεή στην υγρή φάση. Με την επαναστερεοποίηση του υλικού με μέτριους έως γρήγορους ρυθμούς παρατηρούνται λεπτές, σχεδόν ομογενείς δομές. Το λιώσιμο του υλικού, με χρήση ακτινοβολίας laser, μπορεί να γίνει πολύ στοχευμένα και με μεγάλη ακρίβεια αφήνοντας ανεπηρέαστα πιθανά θερμοευαίσθητα υλικά στην γύρω περιοχή [7].

Εξάτμιση υλικού

Όταν αυξηθεί η ροή ισχύος της δέσμης ή η διάρκεια του παλμού, και τοπικά η θερμοκρασία του υλικού ξεπεράσει το σημείο βρασμού του υλικού, τότε επέρχεται το φαινόμενο της

εξάτμισης της επιφάνειας του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση δεν θα αυξηθεί περαιτέρω το βάθος στο οποίο έχει λιώσει το υλικό.

Η θεωρητική προτυποποίηση αυτής της διαδικασίας είναι δύσκολη. Σε μία προσπάθεια περιγραφής του φαινομένου αναφέρεται στην δημιουργία ενός πολύ λεπτού στρώματος στην διεπιφάνεια στερεού – υγρού το οποίο ονομάζεται "στρώμα Knudsen". Σε αυτό το στρώμα υπάρχει μια μη συνεχής κατανομή της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με την θεωρητική αυτή προσέγγιση, η διαδικασία της εξάτμισης προκαλεί μια ανακρουστική πίεση η οποία ωθεί τους ατμούς και το υγρό προς τα έξω από την εστία της κατεργασίας [6]–[8].

Δημιουργία πλάσματος

Σαν συνέχεια της διαδικασίας της εξάτμισης είναι η δημιουργία πλάσματος. Το αέριο στρώμα που πλέον υπάρχει πάνω από το σημείο κατεργασίας αλληλοεπιδρά με την δέσμη laser, καθορίζοντας σημαντικά το συνολικό αποτέλεσμα της κατεργασίας του υλικού. Η δέσμη laser ιονίζει το αέριο στρώμα. Ο σχεδόν εξολοκλήρου ιονισμός του αερίου ονομάζεται πλάσμα [6].

Αποδόμηση υλικού

Στην περίπτωση που η ροή ισχύος του laser είναι αρκετή, πάνω από το κατώφλι αποδόμησης, δημιουργούνται όλες τις παραπάνω διαδικασίες και ακολουθεί και η αποδόμηση του υλικού. Δηλαδή ξεκινάει η διαδικασία απομάκρυνσης υλικού, είτε σε αέρια είτε σε υγρή μορφή από την εστία κατεργασίας του laser [6].



Εικόνα 1.2 Σχεδιάγραμμα φωτοθερμικής αποδόμησης υλικού [7].

1.2.2. Φωτοχημικός μηχανισμός

Ο φωτοχημικός μηχανισμός αποδόμησης παρατηρείται κυρίως στην ακτινοβόληση πολυμερικών υλικών με laser υπεριώδους ακτινοβολίας. Η απορροφούμενη ακτινοβολία διεγείρει τα ηλεκτρόνια των μορίων με αποτέλεσμα αυτά είτε να διασπαστούν φωτοχημικά είτε να απελευθερώσουν θερμική ενέργεια. Αναφέρεται ότι με τις φωτοχημικές διαδικασίες εμπλέκονται επίσης και θερμικές διαδικασίες. Όταν η ενέργεια της δέσμης laser είναι ικανοποιητική για να σπάσει τους δεσμούς του υλικού, τότε τα μόρια του υλικού αποκολλώνται και απομακρύνονται από την επιφάνεια κατεργασίας με μεγάλη ταχύτητα.

Η φωτοχημική αποδόμηση ενός υλικού οδηγεί σε ομοιόμορφη αφαίρεση του υλικού χωρίς καταστροφή της γύρω περιοχής όπως παρατηρείται από τον φωτοθερμικό μηχανισμό. Έχει παρατηρηθεί όμως ότι κατά τον φωτοχημικό μηχανισμό μπορεί να δημιουργηθούν φωτοπροϊόντα μέσα στο υλικό κατεργασίας [9], [10].

1.2.3. Φωτομηχανικός μηχανισμός

Η αποδόμηση ενός υλικού με φωτομηχανικό μηχανισμός είναι η διαδικασία με την οποία η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το στόχο δημιουργεί μηχανικές τάσεις οι οποίες οδηγούν το υλικό στην θραύση και την εκτίναξή του. Ενεργειακά η αποδόμηση θραυσμάτων του υλικού είναι πιο αποδοτική από την συνεχή αποδόμηση μεμονωμένων μορίων της επιφάνειας με χημικές διαδικασίες και εξάτμιση. Ο μηχανισμός αυτός προτιμάται κυρίως σε οργανικούς ιστούς καθώς ως ψυχρή αποδόμηση δεν προκαλεί θερμική φθορά στο στόχο. Στην φωτομηχανική αποδόμηση ένα μέρος της απορροφούμενης ακτινοβολίας laser μετατρέπεται σε θερμοελαστική τάση ενώ ένα άλλο μέρος της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε πλαστική παραμόρφωση του υλικού, στην δημιουργία εσωτερικών ρωγμών και κενών αλλά και στην κινητική ενέργεια θραυσμάτων της επιφάνειας του υλικού.

Έχει παρατηρηθεί ότι στα laser βραχέων παλμών, ακουστικά κύματα συνοδεύουν την ακτινοβολία. Τα κύματα αυτά προέρχονται από την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο υλικό και την θερμική διαστολή του και τελικά την ύπαρξη θερμοελαστικών τάσεων. Οι θερμοελαστικές τάσης τελικά, με την ταχεία απελευθέρωσή τους, προκαλούν ακουστικά κύματα. Αυτά τα κύματα σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν ή να συνεισφέρουν στην αποδόμηση του υλικού με φωτομηχανικό μηχανισμό, δηλαδή με θραύση και εκτίναξη του υλικού.

Η διαδικασία στην οποία προκαλείται αλλοίωση και αποδόμηση του υλικού από τάση ενός κρουστικού κύματος ονομάζεται «θρυματοποίηση» (spallation). Κατά την διαδικασία αυτή το κρουστικό κύμα εισέρχεται στο υλικό και δημιουργώντας απότομες μεταβολές στην τάση μπορεί να προκαλέσει θραύση και αποκόλληση του υλικού (Εικόνα 1.3) [2], [5].



Εικόνα 1.3 Φωτομηχανική αποδόμηση με θρυματοποίηση. Τροποποιημένη εικόνα από [5] a) η θερμική διαστολή του όγκου που ακτινοβολείται από παλμό λέιζερ προκαλεί μηχανικές τάσεις b) κατά τη διάδοση του κρουστικού κύματος από την ελεύθερη επιφάνειας αναπτύσσεται μια βαθμιαία εφελκυστική συνιστώσα c) σε κάποιο βάθος η εφελκυστική αντοχή ζεπερνάται και το υλικό θρύβεται d-e) αποκόλληση και εκτίναζη του υλικού από τη μετωπική επιφάνεια.

1.3. Εφαρμογές κατεργασίας υλικού με laser

Η κατεργασία υλικών με laser είναι μία από της βασικές εφαρμογές των laser. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία αυτή έχει εισαχθεί τόσο στην μαζική παραγωγή όσο και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές [11].

Με την κατάλληλη χρήση των φυσικών διαδικασιών που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1.2 είναι δυνατή μια πληθώρα εφαρμογών στην κατεργασία υλικών όπως φαίνονται και στην Εικόνα 1.4. Ανάλογα με τον σκοπό της κατεργασίας, γίνεται ο παρακάτω διαχωρισμός κατηγοριών κατεργασίας των υλικών:

- Διαμόρφωση
- Συγκόλληση
- Μηχανουργική κατεργασία
- Επιφανειακή κατεργασία

Διαμόρφωση υλικών

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν διαδικασίες όπως η κάμψη του υλικού αποκλειστικά με ακτινοβόληση με laser χωρίς να είναι αναγκαία κάποια εξωτερική μηχανική τάση στο υλικό. Για την επίτευξή αυτού του σκοπού χρησιμοποιείται η φυσική διαδικασία της θέρμανσης του υλικού τοπικά. Η κάμψη με laser έχει εφαρμογή κυρίως σε λεπτά μεταλλικά φύλλα της τάξεως των 1-2 mm. Επιπλέον η ακτινοβόληση με υψηλής ισχύος laser δίνει την δυνατότητα για ελεγχόμενη θερμική κατεργασία αλλάζοντας το σχήμα, της διαστάσεις και την γεωμετρία του υλικού. Μια από τις πιο πρόσφατες εφαρμογές της κατεργασίας υλικών με laser είναι η ανάπτυξη μικρών και σύνθετων προτύπων, μέσω στερεοποιείται είναι εφικτή η κατασκευή στερεών εξαρτημάτων με μεγάλη ακρίβεια κατευθύνοντας την δέσμη laser κατάλληλα. Αυτή η διαδικασία είναι δυνατή λόγω της μεγάλης ακρίβειας και αυτοματοποίησης της κίνησης της δέσμης laser που προσφέρεται από την σύνδεσή του laser με υπολογιστή. Σημαντική ακόμα εφαρμογή είναι και η διαδικασία χρωματισμού επιφανειών με laser. Καθώς ορισμένα υλικά έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν χρώμα με την ακτινοβόλησή τους με ακτινοβολία laser.

Συγκόλληση υλικών

Η συγκόλληση υλικών πραγματοποιείται με laser υψηλής ισχύος και επιτρέπει την ένωση δύο διαφορετικών ή μη υλικών. Τα πλεονεκτήματα αυτή της διαδικασίας με laser έναντι συμβατικών τεχνικών είναι η υψηλή ταχύτητα ένωσης, η μικρή θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, και η επιλογή αυτοματοποίησης της διαδικασίας. Για να επιτευχθεί η συγκόλληση των υλικών θα πρέπει η ισχύς του laser να είναι αρκετή ώστε να προκαλέσει τήξη των υλικών. Διαδικασίες συγκόλλησης μπορούν να πραγματοποιηθούν τόσο για μεταλλικά υλικά όσο και κεραμικά/γυαλιά αλλά και ημιαγωγούς.

Μηχανουργική κατεργασία υλικών

Σε αυτή την κατεργασία αναφέρονται οι εφαρμογές που απαιτούν αφαίρεση υλικού με σταθερό ρυθμό αποδόμησης και μεγάλη χωρική ακρίβεια. Τέτοιες κατεργασίες είναι η κοπή, το τρύπημα, η εγχάραξη και ο καθαρισμός υλικών. Αυτές οι διεργασίες είναι εφαρμόσιμες σε οποιοδήποτε υλικό με τις κατάλληλες συνθήκες. Η κοπή με laser έχει εφαρμοστεί σε πολλά καθημερινά εμπορικά προϊόντα αλλά και σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές όπως ραδιενεργά υλικά που είναι μια πολύ σημαντική εφαρμογή. Στην δημιουργία οπών με laser παρατηρείται μια πιο καθαρή οπή συγκριτικά με άλλες μεθόδους και δυνατότητα κατασκευής της με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς. Η διαδικασία της εγχάραξης βρίσκει εφαρμογές κυρίως στην βιομηχανία μικροηλεκτρονικών διατάξεων και αναφέρεται στην ανάπτυξη γραμμών οι οποίες χρησιμεύουν στον διαχωρισμό ενός μεγάλου υποστρώματος σε μικρότερα μεμονωμένα κυκλώματα. Τέλος η εφαρμογή καθαρισμού αποτελεί αφαίρεση μικρών σωματιδίων από μια επιφάνεια κάποιου υλικού μέσω της διαδικασίας της αποδόμησης.

Επιφανειακή κατεργασία υλικών

Καθώς η επιφάνεια ενός υλικού είναι αυτή που έρχεται σε επαφή με το περιβάλλον είναι και αυτή που δέχεται είτε διάβρωση είτε της μεγαλύτερες μηχανικές τάσεις συγκριτικά με τον υπόλοιπο όγκο του υλικού. Για αυτό το λόγο εφαρμογές όπως η σκλήρυνση της επιφάνειας μπορούν να μειώσουν την φθορά του υλικού, η οποία επιτυγχάνεται με θέρμανση του υλικού με ακτινοβολία laser. Επίσης η ακτινοβόληση του δείγματος μέχρι να φτάσει το σημείο τήξης η επιφάνεια και η άμεση επαναστερεοποίησή της μπορούν να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Η ανάπτυξη κραμάτων αποτελεί επίσης σημαντική εφαρμογή κατά την οποία ισχυρά εστιασμένη δέσμη laser λιώνει την επίστρωση ενός υλικού και μέρος του υποστρώματος ώστε να δημιουργηθεί κράμα των δύο υλικών στην επιφάνεια του δείγματος. Τέλος η ανάπτυξη επίστρωσης κάποιου υλικού αρχικής μορφής πούδρας πάνω σε ένα υπόστρωμα είναι δυνατή με ακτινοβολία laser.[11]–[14]



Εικόνα 1.4 Διάγραμμα εφαρμογών κατεργασίας υλικών με laser συγκριτικά με την ροή ισχύος και το χρόνο αλληλεπίδρασης της δέσμης με το υλικό[13]

2. Αποδόμηση ΙΤΟ με laser

Λόγω της πληθώρας εφαρμογών και της ευρείας χρήσης των λεπτών υμενίων ΙΤΟ στην βιομηχανία, υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις για την αποδόμησή του με laser. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των διαδικασιών αποδόμησης συγκρίνοντας την επίδραση διαφόρων παραγόντων στην αποδόμηση του ΙΤΟ με laser.

2.1. Επίδραση μήκους κύματος δέσμης laser

Τα μήκη κύματος που έχουν μελετηθεί για αποδόμηση του ΙΤΟ με laser καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, από το κοντινό υπέρυθρο μέχρι το υπεριώδες. Τα laser που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF και KrF. Κατά συνέπεια και τα μήκη κύματος αυτών είναι 248 nm, 262 nm, 266 nm, 349 nm, 355 nm, 523 nm, 532 nm, 1047 nm, 1064 nm από το υπεριώδες στο υπέρυθρο. Η αποδόμηση του ΙΤΟ ήταν δυνατή για όλα τα μήκη κύματος καθώς υπάρχει, έστω και μικρή, απορρόφηση του ΙΤΟ για κάθε ένα από αυτά όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 που αναπαριστά τον συντελεστή απορρόφησης για ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος (300 nm-1200 nm).



Εικόνα 2.1 Αναπαράσταση συντελεστή απορρόφησης ΙΤΟ συναρτήσει των μηκών κύματος [15].

Αυτό που διαφοροποιείται αρκετά για την αποδόμηση από το ένα μήκος κύματος στο άλλο είναι η ροή ενέργειας που απαιτείται για να γίνει η αποδόμηση του ΙΤΟ αλλά και το αποτέλεσμα της αποδόμησης μορφολογικά στο δείγμα.

Τα πιο συνηθισμένα υποστρώματα του λεπτού υμενίου του ΙΤΟ είναι το γυαλί και το ΡΕΤ, παρόλα αυτά υπάρχουν και πειράματα κατεργασίας του ΙΤΟ πάνω σε υπόστρωμα άμορφου πυριτίου. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί φαίνεται ότι το υπόστρωμα διαφοροποιεί αρκετά το αποτέλεσμα της αποδόμησης με το κατάλληλο μήκος κύματος της αποδόμησης να εξαρτάται και από το υπόστρωμα του δείγματος προς επεξεργασία. Στην αποδόμηση του ΙΤΟ πάνω σε υπόστρωμα ΡΕΤ, παρατηρήθηκε διαφορετικό αποτέλεσμα αποδόμησης για κάθε μήκος κύματος από τα 1064 nm, 532nm και 355 nm [16]–[18]. Πιο συγκεκριμένα για μήκος κύματος 1064 nm τα τοιχώματα του σημείου αποδόμησης είναι ομοιόμορφα και σαφώς καθορισμένα χωρίς να παρατηρείτε κάποια σημαντική αλλοίωση στην γύρω περιοχή του ΙΤΟ. Για τα μήκη κύματος 532 nm και 355 nm παρατηρείται μια πιο άστατη αποδόμηση, με το ΙΤΟ στα τοιχώματα της αποδόμησης να έχει αποκολληθεί από το υπόστρωμα και σε κάποια σημεία να παρουσιάζει ρωγμές. Αυτό οφείλεται στο μηχανισμό αποδόμησης που δρα το κάθε μήκος κύματος για αυτό το υπόστρωμα (Κεφάλαιο 2.5). Για μήκος κύματος 248 nm του excimer laser KrF επιτεύχθηκε επίσης αποδόμηση αποκλειστικά του ΙΤΟ όμως δεν είναι διαδεδομένη η χρήση του λόγω του ότι και το ΡΕΤ έχει μεγάλη απορροφητικότητα σε αυτό το μήκος κύματος με αποτέλεσμα να είναι πολύ εύκολο να παρατηρηθεί αλλοίωση του ΡΕΤ κατά την κατεργασία [19].

