



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

‘Μικρο-εγχάραξη λεπτών υμενίων ZnO και
 $CuInGaSe_{1-x}Te_x$ με *laser* για φωτοβολταϊκά
στοιχεία 2ης γενιάς’

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό τον
Ηλία Αθανηλίδη

Επιβλέπων Καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

ΕΜΠ
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015

Περίληψη

Η ανάγκη για τη μείωση των χρησιμοποιούμενων υλικών στις φωτοβολταϊκές κυψέλες, καθώς και η μείωση του κόστους κατασκευής οδήγησε στην ανάπτυξη και μελέτη των λεπτών υμενίων και των ιδιοτήτων τους. Σημαντικό κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας είναι η εγχάραξη των υμενίων, ώστε να γίνει η μετατροπή τους από μεμονωμένες ηλιακές κυψέλες, σε ολοκληρωμένα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η μικρο-επεξεργασία δύο βασικών τύπων λεπτών υμενίων. οι τύποι υμενίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν υμένια του Οξειδίου του Ψευδαργύρου (ZnO) και υμένια χαλκοπυρίτη $CuInGaSe_{(1-x)}Te_x$. Τα υμένια ZnO που χρησιμοποιήθηκαν ήταν βιομηχανικά δείγματα της εταιρείας παραγωγής φωτοβολταϊκών *Heliosphera*, ενώ τα υμένια χαλκοπυρίτη παράχθηκαν με την μέθοδο *e – beam evaporation*.

Για την εγχάραξη τους χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών, η οποία περιελάμβανε ένα παλμικό *Nd : YAG laser* (μήκους κύματος ακτινοβολίας $355nm$, συχνότητας $10Hz$ και ενέργειας που κυμάνθηκε από 0.7 έως $2.0mJ/p$ κατά περίπτωση), διάφορα οπτικά εξαρτήματα (φακοί εστίασης, διαφράγματα) και μια κινητή βάση, στην οποία τοποθετούνταν τα υμένια.

Στόχος των εγχαραξέων των λεπτών υμενίων ήταν η δημιουργία καναλιών πλάτους $\sim 50\mu m$. Κατά την διάρκεια των εγχαραξέων εξετάστηκε η επιρροή διαφόρων παραγόντων, όπως η ενέργεια του *laser