Αντίθετα στα δείγματα στα οποία το υπόστρωμα ήταν γυαλί η πιο ομαλή αποδόμηση παρατηρήθηκε στην υπεριώδη ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, για την υπέρυθρη και την ορατή ακτινοβολία, το γυαλί θεωρείται διαφανές. Δηλαδή είναι κυρίως διαπερατό και απορροφά ελάχιστο ποσοστό της ακτινοβολίας. Λόγω αυτού η αποδόμηση του ΙΤΟ παρουσίασε μια κυματοειδής μορφολογία στις άκρες των γραμμών αποδόμησης για τα μήκη κύματος της υπέρυθρης (1047 nm) και ορατής (523 nm και 532 nm). Στην υπεριώδη περιοχή της ακτινοβολίας το γυαλί είναι πιο απορροφητικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αποδόμηση να είναι πολύ πιο ομαλή μορφολογικά στα άκρα της γραμμής αποδόμησης. Πιο καλή αποδόμηση παρατηρείται στα 266 nm και 262 nm και 349 nm [20], [21].

Τέλος σε υπόστρωμα άμορφου πυριτίου η ιδανική αποδόμηση παρατηρείται για μήκος κύματος 355 nm. Η απορρόφηση του άμορφου πυριτίου στην υπεριώδη ακτινοβολία είναι μεγαλύτερη από την απορρόφησή του στην υπέρυθρη ακτινοβολία. Για τα 266 nm παρόλο που επιτεύχθηκε αποδόμηση του ΙΤΟ χωρίς καταστροφή του υποστρώματος, μορφολογικά τα τοιχώματα της γραμμής αποδόμησης δεν ήταν τόσο καλά καθορισμένα. Επίσης για μήκος κύματος 1064 nm, οι γραμμές αποδόμησης στα τοιχώματα παρουσίαζαν μεγάλη θερμική φθορά. Αντίθετα για τα 355 nm ακτινοβολίας laser, πιθανά λόγω του ότι η ενέργεια των φωτονίων αυτού του μήκους κύματος (3.49 eV) είναι πολύ κοντά στο ενεργειακό χάσμα του υλικού (3.6-4 eV), παρατηρήθηκε ομαλή αποδόμηση [15].

2.2. Επίδραση διάρκειας παλμού laser

Η τεχνολογία των παλμικών laser δίνει την δυνατότητα στην παραγωγή laser διαφορετικών διάρκειας παλμών, με τα πιο διαδεδομένα και ευρέως χρησιμοποιούμενα να είναι τα nanosecond (1 ns = 10^{-9} s), τα picosecond (1 ps = 10^{-12} s) και τα femtosecond (1 fs = 10^{-15} s).

Σύγκριση για το αποτέλεσμα της αποδόμησης ITO, σε υπόστρωμα PET, με laser διαφορετικής διάρκειας παλμών έχει γίνει για nanosecond και picosecond laser. Και τα δύο συστήματα λειτουργούν σε μήκος κύματος 532 nm με ρυθμό επαναληψιμότητας παλμών ~100 kHz. Οι διάρκειες παλμού είναι ~15 ns και ~10 ps αντίστοιχα.

Και στις δύο αποδομήσεις για ενέργεια κοντά στην ενέργεια κατωφλίου παρατηρήθηκε αλλοίωση του υποστρώματος PET όπου για το ns laser είναι λίγο πιο έντονη από ότι για το ps laser. Επιπλέον το πλάτος αποδόμησης της γραμμής με το ps laser είναι μικρότερο από αυτό της αποδόμησης με ns laser. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στην μείωση της θερμικής διάχυσης με τους ps παλμούς καθώς ο χρόνος αλληλεπίδρασης της ύλης με την ακτινοβολία είναι μικρότερος από ότι με τους ns παλμούς. Επιπλέον σε υπερταχείς παλμούς laser παρατηρούνται φαινόμενα μη γραμμικής απορρόφησης. Έτσι είναι δυνατή η επεξεργασία υλικών με υψηλό ενεργειακό χάσμα, από μικρότερης ενέργειας φωτόνια εφόσον η ένταση της δέσμης είναι αρκετά υψηλή. Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα και την μείωση του πλάτους σημείου αποδόμησης [18].

Η μείωση των διαστάσεων επεξεργασίας αλλά και η ελαχιστοποίηση των θερμικών φαινομένων γίνεται ακόμα πιο έντονη στα femtosecond laser [22]. Συγκεκριμένα για αποδόμηση ITO επιτεύχθηκαν διαστάσεις αποδόμησης της τάξεως των nm για μήκος κύματος δέσμης laser στα 1030 nm [23].

2.3. Επίδραση βαθμού επικάλυψης σημείων αποδόμησης

Ο αριθμός των παλμών ανά σημείο αποδόμησης καθορίζεται από τον ρυθμό επαναληψιμότητας του laser, την ταχύτητα της σάρωσης της δέσμης αλλά και τις διαστάσεις της δέσμης στο σημείο αποδόμησης. Στην περίπτωση της αποδόμησης του ITO σε υπόστρωμα γυαλιού, ο μεγάλος βαθμός επικάλυψης θεωρείται επιθυμητός καθώς δημιουργεί μια πιο ομοιόμορφη μορφολογικά αποδόμηση στις άκρες τις γραμμής. Ιδιαίτερα για πολύ λεπτά υμένια ITO η επικάλυψη των παλμών μειώνει την καταστροφή του υμενίου προκαλώντας μικρότερες θερμικές τάσεις στο υλικό, αφού η ενέργεια του κάθε παλμού θα είναι μικρότερη

ώστε η συνολική ροή ενέργειας να είναι ίδια [24]. Αντίθετα για μικρότερα ποσοστά επικάλυψης παρατηρείται μια τραχύτητα στην αποδόμηση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.2 [25]. Στην περίπτωση που το υπόστρωμα του δείγματος είναι PET, τότε ο μεγάλος βαθμός επικάλυψης αλλά και η επαναληψιμότητα της αποδόμησης στο ίδιο σημείο προκαλεί καταστροφή του υποστρώματος. Πιο συγκεκριμένα ακόμα και αν η συνολική ροή ενέργειας που πέφτει στο δείγμα είναι σταθερή, η πιθανότητα για αλλοίωση του PET είναι σημαντική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προτιμάται η αποδόμηση του ΙΤΟ σε υπόστρωμα PET [18], [19].



Εικόνα 2.2 Αποδόμηση ITO σε υπόστρωμα γυαλιού με Nd:YAG laser μήκους κύματος 355 nm και α) βαθμό επικάλυψης 0% b) βαθμό επικάλυψης 34% c) βαθμό επικάλυψης 75%. Τροποποιημένη εικόνα από [25].

2.4. Επίδραση πάχους υμενίου ΙΤΟ

Αναφέρεται στην βιβλιογραφία πως το πάχος του υμενίου ΙΤΟ έχει επίδραση στο κατώφλι ροής ενέργειας που χρειάζεται για να γίνει η αποδόμηση και είναι συνάρτηση του μήκους κύματος του laser που θα χρησιμοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα με ένα ns Nd: YVO4 laser, για το θεμελιώδες μήκος κύματος του (1064 nm) και τις αρμονικές του (532 nm, 355 nm, 266 nm), μελετήθηκε η εξάρτηση του πάχους του υμενίου του ΙΤΟ σε υπόστρωμα γυαλιού με ενδιάμεσο στρώμα 15 nm SiO₂.

Αναφέρεται πως για τιμές του πάχους του υμενίου μικρότερες από το βάθος απορρόφησης του υλικού για κάθε μήκος κύματος, το κατώφλι αποδόμησης μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του υμενίου του ΙΤΟ. Αντίθετα για τιμές του πάχους του υμενίου μεγαλύτερες από το βάθος απορρόφησης του υλικού, το κατώφλι αποδόμησης αυξάνεται όσο αυξάνεται και το πάχος του υμενίου του ΙΤΟ. Για τα μεταλλικά λεπτά υμένια όταν το πάχος του υμενίου ξεπεράσει το μήκος θερμική διάχυσής τους τότε το κατώφλι αποδόμησης παίρνει σταθερή τιμή [24].

Ως βάθος απορρόφησης του υλικού ορίζεται το μέγεθος 1/α [nm], όπου α είναι ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού και εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που θα

προσπέσει στο υλικό. Το μήκος θερμική διάχυσής είναι μια παράμετρος που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των θερμικών αλληλεπιδράσεων νετρονίων σε ένα συμπαγές υλικό. Το μήκος θερμικής διάχυσης είναι η χαρακτηριστική απόσταση μεταξύ του σημείου στο οποίο ένα νετρόνιο γίνεται θερμικό και του σημείου της τελικής σύλληψής του [26].

Στην Εικόνα 2.3 καταγράφεται το βάθος απορρόφησης συναρτήσει του μήκους κύματος για το ITO αλλά και το μήκος θερμικής απορρόφησης. Διαπιστώνεται ότι για όλα τα μήκη κύματος εκτός του 266 nm, το βάθος απορρόφησης είναι μεγαλύτερο από το μήκος θερμικής απορρόφησης.

Όπως διαπιστώνεται από την Εικόνα 2.4 για πάχη υμενίου ΙΤΟ από 90 nm έως 150 nm με βήμα 20 nm, η ροή ενέργειας κατωφλίου αποδόμησης μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του υμενίου. Η διαπίστωση αυτή γίνεται για τα μήκη κύματος 1064 nm, 532 nm και 355 nm όπου σε κάθε περίπτωση το πάχος του υμενίου είναι μικρότερο και από το βάθος απορρόφησης αλλά και από το μήκος θερμικής απορρόφησης.

Για το μήκος κύματος 266 nm τα πάχη του υμενίου 130 nm και 150 nm βρίσκονται πάνω από το βάθος απορρόφησης του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνεται (Εικόνα 2.5) η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει το κατώφλι ροής ενέργειας στην αποδόμηση. Η ελάχιστή αυτή τιμή λαμβάνεται στο σημείο που το πάχος του υμενίου ΙΤΟ είναι κοντά στα 125 nm, δηλαδή στο βάθος απορρόφησης του υλικού για το μήκος κύματος 266 nm [27].

	ITO
1/α at 1064 nm	740 nm
1/α at 532 nm	4600 nm
1/α at 355 nm	1500 nm
1/α at 266 nm	125 nm
Thermal diffusivity	$2.3 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$
Thermal diffusion	152 nm
length at the rate of	
τ_{pulse} 10 ns	

Εικόνα 2.3 Πίνακας βάθους απορρόφησης συναρτήσει του μήκους κύματος για το ITO. Τροποποιημένη εικόνα από [27].

	1064 nm	532 nm	355 nm
90 nm	1.13 J/cm ²	2.47 J/cm ²	1.30 J/cm ²
110 nm	1.05 J/cm ²	1.99J/cm ²	1.26 J/cm ²
130 nm	0.98 J/cm ²	1.86 J/cm ²	1.25 J/cm ²
150 nm	0.91 J/cm ²	1.70J/cm ²	1.24 J/cm ²

Εικόνα 2.4 Πίνακας ροής ενέργειας κατωφλίου αποδόμησης συναρτήσει του μήκους κύματος και του πάχους του υμενίου ΙΤΟ. Τροποποιημένη εικόνα από [27].



Εικόνα 2.5 Γραφική παράσταση ροής ενέργειας κατωφλίου αποδόμησης συναρτήση του πάχους υμενίου ITO για μήκος κύματος αποδόμησης 266 nm. Τροποποιημένη εικόνα από [27].

2.5. Μηχανισμός αποδόμησης ΙΤΟ

Η πιο σημαντική παράμερος που καθορίζει τον μηχανισμό της αποδόμησης του ΙΤΟ είναι το υπόστρωμα του δείγματος. Οι οπτικές και θερμομηχανικές ιδιότητες του υποστρώματος του λεπτού υμενίου του ΙΤΟ είναι αυτές που καθορίζουν το μηχανισμό αποδόμησης με laser.

Υπόστρωμα γυαλιού

Στην περίπτωση που γίνεται αποδόμηση του ΙΤΟ από υπόστρωμα γυαλιού, ο μηχανισμός που προκαλεί την αποδόμηση είναι ο φωτοθερμικός. Αυτό προκύπτει από την ύπαρξη τοιχωμάτων λειωμένου και επαναστεροποιημένου ΙΤΟ στα άκρα της αποδόμησης για όλες τις περιοχές που φάσματος ακτινοβολίας laser. Η θερμική αποδόμηση του ΙΤΟ από το γυαλί πιθανά να οφείλεται στον γεγονός ότι η θερμοκρασία τήξης του γυαλιού είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία τήξης του ΙΤΟ. Για την αποδόμηση στην υπέρυθρη και την ορατή ακτινοβολία το γυαλί είναι τελείως διαφανές με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κυματικές δομές στις άκρες του καναλιού αποδόμησης. Λίγο βελτιωμένη δομή παρατηρήθηκε στην υπεριώδη ακτινοβολία και συγκεκριμένα στα 355 nm όπου το γυαλί έχει μια μικρή απορροφητικότητα. Για την ακτινοβόληση με laser μήκους κύματος 266 nm παρατηρήθηκε έντονα βελτιωμένη αποδόμηση με λείες γραμμές η οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι το γυαλί είναι έντονα απορροφητικό σε αυτό το μήκος κύματος [20]–[22].

Υπόστρωμα ΡΕΤ

Αντίθετα κατά την αποδόμηση του ΙΤΟ από υπόστρωμα ΡΕΤ η εξολοκλήρου αποδόμηση του με φωτοθερμικό μηχανισμό δεν θα ήταν δυνατή καθώς η θερμοκρασία τήξης του ΙΤΟ (~ 2030 °C) είναι πολύ υψηλότερη από την θερμοκρασία τήξης του ΡΕΤ (~ 230 °C). Ο επικρατέστερος μηχανισμός αποδόμησης σε αυτή την περίπτωση είναι η αποκόλληση του ΙΤΟ από το ΡΕΤ. Η αποκόλληση αυτή προκύπτει από μηχανικές τάσεις που ασκούνται στο ΙΤΟ από το ΡΕΤ. Πιο συγκεκριμένα κατά την θέρμανση από την ακτινοβολία laser, το ΙΤΟ και το ΡΕΤ υφίστανται θερμική διαστολή. Το μέτρο ελαστικότητας του ΡΕΤ (4 GPa) είναι πολύ μικρότερο από το μέτρο ελαστικότητας του ΙΤΟ (250 GPa), αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν δραματικές διαφορές στη διαστολή των υλικών και τελικά την πρόκληση τάσεων που μπορούν να ξεπεράσουν την αντοχή της διεπιφάνειας των δύο υλικών [28], [29]. Παρόλο που παρατηρείται η αποκόλληση του ΙΤΟ ως η κύρια αιτία αποδόμησης, αναφέρεται στην βιβλιογραφία ότι και θερμικά φαινόμενα μπορούν να προκληθούν κατά την αποδόμηση. Για την αποδόμηση με laser μήκους κύματος 355 nm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6 (α), η άκρη του σημείου αποδόμησης αποκολλήθηκε από το υπόστρωμα και κυρτώθηκε. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη λειωμένου ΙΤΟ στο κέντρο της αποδόμησης, που δεν έφτασε το σημείο εξάτμισης, το οποίο αφαιρέθηκε από κρουστικά κύματα, ενώ το περιφερειακό στρώμα του ΙΤΟ έχει μαλακώσει και κατά την ψύξη συρρικνώνεται δημιουργώντας αυτή την κύρτωση. Η καθαρή γεωμετρία αποδόμησης καταδεικνύει ότι η αποκόλληση, και όχι η εξάτμιση, ήταν το κυρίαρχο αποτέλεσμα κατά τη διάρκεια της αποδόμησης με μήκος κύματος 355 nm. Για τα 532nm, η κυρτωμένη άκρη δεν ήταν τόσο εμφανής, αλλά η αποκόλληση του ΙΤΟ από το υπόστρωμα εξακολουθεί να παρατηρείται. Από το βάθος της αποδόμησης και την παρατηρούμενη άκρη της κατεργασίας, συμπεραίνεται ότι το αποτέλεσμα της αποδόμησης θα μπορούσε να είναι ένας συνδυασμός εξάτμισης και αποκόλλησης του ΙΤΟ από το ΡΕΤ. Για τα 1064 nm η αποδόμηση του ITO δοκιμάστηκε από την πίσω πλευρά του δείγματος. Δηλαδή η δέσμη laser εστιαζόταν στο ITO περνώντας μέσα από το υπόστρωμα PET το οποίο είναι αρκετά διαπερατό για αυτή την ακτινοβολία. Σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρήθηκε έντονη αποκόλληση ούτε κύρτωση του ΙΤΟ και για αυτό συμπεραίνεται ότι η αποδόμηση αυτή οφείλεται κυρίως σε εξάτμιση. Το κόστος αυτή της αποδόμησης όμως είναι η έντονη καταστροφή του υποστρώματος PET. Για τα μήκη κύματος 355 nm και 532 nm η διαδικασία της αποκόλλησης παρατηρούνταν για οποιαδήποτε ροή ενέργειας πάνω από του κατωφλίου αποδόμησης [16], [17], [30].



3. Υλικό κατεργασίας

3.1. Οξείδιο κασσίτερου ινδίου (ITO)

To ITO ή αλλιώς οξείδιο κασσίτερου ινδίου (Indium Tin Oxide) είναι ένα διαφανές αγώγιμο οξείδιο. Οι εφαρμογές που βρίσκει στην βιομηχανία είναι πολλές, με πιο σημαντικές τις οθόνες αφής, τα φωτοβολταϊκά, και τα LED.

Ο μοριακός τύπος του ΙΤΟ είναι In_2O_5Sn . Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από οξείδια ινδίου (In) με προσμίξεις οξειδίου του κασσίτερου (Sn), των οποίων οι συγκεντρώσεις πιθανά διαφέρουν ανάλογα τον κατασκευαστή. Το ΙΤΟ έχει μοριακό βάρος 428.34 g/mol [31].



Εικόνα 3.1 Απεικόνιση χημικής δομής ITO https://pubchem.ncbi.nlm .nih.gov/compound/Indiu m-tin-oxide-_In1.69Sn0.15O2.85

Το οξείδιο κασσίτερου ινδίου είναι ένας ημιαγωγός n-τύπου με ευρύ ενεργειακό χάσμα τυπικά της τάξεως των 3.8-4 eV με μεγάλη

πυκνότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων στο κάτω μέρος της ζώνης αγωγιμότητας. Παρόλο που η διαπερατότητα και η ανακλαστικότητα του ΙΤΟ μπορεί να διαφέρει ανάλογα το πάχος του υμενίου και τον τρόπο κατασκευής του, γενικά είναι υψηλά διαπερατό στην ορατή ακτινοβολία ενώ η διαπερατότητά του μειώνεται όσο το μήκος κύματος της ακτινοβολίας πλησιάζει το ενεργειακό χάσμα του λεπτού υμενίου ΙΤΟ [32].

Ο συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient *α*) του υλικού ορίζεται ως ο αντίστροφος του βάθους απορρόφησης (1/*α*), όπου είναι η απόσταση στην οποία η αρχική ένταση της ακτινοβολίας που πέφτει στο υλικό μειώνεται στο 1/ε της αρχικής της τιμής. Τελικά ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται από την σχέση $\alpha = \frac{2\kappa\omega}{c} = \frac{4\pi\kappa}{\lambda_0}$, όπου κ είναι ο συντελεστής στο φανταστικό μέρος του συντελεστή διάθλασης του υλικού ($n = \eta + i\kappa$) και δηλώνει την απορρόφηση του φωτός και λ_0 είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο κενό [33]. Για το ITO ο συντελεστής απορρόφησης για μήκος κύματος ακτινοβολίας 355 nm είναι $\alpha = 4 \times 10^6$ m⁻¹ [32].

Θερμοχωρητικότητα είναι ένα μετρήσιμο φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει την ποσότητα θερμότητας [Joule] που χρειάζεται να προσφερθεί σε ένα υλικό για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό Κέλβιν. Η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα μάζας του ΙΤΟ είναι περίπου 340 J/kgK [34].

Το ΙΤΟ σαν υλικό είναι εύθραυστο για αυτό τα λεπτά υμένια του ΙΤΟ εναποτίθενται σε κάποιο υπόστρωμα. Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα είναι το γυαλί και το πολυμερές PET. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η ιδιότητα του ΙΤΟ να είναι διαφανές στο ορατό ενώ ταυτόχρονα ενισχύονται οι μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής.

Τα λεπτά υμένια του ITO έχουν εκτεταμένη χρήση στην ηλεκτρονική και κυρίως στις οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCDs). Όμως, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη κατανάλωση του ινδίου σε αλκαλικές μπαταρίες και ηλιακές κυψέλες λεπτών υμενίων, τα αποθέματα ινδίου τελειώνουν και η τιμή του αυξάνεται. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος δοκιμάζονται και άλλα διαφανή αγώγιμα οξείδια όπως το οξείδιο του ψευδαργύρου με προσμίξεις αλουμινίου ή γαλλίου (AZO και GZO) [35].

3.2. Δείγμα ΙΤΟ/ΡΕΤ

Το δείγμα που χρησιμοποιείται για τα πειράματα αυτή της διπλωματικής είναι ένα εμπορικό προϊόν με επικάλυψη οξειδίου κασσίτερου ινδίου (ITO) σε υπόστρωμα τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET) (Indium tin oxide coated PET). Η εταιρεία παραγωγής αυτού του προϊόντος είναι η sigma-aldrich.

Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) είναι ένα διαφανές (στην ορατή ακτινοβολία), άμορφο πολυμερές, εύκαμπτο με καλές μηχανικές ιδιότητες [36].

Το προϊόν διατίθεται σε λεπτά φύλλα πάχους περίπου 0.13 mm. Σύμφωνα με την εταιρεία κατασκευής το δείγμα έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Ειδική επιφανειακή αντίσταση : 45-65 Ohm/sq
- Διαπερατότητα στα 550 nm : ≥78.0%
- Πυκνότητα ITO : 1200 g/cm³
- Πάχος στρώματος ΙΤΟ : 1300 Å

Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας που δεν θα προκαλέσει ρωγμές στην επικάλυψη του ITO του δείγματος είναι 75 mm [37].

Π. Πειραματικό μέρος

Στα παρακάτω κεφάλαια παρουσιάζονται όλες οι πειραματικές τεχνικές, τα όργανα στα οποία έγιναν μετρήσεις αλλά και όλη η διαδικασία των πειραμάτων αποδόμησης με laser και τα αποτελέσματά τους για το εμπορικό δείγμα ITO/PET.

4. Πειραματικές τεχνικές

4.1. Πειραματική διάταξη εγχάραξης laser:

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα Nd:YAG laser της εταιρείας Litron Lasers. Το μήκος κύματος που χρησιμοποιήθηκε είναι $\lambda = 355$ nm (3^η αρμονική συχνότητα). Αποτελεί ένα παλμικό laser μέγιστης ενέργειας 200 mJ, με διάρκεια παλμού 4-7 ns και ρυθμό επαναληψιμότητας από 0.1 έως 10 Hz.

Η οπτική διαδρομή της διάταξης ρυθμίζεται από τα κάτοπτρα, τις ίριδες και τον φακό εστίασης όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.1 και 4.2. Για την καθοδήγηση της δέσμης στο δείγμα, χρησιμοποιείται μια σειρά πέντε κατόπτρων, τα οποία είναι ανακλαστικά στο μήκος κύματος 355 nm. Πριν από το τελευταίο κάτοπτρο είναι τοποθετημένες δύο ίριδες οι οποίες διευκολύνουν στην ευθυγράμμιση του συστήματος. Όλη η διαδικασία ευθυγράμμισης της διάταξης γίνεται με στόχο να περάσει η δέσμη από το κέντρο του φακού εστίασης με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο φακοί εστίασης, ο πρώτος με εστιακή απόσταση F = 50 mm και ο δεύτερος με εστιακή απόσταση F = 25.4 mm. Η θέση του φακού αλλάζει κατά τον κατακόρυφο άξονα z με την χρήση ενός μικρομετρικού κοχλία μεταβάλλοντας με τον τρόπο αυτόν τον βαθμό εστίασης της δέσμης στην επιφάνεια του δείγματος.

Το δείγμα τοποθετείται πάνω σε μια κινούμενη βάση. Η βάση αυτή κινείται μηχανικά στο επίπεδο, στους άξονες x και y και είναι κατασκευασμένη από την εταιρεία Standa. Τα μοτέρ στους δύο άξονες κινούνται βηματικά με κάθε βήμα να είναι 2.5 μm. Ο χειρισμός της βάσης γίνεται μέσω του προγράμματος XILab το οποίο πέραν τον βασικών εντολών μετακίνησης δίνει επιπλέον την δυνατότητα στην δημιουργία προγραμμάτων για την αυτοματοποιημένη λειτουργία της βάσης.

Για την μέτρηση της ενέργειας της δέσμης χρησιμοποιείται ένα ενεργόμετρο της εταιρείας Scientech το οποίο τοποθετείται μετά την πρώτη ίριδα.



Εικόνα 4.1 Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης laser αποδόμησης ITO.



Εικόνα 4.2 Πειραματική διάταξη laser αποδόμησης ΙΤΟ.
4.2. Nd:YAG Laser

Ta laser Νεοδυμίου αποτελούν τον πιο δημοφιλή τύπο laser στερεάς κατάστασης. Ta Nd:YAG laser έχουν σαν ενεργό υλικό τον κρύσταλλο $Y_3Al_5O_{12}$, κοινά αποκαλούμενο YAG (Yttrium Aluminum Garnet), όπου ιόντα Nd³⁺ έχουν αντικαταστήσει κάποιες από τις θέσεις του Y³⁺ του κρυστάλλου. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του Νεοδυμίου είναι τα 1064 nm και αποτελεί ένα σύστημα τεσσάρων επιπέδων. Ta laser αυτά μπορούν να αναπτυχθούν είτε σε παλμικής είτε σε συνεχούς λειτουργίας και διεγείρονται οπτικά με λυχνίες Ξένου (Xe) ή Κρυπτού (Kr) [38]. Με την χρήση μονάδων παραγωγής αρμονικών συχνοτήτων είναι δυνατή η παραγωγή συνήθως και τεσσάρων αρμονικών με μήκη κύματος για την δεύτερη αρμονική στα 532 nm, για την τρίτη αρμονική στα 355 nm και για την τέταρτη αρμονική στα 266 nm.

Στην πειραματική διάταξη αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε ένα Nd:YAG laser της εταιρείας Litron Lasers. Αποτελεί ένα παλμικό laser μήκους κύματος $\lambda = 1064$ nm, μέγιστης ενέργειας 70 mJ, με διάρκεια παλμού 4-7 ns και ρυθμό επαναληψιμότητας (Repetition Rate, R.R.) από 0.1 έως 10 Hz. Η επικινδυνότητα του laser είναι κλάσης 4. Με την χρήση μιας μονάδας παραγωγής αρμονικών συχνοτήτων μπροστά από το laser χρησιμοποιούμε την 3^η αρμονική συχνότητα του Nd:YAG με μήκος κύματος $\lambda = 355$ nm. Η μονάδα τροφοδοσίας του laser είναι το μοντέλο LPU350 της ίδιας εταιρείας.

4.3. Υπολογισμός ταχύτητας σάρωσης

Η ταχύτητα σάρωσης είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται η βάση και το δείγμα που βρίσκεται πάνω της. Με την κατάλληλη ταχύτητα είναι δυνατή η εγχάραξη γραμμών και σχημάτων στο επίπεδο. Για να είναι εφικτή η κίνηση στο επίπεδο ορίζονται δύο ταχύτητες, μία για κάθε άξονα x,y. Η ταχύτητα σάρωσης εξαρτάται από την διάμετρο του ίχνους της δέσμης του laser πάνω στο δείγμα, τον αριθμό των παλμών που απαιτούνται να χτυπήσουν σε κάθε σημείο του δείγματος, ώστε να γίνει η αποδόμηση, και το ρυθμό επαναληψιμότητας του laser (Repetition Rate R.R.).

ταχύτητα σάρωσης =
$$\frac{\delta i \dot{\alpha} \mu \varepsilon \tau \rho o \varsigma \dot{\zeta} \chi v o v \varsigma}{\alpha \rho i \theta \mu \dot{\delta} \pi \alpha \lambda \mu \dot{\omega} v} \times (R.R.) \left[\frac{\mu m}{s}\right]$$

Η διάμετρος του ίχνους της δέσμης ενδέχεται να διαφέρει σε κάθε άξονα, καθώς η δέσμη συνήθως έχει ελλειψοειδές σχήμα και όχι κυκλικό, συνεπώς και η ταχύτητες σάρωσης σε κάθε άξονα να είναι διαφορετικές.

Στην περίπτωση γκαουσιανής δέσμης laser, για την εγχάραξη ομοιόμορφης γραμμής είναι σημαντικό να υπάρχει και κάποια επικάλυψη των παλμών. Ορίζουμε τον βαθμό επικάλυψης α με $0 \le \alpha < 1$, ο οποίος είναι το ποσοστό που επικαλύπτονται δύο παλμοί. Η ταχύτητα σάρωσης με επικάλυψη παλμών α ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

ταχύτητα σάρωσης =
$$\frac{(\delta i \dot{\alpha} \mu \varepsilon \tau \rho o \varsigma \dot{(} \chi \nu o \upsilon \varsigma) \times (1 - \alpha)}{\alpha \rho i \theta \mu \dot{o} \pi \alpha \lambda \mu \dot{\omega} \nu} \times (R.R.) \quad \left[\frac{\mu m}{s}\right]$$

Στην περίπτωση μη γκαουσιανής δέσμης, όπως αυτή που δημιουργήθηκε στα παρακάτω πειράματα μετά την προσθήκη διαφράγματος, παρουσιάστηκε μια μεγαλύτερη δυσκολία στον υπολογισμό της ταχύτητας θεωρητικά. Πιο συγκεκριμένα λόγω του ότι και στην μικρή επικάλυψη δύο παλμών η συνολική ενέργεια που έπεφτε στα σημεία επικάλυψης ήταν σχεδόν διπλάσια ήταν πολύ πιο πιθανό να δημιουργηθεί αλλοίωση στο PET. Σε αυτή την περίπτωση η αρχική τιμή των ταχυτήτων υπολογίστηκε με τις παραπάνω σχέσεις προσεγγιστικά και τελικά διαμορφώθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

4.4. Υπολογισμός διαμέτρου δέσμης laser

Ο υπολογισμός της διαμέτρου της δέσμης laser είναι μια διαδικασία που δεν έχει μεγάλη ακρίβεια παρόλα αυτά είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ροής ενέργειας που πέφτει σε κάθε σημείο του δείγματος. Η διάμετρος της δέσμης μπορεί να μετρηθεί σε οποιαδήποτε απόσταση από το laser είτε και μετά την χρήση φακών εστίασης. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής χρήσιμο ήταν να καθοριστεί η διάμετρος αυτή στο σημείο που γίνεται η κατεργασία του δείγματος. Αναλυτικότερα καθορίστηκε η διάμετρος της δέσμης στην εστιακή απόσταση του φακού εστίασης που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά.

Υπολογισμός για αυτό το μέγεθος μπορεί να γίνει και θεωρητικά όμως και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα δεν έχει μεγάλη ακρίβεια καθώς δεν είναι το προφίλ της δέσμης πάντα ιδανικά γκαουσιανό. Αν και υπάρχουν ανιχνευτές και ειδικός εξοπλισμός τα οποία δείχνουν με μεγαλύτερη ακρίβεια το προφίλ της δέσμης και κατά συνέπεια και εμβαδόν της δέσμης [39] δεν κρίνεται αναγκαία η χρήση τους καθώς υπάρχουν οικονομικότερες και γρηγορότερες διαδικασίες για τον προσδιορισμό αυτό. Οι παράμετροι οι οποίες καθορίζουν την διάμετρο της δέσμης laser στο σημείο της εστίας, είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας του laser, η εστιακή απόσταση του φακού εστίασης, η διάμετρος της δέσμης πριν το φακό και ο συντελεστής M² που καθορίζει το προφίλ της δέσμης laser. Στην ιδανική γκαουσιανή κατανομή της δέσμης ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμή 1. Η διάμετρος της δέσμης που βγαίνει από το laser είναι ανάλογη και με την ενέργεια των παλμών της δέσμης που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Στα πειράματα αυτά αποφασίστηκε να μετρηθεί η διάμετρος της δέσμης με την χρήση φωτοευαίσθητου χαρτιού το οποίο είναι μια συνηθισμένη και απλή τεχνική και δίνει μια ικανοποιητική ακρίβεια για αυτά τα πειράματα. Σε αυτή την περίπτωση το φωτοευαίσθητο χαρτί τοποθετούνταν ώστε η επιφάνειά του να είναι στο σημείο της δέσμης που θέλουμε να μετρήσουμε την διάμετρο του ίχνους της. Με αυτόν τον τρόπο η επιφάνεια του χαρτιού που εκτίθεται σε ένα παλμό της δέσμης αλλάζει χρώμα και με την βοήθεια ενός μικροσκοπίου είναι δυνατός ο προσδιορισμός του εμβαδού της δέσμης σε αυτό το σημείο.

Όταν στην διάταξη προστέθηκε το διάφραγμα, η ενέργεια του laser, που ήταν κατάλληλη για την αποδόμηση του ΙΤΟ, ήταν πολύ μικρή με αποτέλεσμα να μην αφήνει αποτύπωμα στο φωτοευαίσθητο χαρτί. Σε αυτή την περίπτωση το εμβαδόν της δέσμης μετρήθηκε κατευθείαν από το αποτύπωμα (ίχνος) που άφησε η δέσμη στο δείγμα για 1 παλμό. Η πραγματική διάμετρος της δέσμης συγκριτικά με αυτό που μετρήθηκε από το αποτύπωμα της δέσμης στο δείγμα θεωρείται ότι δεν διαφέρει πολύ.

4.5. Εστιακή απόσταση φακού

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δύο συγκλίνοντες φακοί. Ο πρώτος με εστιακή απόσταση F = 50 mm και ο δεύτερος με F = 25.4 mm. Σαν συνέπεια της απόστασης εστίασης της δέσμης από το φακό είναι και το μέγεθος της εστίας. Πιο συγκεκριμένα όσο πιο κοντά στο φακό επιτυγχάνεται η εστίαση της δέσμης τόσο πιο ισχυρή είναι και συνεπώς τόσο μικρότερη η διάμετρος της δέσμης στην εστία.



Εικόνα 4.3 Σύγκριση εστιακής απόστασης με την διάμετρο της δέσμης laser.

4.6. Χρήση διαφράγματος στην δέσμη

Σε κάποια από τα παρακάτω πειράματα τοποθετήθηκε ένα διάφραγμα στην διάταξη (κλείσιμο ίριδας) ώστε να μειωθεί περαιτέρω η διάμετρος του ίχνους της δέσμης laser στην εστία. Σε αυτή την περίπτωση το διάφραγμα επιτρέπει την διέλευση μόνο του κέντρου της δέσμης κόβοντας περιμετρικά την υπόλοιπη δέσμη. Η οπή του διαφράγματος που χρησιμοποιήθηκε είναι περίπου 2 mm. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4.4, η κατανομή της δέσμης αρχικά μεταβάλλεται καθώς περνάει από το διάφραγμα. Η δέσμη που εξέρχεται αρχικά από το laser είναι γκαουσιανή ΤΕΜΟΟ. Παρόλο που αμέσως μετά το διάφραγμα μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει την τετραγωνική κατανομή (Top-Hat), γνωρίζουμε ότι στο μακρινό πεδίο έχει και πάλι γκαουσιανή μορφή [40]. Το σημείο που η δέσμη laser, στην διάταξη των πειραμάτων, αλληλοεπιδρά με το δείγμα μπορεί να θεωρηθεί μακρινό πεδίο. Επομένως όλα τα πειράματα διεξάγονται τελικά με γκαουσιανή δέσμη, με την προσθήκη διαφράγματος να επηρεάζει τον συντελεστή στης Γκαουσιανής κατανομής (M²) ο οποίος προσεγγίζει καλύτερα την ιδανική τιμή 1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της διαμέτρου της εστίας του laser στο δείγμα.



Εικόνα 4.4 Μεταβολή κατανομής δέσμης μετά το διάφραγμα.

Στην περίπτωση του τετραγωνικού προφίλ της δέσμης, όταν υπάρχει επικάλυψη των παλμών σε μία εγχάραξη, τα σημεία στα οποία γίνεται η επικάλυψη δέχονται συνολική ενέργεια σχεδόν διπλάσια. Η επικάλυψη των παλμών όμως είναι αναγκαία ώστε να μην υπάρχουν σημεία ανάμεσα στους παλμούς στα οποία δεν έχει γίνει εγχάραξη.

Αντίθετα με γκαουσιανό προφίλ δέσμης τα περιφερειακά σημεία δεν έχουν δεχτεί όση ενέργεια δέχονται τα σημεία που είναι στο κέντρο της δέσμης με αποτέλεσμα η επικάλυψη των παλμών να δημιουργεί μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας στο δείγμα.

4.7. Σχεδιασμός και υπολογισμός αντιστάσεων

Στα πλαίσια αυτή της διπλωματικής χρειάστηκε να σχεδιαστεί μια αντίσταση η οποία θα ικανοποιεί τις παρακάτω προϋποθέσεις ώστε να χρησιμοποιηθεί ως θερμαντήρας.

Για να κατασκευαστεί αντίσταση στο δείγμα ΙΤΟ/ΡΕΤ θα πρέπει να γίνει εγχάραξη του ΙΤΟ σε συγκεκριμένα σημεία ώστε οι περιοχές αυτές να είναι ηλεκτρικά μονωμένες και οι υπόλοιπες, ανέπαφες περιοχές, να είναι ο αγώγιμος δρόμος. Με αυτό τον τρόπο το ρεύμα θα οδηγείται στην επιθυμητή διαδρομή ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη αντίσταση και κατ' επέκταση η κατάλληλη θέρμανση του δείγματος.

Αρχικά η αντίσταση θα έπρεπε να είναι της τάξεως των 300-500 Ω ώστε να μπορεί να τροφοδοτηθεί με καλώδιο USB που δίνει τάση 5 V και ρεύμα 1 Α με ικανοποιητική ισχύ για

την συγκεκριμένη εφαρμογή. Αναγκαία προϋπόθεση ήταν η αντίσταση που θα κατασκευαστεί να θερμαίνεται ομοιόμορφα. Πιο συγκεκριμένα για να επιτευχθεί η ομοιόμορφη θέρμανση, χωρίς να υπάρχει τοπική αύξηση της θερμοκρασίας (hot spot), χρειάζεται η διαδρομή που θα ακολουθήσει το ρεύμα να έχει το ίδιο πλάτος σε όλη την επιφάνεια του δείγματος ώστε το ρεύμα να συναντά την ίδια αντίσταση παντού. Επίσης, χρειάστηκε οι διαστάσεις του δείγματος να είναι τουλάχιστον 2x2 cm και το ρεύμα να περνάει από όλο το δείγμα ώστε να θερμανθεί ολόκληρη η επιφάνειά του.

Η τιμή της αντίστασης δίνεται από την σχέση $R = R_s \frac{L}{W}$, όπου R_s η ειδική επιφανειακή αντίσταση (surface resistivity), L το μήκος που διανύει το ρεύμα και W το πλάτος της διαδρομής που θα περάσει το ρεύμα. Από πληροφορίες του κατασκευαστή του δείγματος ITO/PET δίνεται ότι $R_s = 60 \Omega/sq$.

Με τα παραπάνω δεδομένα, έπειτα από αρκετές προσπάθειες σχεδίασης, τα δύο σχέδια της Εικόνας 4.5 ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στα ζητούμενα.



Εικόνα 4.5 Σχέδια κατασκευής αντιστάσεων α) θεωρητική αντίσταση 540 Ω b) θεωρητική αντίσταση 350 Ω για 117 έως 437 εσωτερικές γραμμές από ανάλογα με τις συνθήκες αποδόμησης. Τα γκρι και πορτοκαλί παραλληλόγραμμα στα σχέδια απεικονίζουν τις θέσεις στις οποίες πρέπει να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια ώστε να μετρηθεί σωστά η αντίσταση του θερμαντήρα αλλά και να τροφοδοτηθεί με ρεύμα.

Στο σχέδιο α) χωρίζεται το δείγμα σε τρία μέρη ώστε να έχουμε W = 0.67 cm. Άρα αναγκαστικά θα έχουμε περίπου L = 6 cm για το 2x2 cm δείγμα. Η αντίσταση θα είναι $R = R_s \frac{L}{W} = 60 * 6/0.667 = 540$ Ω. Λίγο μεγαλύτερη αντίσταση από την επιθυμητή.

Για το σχέδιο b) χαράζονται γραμμές μέσα στο δείγμα παράλληλες μεταξύ τους οι οποίες θα μειώνουν την αντίσταση αλλάζοντας το πλάτος που θα περνάει το ρεύμα από το δείγμα. Θεωρείται δηλαδή ότι το πάχος της κάθε γραμμής μειώνει το W και άρα αυξάνει λίγο την αντίσταση. Ο αριθμός των γραμμών εξαρτάται από το πάχος τους. Στο Κεφάλαιο 5.2 αναφέρονται δύο βασικές συνθήκες αποδόμησης η κάθε μία με διαφορετικά πάχη αποδόμησης.

i) Θεωρείται ότι γίνεται η αποδόμηση με πάχος της κάθε γραμμής στα 40 μm = 40 $*10^{-4}$ cm (φακός εστίασης laser 25.4 mm). Η αντίσταση στην περιοχή των γραμμών επιλέγεται να είναι $R = 350 \ \Omega$. Αφού το μήκος που αντιστοιχεί στην αντίσταση αφού τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια είναι L = 1.5 cm, δηλαδή το μήκος των γραμμών αποδόμησης σύμφωνα με το σχέδιο, τότε από την σχέση $R = R_s \frac{L}{W}$ συνεπάγεται ότι πρέπει W = 0.25 cm. Αρα W = (ολικό πλάτος δείγματος) - (# γραμμών)*(πλάτος κάθε γραμμής) =>

 $W = 2 - n \times 40 \times 10^{-4}$ cm => n ≈ 437 γραμμές.

ii) Θεωρείται ότι γίνεται η αποδόμηση με πάχος της κάθε γραμμής στα 150 μm = 150 *10⁻⁴ cm (φακός εστίασης laser 50 mm). Η αντίσταση στην περιοχή των γραμμών επιλέγεται να είναι R = 350 Ω. Αφού το μήκος που αντιστοιχεί στην αντίσταση αφού τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια είναι L = 1.5 cm, δηλαδή το μήκος των γραμμών αποδόμησης σύμφωνα με το σχέδιο, τότε από την σχέση $R = R_s \frac{L}{W}$ συνεπάγεται ότι πρέπει W = 0.25 cm. Άρα W = (ολικό πλάτος δείγματος) - (# γραμμών)*(πλάτος κάθε γραμμής) => $W = 2 - n \times 150 \times 10^{-4}$ cm => n ≈ 117 γραμμές.

Αποφασίστηκε ότι μόνο το πρώτο σχέδιο (Εικόνα 4.5 a) θα κατασκευαστεί και θα δοκιμαστεί πειραματικά καθώς ο σχεδιασμός του είναι πιο απλός και λιγότερο χρονοβόρος συγκριτικά με το δεύτερο σχέδιο.

4.8. Οπτικό μικροσκόπιο

Η οπτική μικροσκοπία αποτελεί την πιο εύκολα προσβάσιμη μέθοδος χαρακτηρισμού της εγχάραξης και κατά συνέπεια και την πρώτη διαγνωστική απεικόνιση που πραγματοποιείται μετά από κάθε αποδόμηση. Με την οπτική μικροσκοπία είναι δυνατό να μετρηθεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια οι διαστάσεις της αποδόμησης αλλά και το αν έχει αφαιρεθεί το ITO χωρίς την καταστροφή του PET. Μια μικρή αλλοίωση του PET μπορεί να μην γίνει εύκολα αισθητή με αυτή την μέθοδο.

Το μικροσκόπιο του εργαστηρίου είναι της εταιρείας Bresser και οι μεγεθύνσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν x20 και x80. Μέσω της εφαρμογής CamApp οι εικόνες του μικροσκοπίου αποθηκεύονται κατευθείαν στον υπολογιστή. Για καλύτερη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το μικροσκόπιο του συστήματος φασματοσκοπίας Raman της εταιρείας Renishaw, μοντέλο inVia. Οι μεγεθύνσεις που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μικροσκόπιο ήταν x5, x20 και x50.

Μετά από την οπτική απεικόνιση του δείγματος ακολουθούν και άλλες τεχνικές χαρακτηρισμού της εγχάραξης.

4.9. Προφιλόμετρο

Προφιλομετρία πραγματοποιούνταν σχεδόν σε όλα τα δείγματα με σκοπό να εξακριβωθεί το βάθος και το πλάτος της αποδόμησης. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Alpha-Step IQ, Surface Profiler της εταιρείας KLA-Tencor.



Εικόνα 4.6 Alpha-Step IQ προφιλόμετρο [41].

To Alpha-Step IQ, Surface Profiler είναι ένα ηλεκτρονικό προφιλόμετρο υψηλής επιφανειακής ευαισθησίας που μετράει την τραχύτητα, τον κυματισμό και τις βηματικές υψομετρικές

διαφορές μια επιφάνειας για μια πληθώρα εφαρμογών. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξεως του 1 Å. Με την χρήση υπολογιστή υπάρχει ισχυρός έλεγχος των μετρήσεων και δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων αλλά και ανάλυσής τους [41].

Η λειτουργία του προφιλομέτρου βασίζεται σε μια γραφίδα με διαμαντένια κορυφή που ακουμπά ελαφρά την επιφάνεια του δείγματος ανιχνεύοντας τις υψομετρικές διαφορές του. Η γραφίδα κινείται κατά μήκος μίας γραμμής σαρώνοντας έτσι σε έναν άξονα το δείγμα, εξασφαλίζοντας σταθερή και ομαλή κίνηση. Τελικά απεικονίζεται γραφικά η μορφολογία του δείγματος για μία εγκάρσια διατομή. Στις μετρήσεις που λήφθηκαν η ακίδα κατέγραφε δεδομένα με 100 Hz συχνότητα και η ταχύτητα που χρησιμοποιούνταν για να σαρώσει το δείγμα ήταν 10 μm/s.

4.10. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM)

Σε κάποια επιλεγμένα δείγματα πραγματοποιήθηκε ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» με το σύστημα JEOL JSM-7401F. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι μικροσκόπιο πεδιακής εκπομπής ηλεκτρονίων (Field Emission Microscope - FESEM).

Τα μικροσκόπια πεδιακής εκπομπής ηλεκτρονίων έχουν διακριτική ικανότητα της τάξης του 1 nm. Το μικροσκόπιο αυτό λειτουργεί με δέσμη ηλεκτρονίων τα οποία εκπέμπονται από μια πηγή πεδιακής εκπομπής («πυροβόλο» ηλεκτρονίων- electron gun) και επιταχύνονται από ένα βαθμωτό ηλεκτρικό πεδίο. Στο εσωτερικό του μικροσκοπίου πρέπει να επικρατούν συνθήκες υψηλού κενού. Η δέσμη πρωτογενών ηλεκτρονίων εστιάζεται, βομβαρδίζοντας το προς εξέταση δείγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δείγμα να εκπέμπει δευτερογενή ηλεκτρόνια. Αυτά ανιχνεύονται και μετατρέπονται σε σήμα το οποίο ενισχύεται και απεικονίζεται σαν ψηφιακή εικόνα. Η γωνία, η ταχύτητα καθώς και η πυκνότητα των δευτερογενών ηλεκτρονίων δίνουν με ακρίβεια την μορφολογία του δείγματος [42]–[44].

Για να επιτευχθεί η δημιουργία δευτερογενών ηλεκτρονίων η επιφάνεια του δείγματος πρέπει να είναι αγώγιμη. Στα δείγματα ITO/PET που πραγματοποιήθηκε ηλεκτρονική μικροσκοπία χρειάστηκε να γίνει επιπλατίνωση, δηλαδή επικαλύφθηκαν τα δείγματα με 5-6 nm πλατίνας.

Οι μεγεθύνσεις που λήφθηκαν στα δείγματα ήταν από x25 έως x40000. Συνολικά οι εικόνες που λήφθηκαν από το SEM έχουν πολύ μεγαλύτερη μεγέθυνση και καλύτερη ανάλυση συγκριτικά με τις εικόνες οπτικού μικροσκοπίου. Αποτελεί όμως μια πιο δύσκολη και ακριβή διαδικασία που απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό για την εξαγωγή της.

4.11. Φασματοσκοπία υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου (UV-VIS-NIR spectroscopy)

Για να μετρηθεί το φάσμα απορρόφησης του δείγματος ITO/PET χρησιμοποιήθηκε το σύστημα UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19 της εταιρείας Perkin Elmer.

Το σύστημα αυτό μετράει την ακτινοβολία που περνάει μέσα από το δείγμα (διαπερατότητα T) αλλά και αυτή που ανακλάται από αυτό. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να βρεθεί ο συντελεστής απορρόφησης του δείγματος. Η απορρόφηση (A) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση $A = 2 - \log_{10}(\%T)$, όπου %T είναι η μετρούμενη διαπερατότητα επί τοις εκατό.

Η λειτουργία του συστήματος είναι ως εξής: υπάρχουν δύο πηγές φωτός, μία λάμπα δευτερίου για τις υπεριώδεις ακτίνες και μία λάμπα αλογόνου για τις ορατές και υπέρυθρες ακτινοβολίες. Δέσμη με όλα τα απαιτούμενα μήκη κύματος εισέρχεται διαδοχικά σε δύο μονοχρωμάτορες οι οποίοι αναλύουν την αρχική δέσμη σε όλα τα μήκη κύματος. Με περιστροφική κίνηση και με την χρήση κάποιων διαφραγμάτων στην διάταξη είναι δυνατή η απομόνωση μιας ακτίνας συγκεκριμένου μήκους κύματος κάθε φορά. Η μονοχρωματική αυτή δέσμη χωρίζεται σε δύο δέσμες όπου η μία θα χρησιμοποιηθεί σαν δέσμη αναφοράς και θα ανιχνευτεί απευθείας από έναν φωτοανιχνευτή ενώ η δεύτερη δέσμη θα περάσει μέσα από το δείγμα πριν καταγραφεί από τον ανιχνευτή. Στο συγκεκριμένο σύστημα οι ανιχνευτές για το υπεριώδες και το ορατό είναι ανιχνευτές σουλφιδίου μολύβδου (PbS). Με αυτό τον τρόπο η διαφορά των δύο εντάσεων των δύο δεσμών δείχνουν την διαπερατότητα του δείγματος. Αυτή η καταγραφή γίνεται σε όλο το προσφερόμενο φάσμα. Η μέτρηση που λήφθηκε για το δείγμα έγινε για μήκη κύματος από 300 έως 1200 nm και διακριτική ικανότητα 1 nm [45].



Εικόνα 4.7 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας UV-VIS-NIR spectrometer [45].

5. Πειράματα laser αποδόμησης του ΙΤΟ

5.1. Διαπερατότητα και απορρόφηση δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ

Με το σύστημα UV/VIS/NIR Spectrometer Lambda 19 έγινε μέτρηση της διαπερατότητας του δείγματος ITO/PET. Για αυτό το δείγμα θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει ανακλαστικότητα καθώς

είναι άχρωμο και διαφανές. Έτσι μετρήθηκε αποκλειστικά η διαπερατότητα (T) του όπως φαίνεται από την παρακάτω γραφική παράσταση.

Αφού η διαπερατότητα μετρήθηκε για ολόκληρο το δείγμα ITO/PET, τότε η απορρόφηση που μπορεί να υπολογιστεί αφορά και αυτή ολόκληρο το δείγμα. Με αυτά τα δεδομένα αποκλειστικά δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης μόνο του στρώματος ITO.



Εικόνα 5.1 Γραφική της διαπερατότητας του δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ συναρτήσει του μήκους κύματος.



Εικόνα 5.2 Γραφική της απορρόφησης του δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ συναρτήσει του μήκους κύματος.

Από της γραφικές των Εικόνων 5.1 και 5.2 είναι φανερό ότι στην περιοχή της ορατής και κοντινής υπέρυθρης ακτινοβολίας (400-1200 nm) και τα δύο υλικά είναι διαφανή. Αντίθετα στην υπεριώδη ακτινοβολία το δείγμα απορροφά. Από την βιβλιογραφία προσδιορίζεται ότι ο συντελεστής απορρόφησης του ΙΤΟ είναι 4*10⁶ m⁻¹ ενώ του PET είναι 1*10⁻⁶ m⁻¹ για ακτινοβολία μήκους κύματος 355 nm [32]. Η διαφορά του συντελεστή απορρόφησης των δύο υλικών σε αυτό το μήκος κύματος είναι της τάξεως του 10¹². Για αυτό τον λόγο αποφασίστηκε ότι αυτή είναι η κατάλληλη περιοχή για να ακτινοβοληθεί το δείγμα και να γίνει αποδόμηση αφού σε αυτά τα μήκη κύματος υπάρχει μεγάλη απορρόφηση μόνο από το ΙΤΟ κα πολύ μικρή από το PET. Αυτό το μήκος κύματος (355 nm) λαμβάνεται από την τρίτη αρμονική του Nd:YAG laser το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.

5.2. Προσδιορισμός βέλτιστων συνθηκών αποδόμησης του ΙΤΟ

Αφού έχει καθοριστεί το κατάλληλο μήκος κύματος για να πραγματοποιηθεί η αποδόμηση πρέπει να καθοριστούν και οι υπόλοιπες παράμετροι της αποδόμησης.

Η εύρεση των κατάλληλων συνθηκών για την βέλτιστη αποδόμηση του ΙΤΟ από το υπόστρωμα PET, βασίζεται σε έξι παραμέτρους:

- Εστιακή απόσταση φακού
- Απόσταση φακού ως προς το δείγμα
- Πλήθος παλμών laser ανά σημείο
- Ενέργεια παλμού laser
- Ταχύτητα κινούμενης βάσης
- Χρήση διαφράγματος

Οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να προσδιοριστούν κατάλληλα ώστε ο συνδυασμός τους να οδηγεί σε αποδόμηση του ΙΤΟ χωρίς αλλοίωση του ΡΕΤ με ομοιόμορφη αποδόμηση.

Αρχικά πολύ σημαντικό είναι να καθοριστεί η ενέργεια της δέσμης laser ανά παλμό που χρειάζεται για να γίνει η αποδόμηση. Επίσης μπορεί να επιλεγεί το πλήθος των παλμών laser που θα πέφτουν σε κάθε σημείο του δείγματος. Έπειτα ως παράμετρος θεωρούνται και ο φακός εστίασης που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση, όπως και η απόσταση του φακού ως προς το δείγμα, τα οποία επηρεάζουν την διάμετρο του ίχνους της δέσμης. Η απόσταση του φακού ως προς το δείγμα επιλέγεται ώστε να έχουμε πάντα την εστία της δέσμης laser πάνω στην επιφάνεια του δείγματος. Ακόμα παρατηρήθηκε πως η προσθήκη διαφράγματος (κλείσιμο ίριδας), που επιτρέπει την διάδοση της δέσμης σε μικρή ακτίνα γύρω από το κέντρο της, επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της αποδόμησης μειώνοντας την διάμετρο του ίχνους της δέσμης στο δείγμα. Τέλος αφού καθοριστούν κατάλληλα οι παραπάνω παράμετροι, θα χρειαστεί να προσδιοριστεί και η ταχύτητα της βάσης σε κάθε άξονα ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη αποδόμηση γραμμών και κατά συνέπεια οποιουδήποτε μοτίβου πάνω στο δείγμα. Οι παράμετροι αυτές είναι αλληλεξαρτώμενες. Πιο συγκεκριμένα αλλάζοντας μία από τις παραπάνω παραμέτρους θα πρέπει να διαμορφωθούν κατάλληλα και οι υπόλοιπες ώστε να προκύψει η επιθυμητή εγχάραξη.

5.2.1. Αποδόμηση ΙΤΟ με φακό εστίασης F = 50 mm

Στα πρώτα πειράματα που έγιναν χρησιμοποιήθηκε ο φακός εστίασης F = 50 mm (εστιακή απόσταση 50 mm). Το δείγμα τοποθετήθηκε αρχικά προσεγγιστικά σε απόσταση 50 mm από το φακό. Η πρώτη σειρά πειραμάτων ήταν σημειακής αποδόμησης (spots) για ενέργειες παλμών laser από 0.8 mJ έως 7.8 mJ και αριθμό παλμών ανά σημείο από 1 έως περίπου 1000.



Εικόνα 5.3 Ενέργεια παλμού laser 7.8 mJ για 1000 παλμούς (οπτικό μικροσκόπιο).



Εικόνα 5.4 Ενέργεια παλμού laser 0.8 mJ για 1 παλμό (οπτικό μικροσκόπιο).

Στις Εικόνες 5.3 και 5.4 φαίνεται η διαφορά ανάμεσα σε ένα κατεστραμμένο δείγμα (Εικόνα 5.3) και σε ένα δείγμα που έγινε αποδόμηση μόνο του ΙΤΟ χωρίς να επηρεαστεί το υπόστρωμα PET (Εικόνα 5.4). Στην Εικόνα 5.3, το δείγμα εκτέθηκε σε 1000 παλμούς laser με ενέργεια ανά παλμό 7.8 mJ/pulse. Στο κέντρο ακτινοβόλησης έχει πλέον τρυπηθεί όλο το δείγμα και περιμετρικά της οπής φαίνεται το PET το οποίο έχει καεί και παραμορφωθεί από την θερμότητα που αναπτύχθηκε από την ακτινοβόληση με το laser. Αντίθετα στην Εικόνα 5.4 χρησιμοποιήθηκε ενέργεια παλμού laser 0.8 mJ και επιτεύχθηκε με έναν παλμό αποδόμηση αποκλειστικά του στρώματος ITO. Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω αποδομήσεις παρατηρούνται μεγάλες διαφορές και στις διαστάσεις των σημείων αποδόμησης, με την δεύτερη να έχει διάμετρο μικρότερη του μισού της πρώτης.

Για την εύρεση της θέσης φακού, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων με σταθερή ενέργεια και σταθερό αριθμό παλμών ανά σημείο, αλλάζοντας μόνο την θέση του φακού. Η ενέργεια και ο αριθμός παλμών που επιλέχθηκαν ήταν τέτοια ώστε να δημιουργούν κάποια αποδόμηση στο δείγμα σε όλες τις θέσεις του φακού χωρίς όμως να προκαλέσουν διαμπερή οπή σε αυτό. Με αυτή την διαδικασία επιλέγεται η θέση φακού στην οποία έγινε η αποδόμηση με τις μικρότερες διαστάσεις (μικρότερο spot), δηλαδή εκεί όπου η εστία της δέσμης είναι στην επιφάνεια του δείγματος.

Στην επόμενη σειρά πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε ένας πιο ακριβής προσδιορισμός των υπόλοιπων μεταβλητών. Έχοντας καθορίσει το φακό και την θέση του, γίνεται επαναπροσδιορισμός της ενέργειας και των αριθμών παλμών κάθε σημείου ώστε να επιτυγχάνεται αποδόμηση μόνο του ΙΤΟ αφήνοντας ανέπαφο το PET.



Εικόνα 5.5 Γραφικές παραστάσεις βάθους αποδόμησης δείγματος ITO/PET a) συναρτήσει του πλήθους παλμών για ενέργεια παλμού laser 1.8 mJ b) συναρτήσει της ενέργειας δέσμης laser ανά παλμό για 5 παλμούς ανά σημείο.

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα για κάθε αποδόμηση, συγκρίνοντας το βάθος αποδόμησης α) με τον αριθμό παλμών laser ανά σημείο για σταθερή ενέργεια παλμού (1.8 mJ) και b) με την ενέργεια ανά παλμών για πέντε παλμούς ανά σημείο αποδόμησης. Η αποδόμηση αποκλειστικά του στρώματος ΙΤΟ παρατηρήθηκε για ενέργεια E = 1.8 mJ για 1 παλμό ανά σημείο, και για ενέργεια E = 0.22 mJ για 5 παλμούς ανά σημείο. Στις υπόλοιπες συνθήκες πραγματοποιείται αποδόμηση και του ΡΕΤ που δεν είναι επιθυμητή.



Εικόνα 5.6 Ενέργεια 1.8 mJ για 1 παλμό ανά σημείο (οπτικό μικροσκόπιο).



Εικόνα 5.7 Ενέργεια 0.22 mJ για 5 παλμούς ανά σημείο (οπτικό μικροσκόπιο).

Η διάμετρος του σημείου αποδόμησης της πρώτης Εικόνας 5.6 είναι περίπου 230 μm ενώ του δεύτερου σημείου (Εικόνα 5.7) είναι 150 μm.

Με αυτές τις συνθήκες έγιναν οι πρώτες δοκιμές στην εγχάραξη γραμμών. Για την ανάπτυξη γραμμών θα πρέπει να καθοριστεί και η τελευταία μεταβλητή, η ταχύτητα της βάσης. Η ταχύτητα υπολογίστηκε με βάση τις διαστάσεις των ιχνών της δέσμης laser σε κάθε περίπτωση αλλά και αναλογικά με τον αριθμό των παλμών που έπρεπε να πέσουν σε κάθε σημείο (Παράγραφος 4.3). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8 έγιναν τρεις δοκιμές για κάθε συνθήκη αλλάζοντας τον βαθμό επικάλυψης των παλμών.



Εικόνα 5.8 Γραμμές αποδόμησης για ενέργειες 1.8 mJ και 0.22 mJ με ταχύτητες a)375 μm/s, b)280 μm/s, c)187.5 μm/s, d)35 μm/s, e)25 μm/s, f)17.5 μm/s (οπτικό μικροσκόπιο).

Για την ενέργεια E = 1.8 mJ για επικάλυψη παλμών 0 παρατηρούμε ότι υπάρχουν σημεία μεταξύ των παλμών που υπάρχει ακόμα ITO, ενώ για επικάλυψη ½ υπάρχουν σημεία τα οποία λαμβάνουν αρκετή ενέργεια ώστε να καταστραφεί και το PET. Στην περίπτωση ¼ επικάλυψης παλμών σε αυτή την ενέργεια γίνεται μια καλή αποδόμηση του ITO χωρίς την καταστροφή του PET.



Εικόνα 5.9 Εικόνα SEM σημείου καταστροφής PET.



Εικόνα 5.10 Προφιλόμετρο σε σημείο που έχει καταστραφεί το PET.

Από τις Εικόνες 5.9 και 5.10 γίνεται αντιληπτό πως στα σημεία που ακτινοβολούνται με μεγαλύτερη ενέργεια, δημιουργείται μια ακανόνιστη δομή, λόγω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται τοπικά από την δέσμη, η οποία προβάλλεται και στην μέτρηση του προφιλομέτρου.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι στις γραμμές που έγιναν με την χαμηλότερη ενέργεια, E = 0.22 mJ, γύρω από την περιοχή της αποδόμησης υπάρχουν συγκεντρωμένα σωματίδια. Θεωρήθηκε ότι τα σωματίδια αυτά είναι θραύσματα του ΙΤΟ που λόγω της χαμηλής ενέργειας δεν εξαχνώθηκαν. Αντίθετα για την ενέργεια E = 1.8 mJ η περιοχή γύρω από την αποδόμηση είναι πιο καθαρή. Αυτό φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 5.11 όπου παρουσιάζονται λήψεις μικροσκοπίας SEM.



Εικόνα 5.11 a) Εικόνα SEM για Ε = 1.8 mJ και 1 παλμό ανά σημείο b) Προφιλόμετρο για Ε = 1.8 mJ και 1 παλμό ανά σημείο c) Εικόνα SEM για Ε = 0.22 και 5 παλμούς/σημείο d) Προφιλόμετρο για Ε = 0.22 mJ και 5 παλμούς ανά σημείο.

Στην προφιλομετρία που έγινε για ενέργεια *E* = 0.22 mJ και 5 παλμούς ανά σημείο παρατηρούνται στο εσωτερικό του καναλιού δύο κορυφές. Αυτές δεν οφείλονται σε καταστροφή του υποστρώματος αλλά στο γεγονός ότι μέσα στο κανάλι (όπως και έξω από αυτό) υπάρχουν θραύσματα ITO.

Με βάση τα παραπάνω οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες συνθήκες αποδόμησης του λεπτού υμενίου ITO πάνω σε υπόστρωμα PET με φακό εστιακής απόστασης F = 50 mm ήταν για παλμούς ενέργειας E = 1.8 mJ με ταχύτητα βάσης 280 μm/s (για R.R. = 1 Hz).

5.2.2. Αποδόμηση ITO με φακό εστίασης F = 25.4 mm

Επόμενος στόχος ήταν να μειωθεί το πλάτος των καναλιών που γινόταν η αποδόμηση. Η μεταβλητή που άλλαξε αρχικά ώστε να σημειωθεί σημαντική αλλαγή στις διαστάσεις αποδόμησης ήταν ο φακός εστίασης. Ο νέος φακός έχει εστιακή απόσταση F = 25.4 mm. Έγιναν ξανά δοκιμές ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η νέα θέση φακού και αφού βρέθηκε η κατάλληλη θέση ώστε η επιφάνεια του δείγματος να βρίσκεται στην εστία της δέσμης προσδιορίστηκε εκ νέου η κατάλληλη ενέργεια για την αποδόμηση μόνο του ΙΤΟ.



Με αυτές τις αλλαγές στις συνθήκες το νέο αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 5.12. Από την εικόνα του οπτικού μικροσκοπίου είναι αισθητή μία μείωση των διαστάσεων της αποδόμησης. Οι νέες διάμετροι του σημείου αποδόμησης υπολογίζονται περίπου 80 μm στον x- άξονα και 120 μm στον y-άξονα.

Εικόνα 5.12 Ιχνος αποδόμησης ΙΤΟ με φακό εστίασης F =25.4 mm (οπτικό μικροσκόπιο).

5.2.2.1. Τοποθέτηση διαφράγματος στην διάταζη

Παρόλη την μεγάλη μείωση των διαστάσεων αποδόμησης συγκριτικά με τις συνθήκες του φακού εστίασης F =50 mm, παρατηρήθηκε ότι αν προστεθεί ένα διάφραγμα στην διάταξη, περιορίζοντας περιμετρικά την δέσμη, τότε οι τελικές διαστάσεις αποδόμησης μειώνονται ακόμα περισσότερο. Στην συγκεκριμένη διάταξη την λειτουργία του διαφράγματος είχαν οι ίριδες. Έγινε μια σειρά πειραμάτων, για έναν παλμό ακτινοβόλησης, κλείνοντας πρώτα μόνο την πρώτη ίριδα, στην συνέχεια μόνο την δεύτερη και τέλος και τις δύο ίριδες ταυτόχρονα (Εικόνα 5.13). Το μικρότερο ίχνος της δέσμης παρατηρήθηκε όταν ήταν κλειστές και οι δύο ίριδες. Λίγο μεγαλύτερο όταν ήταν μόνο μία από τις δύο κλειστές όμως αρκετά μικρότερο από το να ήταν ανοιχτές. Δεν παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στη διάμετρο της δέσμης ανάμεσα στο ποια από τις δύο ίριδες είναι ανοιχτή και ποια κλειστή. Λόγω του ότι η θέση του

ενεργόμετρου στην διάταξη ήταν μετά την πρώτη ίριδα, δεν θα ήταν δυνατή η μέτρηση της ενέργειας της δέσμης που πάει τελικά στο δείγμα αν κλείναμε και την δεύτερη ίριδα. Έτσι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί σαν διάφραγμα μόνο η πρώτη ίριδα.

Ανοιχτές ίριδες Κλειστή 1^η ίριδα Κλειστή 2^η ίριδα Κλειστές ίριδες

Εικόνα 5.13 Διάφορα διαμέτρων ίχνους της δέσμης με ανοιχτές και κλειστές ίριδες (οπτικό μικροσκόπιο).

Προσδιορίστηκε εκ νέου η κατάλληλη ενέργεια ώστε η αποδόμηση του ΙΤΟ με κλειστή την πρώτη ίριδα να είναι η επιθυμητή, δηλαδή να αποδομείται το ΙΤΟ χωρίς να καταστρέφεται το PET. Η ενέργεια που προσδιορίστηκε ως κατάλληλη για αυτή την αποδόμηση ήταν *E* = 0.05 mJ.

Στην Εικόνα 6.14 του οπτικού μικροσκοπίου φαίνεται αποδόμηση με φακό εστίασης F = 25.4 mm και η εστία να είναι προσαρμοσμένη στην επιφάνεια του δείγματος, ενέργεια δέσμης E = 0.05 mJ, έναν παλμό και κλειστή την πρώτη ίριδα (διάφραγμα). Με τις νέες αυτές συνθήκες αποδόμησης παρατηρείται ότι η διάμετρος αποδόμησης του σημείου είναι περίπου 40 μm και για τους δύο άξονες. Αυτή ήταν η μικρότερη διάμετρος αποδόμησης που επιτεύχθηκε με την υπάρχουσα διάταξη.



Εικόνα 5.14 Αποδόμηση σημείου με χρήση διαφράγματος, φακού F=25.4 mm και ενέργειας E=0.05 mJ.

Η τελευταία συνθήκη που είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί είναι η ταχύτητα της βάσης. Εφόσον η αποδόμηση γίνεται με σκοπό να αφαιρέσει σε συγκεκριμένα σημεία εξ ολοκλήρου το ITO, το οποίο είναι αγώγιμο, τότε αν σχεδιαστεί κατάλληλη δομή, είναι δυνατή η ηλεκτρική μόνωση μιας περιοχής από μια άλλη. Με αυτή την λογική θεωρήθηκε πιο αξιόπιστος και αποτελεσματικός τρόπος ελέγχου της αποδόμησης το να σχεδιάζονται κάθε φορά τετράγωνα στα οποία αν τελικά ήταν ηλεκτρικά μονωμένο το εσωτερικό τους ως προς το εξωτερικό ITO τότε η αποδόμηση είχε επιτευχθεί πλήρως.

Έγιναν δοκιμές για διάφορες ταχύτητες της βάσης σχεδιάζοντας τετράγωνα διαστάσεων 2.5mm που κατασκευάστηκαν με το πρόγραμμα που παρατίθεται στο Παράρτημα 1. Για ρυθμό επαναληψιμότητας του laser R.R. = 1 Hz, η ελάχιστη ταχύτητα που βρέθηκε να αποδομεί κατάλληλα το ITO ήταν 27.5 μm/s και για τους δύο άξονες. Για αυτή την ταχύτητα μετρήθηκε η αντίσταση μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του τετραγώνου η οποία απειριζόταν, δηλαδή είχε επιτευχθεί η ηλεκτρική μόνωση.



Εικόνα 5.15 Εγχάραξη τετραγώνου (οπτικό μικροσκόπιο).



Από τις Εικόνες 6.16 και 6.17 προφιλομέτρου φαίνεται η αποδόμηση να έχει βάθος 100 nm το οποίο είναι το αναμενόμενο πάχος του ΙΤΟ. Το πλάτος των γραμμών αποδόμησης και για τους δύο άξονες είναι περίπου τα 40 μm το οποίο θεωρείται σημαντική βελτίωση συγκριτικά με τις πρώτες συνθήκες αποδόμησης.

Με την λήψη εικόνων SEM (Εικόνα 6.18) παρατηρήθηκε μια μικρή και τυχαία αλλοίωση του PET η οποία δεν ήταν διακριτή με το οπτικό μικροσκόπιο. Λόγω της τοποθέτησης διαφράγματος στην διάταξη, και κατά συνέπεια την μείωση του πλάτους αποδόμησης, ήταν αρκετά πιο δύσκολη η επίτευξη αποδόμησης στην οποία οι παλμοί θα επικαλύπτονταν χωρίς όμως την καταστροφή του PET. Η τυχαιότητα της αλλοίωσης αυτής οφείλεται σε μικρές διακυμάνσεις της ενέργειας του laser. Για την αποφυγή της αλλοίωσης του PET κρίθηκε σκόπιμο να μειωθεί λίγο η ενέργεια του laser στα E = 0.03 mJ στην οποία μετά από πειράματα διαπιστώθηκε ότι επιτυγχάνεται η ηλεκτρική μόνωση του δείγματος άρα η ολοκληρωμένη αποδόμηση.



Εικόνα 5.18 Εικόνα SEM αποδόμηση με E = 0.05 mJ και ταχύτητα 27.5 μm/s (R.R. = 1 Hz).

Με βάση τα παραπάνω, οι συνθήκες που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες συνθήκες αποδόμησης του λεπτού υμενίου ΙΤΟ πάνω σε υπόστρωμα ΡΕΤ με φακό εστιακής απόστασης F = 25.4 mm ήταν για παλμούς ενέργειας E = 0.03 mJ με χρήση διαφράγματος και με ταχύτητα βάσης 27.5 μm/s (για R.R. = 1 Hz).

5.2.3. Σύγκριση συνθηκών αποδόμησης

Οι συνθήκες για τις οποίες η αποδόμηση είναι εφικτή δεν είναι απόλυτες. Για μικρές αλλαγές της ενέργειας, της τάξεως του 20% παρατηρήθηκε να είναι εφικτή η αποδόμηση με τα ίδια αποτελέσματα στο υλικό ITO/PET. Επιπλέον και η απόσταση του φακού από το δείγμα, ανάλογα με το βάθος πεδίου του κάθε φακού, μπορεί να αλλάξει για μερικά μικρόμετρα χωρίς

να επηρεαστεί το αποτέλεσμα. Μεγαλύτερες αλλαγές όμως όπως η αλλαγή του φακού εστίασης ή η προσθήκη διαφράγματος έχουν καθοριστικό αποτέλεσμα για την αποδόμηση.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα πειράματα των παραπάνω δοκιμών η αλλαγή του φακού εστίασης από F = 50 mm σε F = 25.4 mm, προσαρμόζοντας κατάλληλα και τις υπόλοιπες παραμέτρους, μειώνει δραματικά την διάμετρο του ίχνους της δέσμης laser. Συγκρίνοντας την αποδόμηση με φακό εστίασης F = 25.4 mm με τις παλιές συνθήκες (F = 50mm) μπορεί να θεωρηθεί ότι οι διαστάσεις αποδόμησης μειώθηκαν κατά περίπου 60%. Αναλυτικότερα οι διάμετροι των σημείων αποδόμησης laser για έναν παλμό έγιναν περίπου από 220 μm, 80 μm στον x-άξονα και από 280 μm, 120 μm στον y-άξονα.

Επίσης σημαντική αλλαγή στις διαστάσεις αποδόμησης παρατηρήθηκε και με την προσθήκη διαφράγματος στην διάταξη. Συγκεκριμένα το κλείσιμο της ίριδας μείωσε περισσότερο από το μισό τις διαστάσεις της αποδόμησης συγκριτικά με τις όμοιες υπόλοιπες συνθήκες έχοντας ανοιχτές τις ίριδες (F = 25.4 mm). Με τις νέες αυτές συνθήκες οι διαστάσεις αποδόμησης ήταν περίπου 40 μm σε κάθε άξονα.



Εικόνα 5.19 Σύγκριση διαστάσεων αποδόμησης (SEM) a) Ανοιχτή ίριδα, E = 1.8 mJ, F = 50 mm b) Κλειστή ίριδα, E = 0.05 mJ, F = 25.4 mm.

Επιπλέον, από την Εικόνα 5.19 παρατηρείται ότι με τις νέες συνθήκες αποδόμησης (Εικόνα 5.19 b) η περιοχή εσωτερικά και εξωτερικά της γραμμής έχει πολύ λιγότερα θραύσματα ITO συγκριτικά με τις προηγούμενες συνθήκες (Εικόνα 5.19 a). Ακόμα στις αιχμές της γραμμής αποδόμησης το ITO έχει αποδομηθεί πιο ομοιόμορφα και με μικρότερη τραχύτητα.

Κάνοντας την γραφική παράσταση (Εικόνα 5.20) της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε μια από τις τρεις παραπάνω αποδομήσεις (Ενότητες 5.2.1, 5.2.2., 5.2.2.1) συναρτήσει του εμβαδού του κάθε σημείου αποδόμησης για τις αντίστοιχες συνθήκες παρατηρούμε ότι η ροή

ενέργειας (ενέργεια ανά εμβαδόν σημείου αποδόμησης) είναι σχετικά σταθερή και για τις τρεις συνθήκες, με τιμή περίπου 2.4 J/cm².



Εικόνα 5.20 Γραφική παράσταση ενέργειας-εμβαδού σημείου για τις τρείς συνθήκες επιτυχημένης αποδόμησης.

5.3. Ανάπτυξη αντιστάσεων

5.3.1. Σχέδιο εγχάραζης Α

Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε σε συνεργασία με τον Δρ. Νίκο Χρόνη, Καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ. Αποτελεί μια αντίσταση όπου στόχευε στο να γίνει μια πρώτη δοκιμαστική εφαρμογή των πρώτων συνθηκών αποδόμησης (Ενότητα 5.2.1). Επιπλέον οι διαστάσεις του σχεδίου αυτού ξεπερνούν κατά πολύ τις έως τότε δοκιμές αποδόμησης που είχαν γίνει φέρνοντας στα όρια τις δυνατότητες της πειραματικής διάταξης.





Εικόνα 5.21 Σχέδιο Ιου προτύπου.



Το σχέδιο αποτελείται από δύο ορθογώνια παραλληλόγραμμα και από 8 εσωτερικές γραμμές. Το εσωτερικό ορθογώνιο και οι γραμμές αναπαριστούν την εγχάραξη με τις βέλτιστες συνθήκες αποδόμησης που βρέθηκαν από τα προηγούμενα πειράματα. Στο εξωτερικό ορθογώνιο χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη ενέργεια έχοντας σκοπό να αποδομηθεί και μεγάλο μέρος του PET ώστε να είναι πιο εύκολη και ασφαλής, για το δείγμα, η μετέπειτα κοπή του με κάποιο κοπτικό εργαλείο.

Για να γίνει η εγχάραξη σύμφωνα με το σχέδιο της Εικόνας 5.21 χρειάστηκε να δημιουργηθεί ένα μικρό πρόγραμμα για την κινούμενη βάση ώστε να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία κατασκευής των ορθογωνίων πλαισίων. Ο κώδικας του προγράμματός αυτού φαίνεται στο Παράρτημα 1.

Όπως προαναφέρθηκε οι συνθήκες του εξωτερικού ορθογωνίου ήταν διαφορετικές από του εσωτερικού και των γραμμών. Αυτή η διαφορά γίνεται αντιληπτή και από την Εικόνα 5.22 που αποτελεί φωτογραφία του δείγματος μετά την εγχάραξη, καθώς το εξωτερικό ορθογώνιο είναι πιο έντονο από τις υπόλοιπες γραμμές. Οι κοινές συνθήκες για όλο το δείγμα ήταν η θέση του φακού καθώς και η εστιακή απόστασή του, F = 50 mm, αλλά και ο αριθμός παλμών ανά σημείο που αποφασίστηκε να είναι 1, με το ρυθμό επαναληψιμότητας του laser να έχει οριστεί R.R. = 1 Hz.

5.3.1.1. Συνθήκες αποδόμησης εξωτερικού περιγράμματος

Η αποδόμηση του εξωτερικού περιγράμματος είχε σκοπό την αποδόμηση μεγάλου τμήματος και του PET χωρίς όμως να τρυπηθεί τελείως το δείγμα. Η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε ήταν 8.4 mJ και η ταχύτητα κοινή και για τους δύο άξονες με τιμή 65 μm/s.



Εικόνα 5.23 Αποδόμηση ITO/PET E = 8.4 mJ speed = 65 μm/s a) γωνία (οπτικό μικροσκόπιο) b) y-άζονας (οπτικό μικροσκόπιο) c) Προφιλόμετρο y-άζονας d) Προφιλόμετρο x-άζονας.

Στην Εικόνα 5.23 από τις λήψεις οπτικού μικροσκοπίου και της μετρήσεις με το προφιλόμετρο παρατηρούνται δύο περιοχές αποδόμησης. Στο κέντρο της γραμμής, «μαύρη περιοχή», φαίνεται και από το προφιλόμετρο ότι έχει γίνει αποδόμηση του PET η οποία σε κάποια σημεία έχει φτάσει τα 6 μm βάθος. Σε αυτή την περιοχή φαίνονται έντονες διακυμάνσεις στο βάθος του δείγματος, οι οποίες οφείλονται στο ότι σε κάποια σημεία η ενέργεια αποδόμησε το PET ενώ σε άλλα από την θερμότητα το υλικό διογκώθηκε. Το πλάτος της κεντρικής αυτής περιοχής είναι περίπου 200 μm. Εκατέρωθεν της γραμμής φαίνεται η δεύτερη περιοχή αποδόμησης, «γκρι περιοχή», στην οποία έχει αποδομηθεί αποκλειστικά το στρώμα ITO. Ο λόγος αυτής της διαφοράς οφείλεται στο προφίλ της δέσμης του laser το οποίο είναι γκαουσιανό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο κέντρο της δέσμης να εστιάζεται μεγαλύτερη ενέργεια από ότι στην

περιφέρειά της. Με άλλα λόγια η ενέργεια που δέχτηκε το δείγμα στην «γκρι περιοχή» δεν ήταν ικανή να αποδομήσει το ΡΕΤ παρά μόνο τα περίπου 100 nm ITO. Το συνολικό πλάτος αποδόμησης δίνεται από της μετρήσεις προφιλομέτρου να είναι 500 μm για τον y-άξονα και 600 μm για τον x-άξονα.

5.3.1.2. Συνθήκες αποδόμησης εσωτερικού περιγράμματος και γραμμών

Στο εσωτερικό περίγραμμα και στις γραμμές εντός του δείγματος η εγχάραξη έγινε με τις βέλτιστες συνθήκες που βρέθηκαν στην Ενότητα 5.2.1. Πιο συγκεκριμένα έγινε αποδόμηση μόνο του ΙΤΟ χωρίς την καταστροφή του ΡΕΤ. Η ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1.5 mJ, παρόλο που οι συνθήκες που είχαν επιλεγεί στα αρχικά πειράματα (Ενότητα 5.2.1) ήταν για ενέργεια 1.8 mJ θεωρήθηκε, σωστά, πως αυτή η διαφορά δεν θα επηρεάσει την ποιότητα της αποδόμησης. Οι ταχύτητες στους δύο άξονες διέφεραν μεταξύ τους. Στον y-άξονα η ταχύτητα ήταν 280 μm/s και στον x-άξονα ήταν 170 μm/s.



Εικόνα 5.24 Αποδόμηση ITO E = 1.5 mJ (οπτικό μικροσκόπιο) α) x-άζονας speed = 170 μm/s b) y-άζονας speed = 280 μm/s c) γωνία d) Προφιλόμετρο x-άζονας e) Προφιλόμετρο y-άζονας.

Από τις εικόνες προφιλομέτρου (Εικόνα 5.24 d,e) παρατηρείτε ότι η αποδόμηση έχει γίνει και στις δύο περιπτώσεις με βάθος 100-130 nm το οποίο είναι και το πάχος του στρώματος ITO. Οι εσωτερικές γραμμές έγιναν στην διεύθυνση του y-άξονα. Συμπεραίνεται ότι η αποδόμηση

έχει επιτευχθεί με το πλάτος των καναλιών για τον x-άξονα να είναι περίπου 280 μm ενώ για τον y-άξονα είναι 220 μm. Στην εικόνα του οπτικού μικροσκοπίου της γωνίας (Εικόνα 5.2 c) παρατηρείται ότι στο κέντρο του γωνιακού σημείου έχει καταστραφεί λίγο το PET. Αυτό συνέβη γιατί σε αυτό το σημείο έπεσαν δύο παλμοί λόγω μικρής καθυστέρησης της κινούμενης βάσης στην αλλαγή των ταχυτήτων από τον ένα άξονα στον άλλο.

5.3.2. Σχέδιο εγχάραζης Β

Αφού έγινε ο σχεδιασμός της αντίστασης σύμφωνα με την Εικόνα 5.25, η εγχάραξη πραγματοποιήθηκε με τις νέες συνθήκες αποδόμησης (Ενότητα 5.2.2.1) του ΙΤΟ.



Το σχέδιο αποτελείται από ένα τετράγωνο διαστάσεων 2x2 cm στο οποίο έχουν τοποθετηθεί εσωτερικά δύο γραμμές μήκους 1.33 cm. Οι γραμμές αυτές βοηθούν στο να καθοδηγηθεί το ρεύμα σε έναν αγώγιμο δρόμο ΙΤΟ σταθερού πάχους. Στην πάνω αριστερή και στην κάτω δεξιά γωνία του δείγματος θα πρέπει να τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια. Η αντίσταση που μετρήθηκε πειραματικά με πολύμετρο μετά την εγχάραξη είναι 450 Ω ενώ θεωρητικά σύμφωνα με τους υπολογισμούς του Κεφαλαίου 4.7 αναμενόταν αν είναι 540 Ω.

Οι συνθήκες εγχάραξης σε όλο το δείγμα σύμφωνα με το σχέδιο είναι κοινές. Ο φακός που χρησιμοποιήθηκε είχε εστιακή απόσταση F = 25.4 mm και είχε εστιαστεί στην επιφάνεια του δείγματος. Στην διάταξη η πρώτη ίριδα ήταν κλειστή με αποτέλεσμα να λειτουργεί σαν διάφραγμα και η ενέργεια της εγχάραξης ήταν E = 0.03 mJ. Ο αριθμός των παλμών που ακτινοβολήθηκε κάθε σημείο ήταν ένας. Η ταχύτητα της βάσης διπλασιάστηκε συγκριτικά με τα προηγούμενα πειράματα καθώς επιλέχθηκε να διπλασιαστεί και ο ρυθμός επαναληψιμότητας του laser, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία της εγχάραξης του σχεδίου. Πιο συγκεκριμένα ο ρυθμός επαναληψιμότητας ήταν 2 Hz και οι ταχύτητες της βάσης ήταν 55 μm/s και για τους δύο άξονες.



Εικόνα 5.27 Αποδόμηση ΙΤΟ με ενέργεια Ε = 0.05 mJ και ταχύτητα 55μm/s (R.R = 2 Hz) α) Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου b) εικόνα SEM c) Προφιλόμετρο για x-άζονα d) Προφιλόμετρο για y-άζονα.

Από τις εικόνες προφιλομέτρου (Εικόνα 5.27 c,d) παρατηρείται ότι η αποδόμηση έχει γίνει και στις δύο περιπτώσεις με βάθος 100-130 nm το οποίο είναι και το πάχος του στρώματος ΙΤΟ. Συμπεραίνεται επίσης ότι η αποδόμηση έχει επιτευχθεί με το πλάτος των καναλιών να είναι περίπου 40 μm.

5.4. Σχόλια για την πειραματική διαδικασία

Μέτρηση ενέργειας

Μία από τις πρώτες δυσκολίες που έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν η μέτρηση της ενέργειας με το ενεργόμετρο για χαμηλές τιμές του ρυθμού επαναληψιμότητας του laser. Στην διαδικασία της εγχάραξη το repetition rate του laser είχε τιμή 1-2 Hz. Για αυτές τις τιμές η ενέργεια της αποδόμησης ήταν πολύ μικρή ανά δευτερόλεπτο με αποτέλεσμα το ενεργόμετρο να μην μπορεί να την μετρήσει. Έτσι η ενέργεια μετρούνταν για R.R. = 10 Hz και μετατρέπονταν σε ενέργεια ανά παλμό.

«Μαύρισμα» εγχάραξης

Στο σχέδιο εγχάραξης Α που εγχαράχθηκε (Ενότητα 5.3.1., Εικόνα 5.22) παρατηρήθηκε ότι ήταν ελαφρός μαυρισμένο (πιο έντονες οι γραμμές) στις περιοχές τις εγχάραξης εκτός από μια μικρή περιοχή στο επάνω μέρος του σχεδίου. Έπειτα από μερικές δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η βάση στην οποία ακουμπούσε το δείγμα κατά την εγχάραξη, οφειλόταν για αυτό το αποτέλεσμα. Η βάση αυτή ήταν μαύρη και ήταν απορροφητική, με αποτέλεσμα όταν ακτινοβολούσαν οι παλμοί laser το δείγμα, η βάση έλιωνε τοπικά και να κολλούσε στην κάτω επιφάνεια του δείγματος. Έτσι αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί μια άλλη βάση η οποία δεν δημιουργούσε αυτό το αποτέλεσμα. Μετά την αλλαγή αυτή της διάταξης, στις επόμενες εγχαράξεις η αποδόμηση ήταν πιο διακριτική έως και ανεπαίσθητη, πράγμα που είναι επιθυμητό.

5.5. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Τελικά η αποδόμηση του λεπτού υμενίου ΙΤΟ σε υπόστρωμα ΡΕΤ είναι δυνατή με παλμικό laser μήκους κύματος 355 nm. Αποφεύχθηκε η αλλοίωση του ΡΕΤ στα σημεία αποδόμησης και επιτεύχθηκε η μείωση διαστάσεων της αποδόμησης, με τις τελικές διαστάσεις να είναι στα 40 μm.

Συγκρίνοντας με τις αναφορές τις βιβλιογραφίας για σχετικά πειράματα, συμπεραίνεται ότι ο μηχανισμός αποδόμησης του ΙΤΟ από το ΡΕΤ αποτελεί ένα συνδυασμό φωτομηχανικών και φωτοθερμικών διαδικασιών αποδόμησης.

Μελλοντικά για επιπλέον βελτίωση των συνθηκών αυτών αποδόμησης, χρήσιμο θα ήταν να διεξαχθούν πειράματα και για μήκος κύματος 1064 nm. Με αυτή την αλλαγή ο μηχανισμός αποδόμησης, παρόλο που θα είναι ένας συνδυασμός του φωτομηχανικού και του φωτοθερμικού, θα βασίζεται λίγο περισσότερο σε θερμικά φαινόμενα. Αυτό θα επηρεάσει την μορφολογία της αποδόμησης μειώνοντας την τραχύτητα των γραμμών σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Επίσης για ακόμα μεγαλύτερη μείωση του πλάτους αποδόμησης θα ήταν χρήσιμο να προστεθεί την διάταξη ένας διαστολέας της δέσμης ο οποίος θα πρέπει να τοποθετηθεί μετά το διάφραγμα και πριν τον φακό εστίασης.

6. Εφαρμογή θέρμανσης επιφανειών

Η ανάπτυξη των αντιστάσεων ΙΤΟ/ΡΕΤ με εγχάραξη laser που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την διπλωματική, έγιναν με σκοπό να λειτουργήσουν ως αντιμικροβιακές επιφάνειες μέσω της θέρμανσής τους με ρεύμα. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύσσεται από τον Δρ. Νίκο Χρόνη, Καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος συνεργάστηκε με την Δρ. Μαρία Κάνδυλα, Ερευνήτρια του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών για την εγχάραξη των αντιστάσεων αυτών. Ο μεταδιδακτορικός ερευνητής Δρ. Δημήτρης Μπαρμπάκος, ασχολείται με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών της εφαρμογής αυτής, ενώ η μεταπτυχιακή φοιτήτρια κα. Βαρβάρα Μουζή ασχολείται με την αντιμικροβιακή ιδιότητα της κατασκευής.

6.1. Αξιολόγηση αντίστασης ως θερμαντήρα

Η εγχάραξη γραμμών, με συγκεκριμένο σχέδιο πάνω σε ένα κομμάτι δείγματος του ITO/PET, είχε σαν στόχο να αυξήσουν την αντίσταση του ρεύματος που το διαπερνά αλλά και να το κατευθύνουν να περάσει πάνω από όλη την ζητούμενη επιφάνεια του δείγματος ώστε να θερμανθεί ομοιόμορφα το δείγμα.

Η δυσκολία που αντιμετωπίστηκε ήταν να βρεθεί η κατάλληλη διαδικασία τοποθέτησης των ηλεκτροδίων πάνω στο δείγμα. Καθώς το αγώγιμο ITO έχει πάχος 130 nm και το υπόστρωμα είναι PET, οποιαδήποτε προσπάθεια συγκόλλησης με θερμικό τρόπο (π.χ. καλάι) θα κατέστρεφε το δείγμα και δεν θα ήταν εφικτή η επαφή του ηλεκτροδίου με το ITO. Επιπλέον η προσπάθεια ένωσης του δείγματος με κάποιο ηλεκτρόδιο που θα στερεωνόταν σε αυτό με αιχμηρή άκρη (π.χ. κροκοδειλάκια), θα κατέστρεφε το λεπτό



Εικόνα 6.1 Εικόνα ηλεκτροδίων σε ακατέργαστο δείγμα ΙΤΟ/ΡΕΤ (Εικόνα Δημήτρη Μπαρμπάκου)

υμένιο ΙΤΟ γρήγορα με αποτέλεσμα να χαθεί και η επαφή. Τελικά για την διεπαφή δείγματος ηλεκτροδίου επιλέχθηκε η ταινία χαλκού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1 έχουν συγκολληθεί καλώδια πάνω σε ταινία χαλκού όπου με αγώγιμη κολλητική ταινία διπλής όψης

τοποθετήθηκαν σε δύο απέναντι πλευρές του δείγματος. Για την παθητικοποίηση της επαφής χρησιμοποιήθηκε ταινία Kapton.

Έγιναν πειράματα θέρμανσης δειγμάτων ΙΤΟ/ΡΕΤ με τάση 10 V. Οι Εικόνες 6.2 και 6.3 λήφθηκαν από θερμική κάμερα. Στην Εικόνα 6.2 απεικονίζεται η θερμική κατανομή πάνω σε ένα κομμάτι δείγματος που δεν έχει υποστεί κατεργασία. Σε αυτή την διάταξη τα ηλεκτρόδια έχουν τοποθετηθεί εκατέρωθεν του δείγματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1. Παρατηρείται να αυξάνεται έντονα η θερμοκρασία κοντά σε ένα από τα ηλεκτρόδια ενώ στο υπόλοιπο μέρος του δείγματος η θερμοκρασία φθίνει. Στην Εικόνα 6.3 απεικονίζεται η θερμική κατανομή σε ένα δείγμα στο οποίο έχει εγχαραχθεί η αντίσταση του σχεδίου Β (Κεφάλαιο 5.3.2). Σε αυτή την διάταξη τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται όπως αναφέρεται στο σχέδιο, δηλαδή το ένα την πάνω αριστερή γωνία του δείγματος, ενώ το δεύτερο στην κάτω δεξιά γωνία του. Παρόλο που τελικά η κατανομή της θερμοκρασία αποκλίνει αρκετά από την ομοιόμορφη κατανομή σε όλη την επιφάνεια του δείγματος, έχει ενδιαφέρον το αποτέλεσμα αυτού του πειράματος. Σε αυτό το πείραμα παρατηρούνται δύο θερμικές εστίες οι οποίες δημιουργούνται στην άκρη των εσωτερικών γραμμών εγχάραξης του σχεδίου. Το αίτιο αυτής της συμπεριφοράς είναι ότι το ρεύμα ακολουθεί την συντομότερη διαδρομή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, η οποία είναι περνώντας κοντά στις γραμμές εγχάραξης.



Εικόνα 6.2 Εικόνα θερμικής κάμερας σε μη επεξεργασμένο δείγμα ΙΤΟ/ ΡΕΤ (Εικόνα Δημήτρη Μπαρμπάκου).*



Εικόνα 6.3 Εικόνα θερμικής κάμερας αντίστασης σχεδίου εχάραζης Β (Ενότητα 5.3.2) του δείγματος ΙΤΟ/ΡΕΤ (Εικόνα Δημήτρη Μπαρμπάκου).*

* Οι θερμοκρασίες που αναγράφονται δεν είναι ακριβείς καθώς δεν είχε πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση της θερμικής κάμερας για το συγκεκριμένο υλικό

Σε επόμενους σχεδιασμούς της αντίστασης, με στόχο να επιτευχθεί μια πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο δείγμα, θα πρέπει να σχεδιαστούν λεπτότεροι αγώγιμοι

δρόμοι ώστε το ρεύμα να διασχίζει ολόκληρη την επιφάνειά τους. Σε αυτή την περίπτωση όμως η αντίσταση που θα συναντήσει το ρεύμα θα είναι πολύ μεγαλύτερη για της ίδιες διαστάσεις του δείγματος.

6.2. Αντιμικροβιακή επιφάνεια

Μικρόβια είναι μια γενική κατηγορία μικροσκοπικών οργανισμών. Σε αυτή ανήκουν τα βακτήρια, οι ιοί, οι μύκητες, τα μικροφύκη και τα πρωτόζωα. Μικρόβια υπάρχουν παντού γύρω μας με τα περισσότερα από αυτά να είναι αβλαβή για τον άνθρωπο. Κάποια όμως μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές λοιμώξεις [46].

Η πιο συνηθισμένη λύση για απολύμανση επιφανειών στις μέρες μας είναι η χρήση των απολυμαντικών ουσιών. Η χρήση τέτοιων ουσιών έχει τρία βασικά προβλήματα. Αρχικά αποτελούν προσωρινή λύση, δηλαδή μια επιφάνεια που θα απολυμανθεί θα παραμείνει καθαρή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το δεύτερο πολύ σημαντικό πρόβλημα είναι ότι η συχνή και πιθανά λανθασμένη χρήση των απολυμαντικών και αντιβιοτικών ουσιών επιφέρει την μικροβιακή αντοχή. Με άλλα λόγια τα μικρόβια προσαρμόζονται και δεν καταστρέφονται από της ουσίες αυτές με αποτέλεσμα να είναι συνεχώς αναγκαία η δημιουργία ισχυρότερων αντιβιοτικών ουσιών. Τέλος τέτοιες ουσίες είναι πολύ καταστροφικές για το περιβάλλον προκαλώντας ανεπιθύμητους ρύπους [47].

Σαν λύση αυτών των προβλημάτων έρχονται οι αντιμικροβιακές επιφάνειες. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται κυρίως υλικά τα οποία είτε λόγω της επιφανειακής τους μορφολογίας είτε λόγω της σύστασής τους έχουν αντιμικροβιακές ιδιότητες. Αρχικά υπάρχουν οι επιφάνειες οι οποίες απωθούν τους μικροοργανισμούς χωρίς όμως να τους καταστρέφουν. Έχει διαπιστωθεί ότι υπό ορισμένες συνθήκες, ο έλεγχος της υδροφοβικότητας και της τραχύτητας της επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε επιφάνειες που αντιστέκονται στην βακτηριακή προσκόλληση, αποτρέποντας την δημιουργία αποικιών σε αυτές [48]. Σε κάποιες αντιμικροβιακές επιφάνειες έχουν ενσωματωθεί ποσότητες βιοκτόνων ουσιών με αποτέλεσμα να σκοτώνουν τα βακτήρια που ακουμπούν την επιφάνεια. Αυτή η μέθοδος όμως συνεχίζει να αποτελεί περιβαλλοντικό πρόβλημα και συνεισφέρει στην μικροβιακή αντοχή [49]. Ακόμα υπάρχουν επιφάνειες οι οποίες λόγω της μορφολογίας τους προκαλούν φυσική βλάβη στην επιφάνεια των μικροβίων [50], [51]. Τέλος υπάρχουν και υλικά τα οποία εγγενώς έχουν αντιμικροβιακές ιδιότητες, όπως ο χαλκός [52]. Στην μεγαλύτερη πλειονότητα αυτών των

επιφανειών η δράση τους για ολοκληρωτική αποστείρωση της επιφάνειας δεν είναι δυνατή ή είναι πολύ χρονοβόρα.

Η εγχάραξη αντίστασης ΙΤΟ σε υπόστρωμα ΡΕΤ και η εφαρμογή της ως θερμαντήρα και τελικά ως αντιμικροβιακή επιφάνεια μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην αγορά λόγω του συνδυασμού των χαρακτηριστικών που προσφέρει. Αρχικά το υλικό κατασκευής της προσφέρει διαφάνεια στην περιοχή του ορατού αλλά και ευκαμψία σε μεγάλο βαθμό. Το σύστημα θα μπορεί να αποστειρώνεται κατά την βούληση του χρήστη δίνοντας την κατάλληλη τάση σε αυτό. Ο χρόνος που θα χρειάζεται ώστε να απολυμανθεί η επιφάνεια είναι της τάξεως των δευτερολέπτων. Ακόμα πολύ σημαντική ιδιότητα της διάταξης είναι ότι η καταστροφή των βακτηριδίων με την αύξηση της θερμοκρασίας δεν συνεισφέρει στην μικροβιακή αντοχή. Τέλος η κατασκευή αυτών των συστημάτων είναι επεκτάσιμη λόγω της ευελιξίας της εγχάραξης με laser σε μεγαλύτερες επιφάνειες κατεργασίας.

Συμπεραίνοντας η εφαρμογή συστημάτων θερμαντήρα ΙΤΟ σε υπόστρωμα ΡΕΤ για αντιμικροβιακούς σκοπούς είναι πολλά υποσχόμενη.

Βιβλιογραφία

- H. Palneedi *et al.*, "Laser Irradiation of Metal Oxide Films and Nanostructures: Applications and Advances," *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 14, p. 1705148, Apr. 2018, doi: 10.1002/adma.201705148.
- [2] S. S. Gacek, "Molecular dynamics simulation of shock waves in laser-material interaction," Iowa State University, Ames, Iowa, 2009. [Online]. Available: https://dr.lib.iastate.edu/bitstreams/eb78be73-9fb6-4b12-99dd-46da9c4cbe8d/download
- [3] S. Ravi-Kumar, B. Lies, X. Zhang, H. Lyu, and H. Qin, "Laser ablation of polymers: a review," *Polym. Int.*, vol. 68, no. 8, pp. 1391–1401, Aug. 2019, doi: 10.1002/pi.5834.
- [4] Ά. Αποστολόπουλος, "Πειραματική μελέτη της αποδόμησης ενδοφακών και κερατοειδικών ιστών με την 5η αρμονική του laser Nd:YAG," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα, 2014.
- [5] G. Paltauf and P. E. Dyer, "Photomechanical Processes and Effects in Ablation," *Chem. Rev.*, vol. 103, no. 2, pp. 487–518, Feb. 2003, doi: 10.1021/cr010436c.
- [6] P. Patel, P. GOHIL, and S. Rajpurohit, "Laser Machining of Polymer Matrix Composites: Scope, Limitation and Application," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 4, pp. 2391–2399, Jun. 2013.
- [7] W. M. Steen and J. Mazumder, *Laser Material Processing*. London: Springer London, 2010. doi: 10.1007/978-1-84996-062-5.
- [8] E. Carpene, D. Höche, and P. Schaaf, "Fundamentals of Laser-Material Interactions," in *Laser Processing of Materials*, vol. 139, P. Schaaf, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 21–47. doi: 10.1007/978-3-642-13281-0_3.
- [9] B. J. Garrison and R. Srinivasan, "Laser ablation of organic polymers: Microscopic models for photochemical and thermal processes," *Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 8, pp. 2909–2914, Apr. 1985, doi: 10.1063/1.335230.
- [10] Y. G. Yingling, L. V. Zhigilei, and B. J. Garrison, "The role of the photochemical fragmentation in laser ablation: a molecular dynamics study," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 145, no. 3, pp. 173–181, Dec. 2001, doi: 10.1016/S1010-6030(01)00580-9.
- [11] D. R. Paschotta, "Laser Material Processing." https://www.rp-photonics.com/laser_material_processing.html (accessed Jan. 10, 2023).
- [12] J. Majumdar and I. Manna, "Laser processing of materials," *Sadhana*, vol. 28, pp. 495– 562, Jun. 2003, doi: 10.1007/BF02706446.
- [13] J. Majumdar and I. Manna, "Laser material processing," *International Materials Reviews*, vol. 56, pp. 341–388, Nov. 2011, doi: 10.1179/1743280411Y.0000000003.
- [14] D. Yang, *Practical Applications of Laser Ablation*. IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.92496.
- [15] C. Molpeceres, S. Lauzurica, J. L. Ocaña, J. J. Gandía, L. Urbina, and J. Cárabe, "Microprocessing of ITO and a-Si thin films using ns laser sources," J. Micromech. Microeng., vol. 15, no. 6, pp. 1271–1278, Jun. 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/6/019.
- [16] S. Xiao, B. Gröger, S. A. Fernandes, and A. Ostendorf, "Laser selective patterning of ITO on flexible PET for organic photovoltaics," presented at the SPIE LASE, San Francisco, California, USA, Feb. 2011, p. 79210I. doi: 10.1117/12.873289.
- [17] S. Xiao, S. A. Fernandes, and A. Ostendorf, "Selective Patterning of ITO on flexible PET Substrate by 1064 nm picosecond Laser," *Physics Procedia*, vol. 12, pp. 125–132, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.114.
- [18] T. Zhang, D. Liu, H. K. Park, D. X. Yu, and D. J. Hwang, "High resolution laser patterning of ITO on PET substrate," presented at the SPIE LASE, San Francisco, California, USA, Mar. 2013, p. 860712. doi: 10.1117/12.2004122.
- [19] H.-Y. Tsai, H. Yang, C. Pan, and M.-C. Chou, "Laser patterning indium tin oxide (ITO) coated on PET substrate," presented at the International Symposium on Microelectronics and Assembly, Singapore, Singapore, Oct. 2000, pp. 156–163. doi: 10.1117/12.404897.
- [20] G. Račiukaitis, M. Brikas, M. Gedvilas, and G. Darčianovas, "Patterning of ITO with picosecond lasers," presented at the SPIE Proceedings, Feb. 2006, pp. 65960M-65960M-6. doi: 10.1117/12.726407.
- [21] O. Yavas and M. Takai, "Effect of substrate absorption on the efficiency of laser patterning of indium tin oxide thin films," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 8, pp. 4207–4212, Apr. 1999, doi: 10.1063/1.370332.
- [22] C. Y. Leong *et al.*, "Single pulse laser removal of indium tin oxide film on glass and polyethylene terephthalate by nanosecond and femtosecond laser," *Nanotechnology Reviews*, vol. 9, no. 1, pp. 1539–1549, Dec. 2020, doi: 10.1515/ntrev-2020-0115.
- [23] R. Sahin and I. Kabacelik, "Nanostructuring of ITO thin films through femtosecond laser ablation," *Appl. Phys. A*, vol. 122, no. 4, p. 314, Apr. 2016, doi: 10.1007/s00339-016-9847-7.
- [24] S. Xiao, E. L. Gurevich, and A. Ostendorf, "Incubation effect and its influence on laser patterning of ITO thin film," *Appl. Phys. A*, vol. 107, no. 2, pp. 333–338, May 2012, doi: 10.1007/s00339-012-6820-y.
- [25] M.-F. Chen, Y.-P. Chen, W.-T. Hsiao, and Z.-P. Gu, "Laser direct write patterning technique of indium tin oxide film," *Thin Solid Films*, vol. 515, no. 24, pp. 8515–8518, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.tsf.2007.03.172.
- [26] "thermal_diffusion_length." https://glossary.slb.com/en/terms/t/thermal_diffusion_length (accessed Jan. 21, 2023).
- [27] S. Rung, A. Christiansen, and R. Hellmann, "Influence of film thickness on laser ablation threshold of transparent conducting oxide thin-films," *Applied Surface Science*, vol. 305, pp. 347–351, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.03.082.
- [28] D. A. Willis, "Thermal mechanisms of laser micromachining of indium tin oxide," presented at the Lasers and Applications in Science and Engineering, San Jose, Ca, Jul. 2004, p. 313. doi: 10.1117/12.529830.
- [29] D. A. Willis and A. L. Dreier, "Laser micromachining of indium tin oxide films on polymer substrates by laser-induced delamination," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, no. 4, p. 045306, Feb. 2009, doi: 10.1088/0022-3727/42/4/045306.
- [30] K. Lee and C. Lee, "Comparison of ITO ablation characteristics using KrF excimer laser and Nd:YAG laser," presented at the Second International Symposium on Laser Precision Micromachining, Singapore, Singapore, Feb. 2002, p. 260. doi: 10.1117/12.456831.
- [31] PubChem, "Indium tin oxide (In1.69Sn0.15O2.85)." https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/16217324 (accessed Dec. 12, 2022).
- [32] C. McDonnell, D.Milne, C. Prieto, H. Chan, D. Rostohar, and G. M. O'Connor, "Laser patterning of very thin indium tin oxide thin films on PET substrates," *Applied Surface Science*, vol. 359, pp. 567–575, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.apsusc.2015.10.019.
- [33] J. P. Callan, "Ultrafast Dynamics and Phase Changes in Solids Excited by Femtosecond Laser Pulses," Doctor of Philosophy, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 2000.
- [34] D. Hohnholz, K.-H. Schweikart, and M. Hanack, "A Simple Method for the Subdivision of ITO Glass Substrates," *Advanced Materials*, vol. 11, no. 8, pp. 646–649, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(199906)11:8<646::AID-ADMA646>3.0.CO;2-6.

- [35] T. Minami, "Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes," *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 17, pp. 5822–5828, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.tsf.2007.10.063.
- [36] Siddhartha, S. Aarya, K. Dev, S. K. Raghuvanshi, J. B. M. Krishna, and M. A. Wahab, "Effect of gamma radiation on the structural and optical properties of Polyethyleneterephthalate (PET) polymer," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 81, no. 4, pp. 458–462, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.radphyschem.2011.12.023.
- [37] "Indium tin oxide coated PET." http://www.sigmaaldrich.com/ (accessed Jan. 11, 2023).
- [38] Ο. Svelto, APXEΣ ΤΩΝ LASER, 2η. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1986.
- [39] M. Bonnett Del Alamo, C. Soncco, R. Helaconde, J. L. Bazo Alba, and A. M. Gago, "Laser spot measurement using simple devices," *AIP Advances*, vol. 11, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.1063/5.0046287.
- [40] S. Haddadi *et al.*, "Use of a diaphragm for transforming a LG10 beam into a Flat-Top," *Optik*, vol. 127, no. 4, pp. 2207–2211, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.ijleo.2015.11.054.
- [41] *KLA-Tencor Alpha-Step IQ Surface Profiler*. 2004. [Online]. Available: https://ia801807.us.archive.org/27/items/manualzilla-id-5783181/5783181.pdf
- [42] D. Semnani, "Geometrical characterization of electrospun nanofibers," in *Electrospun Nanofibers*, Elsevier, 2017, pp. 151–180. doi: 10.1016/B978-0-08-100907-9.00007-6.
- [43] Α. Κυριτσάκης, "Θεωρία ηλεκτρονικής μικροσκοπίας εγγύς πεδίου," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Αθήνα, 2014. Accessed: Dec. 08, 2022. [Online]. Available: https://freader.ekt.gr/eadd/index.php?doc=43014&lang=el#p=55
- [44] S. L. Erlandsen, C. Frethem, and Y. Chen, "Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) Entering the 21st Century: Nanometer Resolution and Molecular Topography of Cell Structure," *Journal of Histotechnology*, vol. 23, no. 3, pp. 249–259, Sep. 2000, doi: 10.1179/his.2000.23.3.249.
- [45] "Lambda 19 UV/VIS & UV/VIS/NIR Spectrometers Instrument Manual," 2.0., vol. 1, 3 vols., PERKIN ELMER, 1993.
- [46] U. Mahanta, M. Khandelwal, and A. S. Deshpande, "Antimicrobial surfaces: a review of synthetic approaches, applicability and outlook," *J Mater Sci*, vol. 56, no. 32, pp. 17915– 17941, Nov. 2021, doi: 10.1007/s10853-021-06404-0.
- [47] Ι. ΚΟΘΡΟΥΛΑΣ, "ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΕ ΑΝΤΙΜΙΚΡΟΒΙΑΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ," ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, θΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2017. [Online]. Available: http://ikee.lib.auth.gr/record/292673/files/GRI-2017-19858.pdf
- [48] J. C. Tiller, "Antimicrobial Surfaces," in *Bioactive Surfaces*, H. G. Börner and J.-F. Lutz, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, pp. 193–217. doi: 10.1007/12_2010_101.
- [49] R. J. Fair and Y. Tor, "Antibiotics and Bacterial Resistance in the 21st Century," *Perspect Medicin Chem*, vol. 6, p. PMC.S14459, Jan. 2014, doi: 10.4137/PMC.S14459.
- [50] R. Kaur and S. Liu, "Antibacterial surface design Contact kill," *Progress in Surface Science*, vol. 91, no. 3, pp. 136–153, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.progsurf.2016.09.001.
- [51] T. Wei, Q. Yu, and H. Chen, "Responsive and Synergistic Antibacterial Coatings: Fighting against Bacteria in a Smart and Effective Way," *Adv. Healthcare Mater.*, vol. 8, no. 3, p. 1801381, Feb. 2019, doi: 10.1002/adhm.201801381.
- [52] V. Selvamani *et al.*, "Hierarchical Micro/Mesoporous Copper Structure with Enhanced Antimicrobial Property via Laser Surface Texturing," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 7, p. 1901890, Apr. 2020, doi: 10.1002/admi.201901890.

Παράρτημα 1

Κώδικας εγχάραζης ορθογωνίων στο πρόγραμμα XILab.

Πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές xshift και yshift που καθορίζουν τα μήκη του ορθογωνίου στους άξονες x,y αντίστοιχα. Επίσης πρέπει να οριστούν οι μεταβλητές xspeed και yspeed που καθορίζουν την ταχύτητα σε κάθε άξονα. Το ένα βήμα (step) αντιστοιχεί σε 2.5 μm.

```
/*
square. Made for ITO ablation. It starts from the front right corner. 4/2022
*/
var xshift = 8000; /*in steps*/
var yshift = 8000; /*in steps*/
var xspeed= 22; /*in steps/sec*/
var yspeed = 22; /*in steps/sec*/
var axes = [];
var number_of_axes = 0;
var last serial = 0;
while (serial = get_next_serial(last_serial)) // get next serial number and repeat for each
axes.
{
  axes[number_of_axes] = new_axis(serial);
  log("Found axis " + number_of_axes + " with serial number " + serial);
  number_of_axes++;
  last serial = serial;
}
for (var i = 0; i < 2; i++)
  {
```

```
var m = axes[0].get_move_settings(); // read movement settings from the controller
for x-axis
```

m.Speed = xspeed; // set speed

m.Accel = 100; // set acceleration

m.Decel = 100; // set deceleration

axes[0].set_move_settings(m); // write movement settings into the controller

```
axes[0].command_movr(xshift); // send MOVR command (does a relative shift)
```

```
axes[0].wait_for_stop(); // wait until controller stops moving
```

```
var n = axes[1].get_move_settings(); //read movement settings from the controller for
xis
```

y-axis

```
n.Speed = yspeed; //set speed
```

```
n.Accel = 100; //set acceleration
```

```
n.Decel = 100; // set deceleration
```

```
axes[1].set\_move\_settings(n); // write movement settings into the controller
```

```
axes[1].command_movr(yshift); // send MOVR command (does a relative shift)
```

```
axes[1].wait_for_stop(); // wait until controller stops moving
```

```
xshift = -xshift;
```

```
yshift = -yshift;
```

```
}
```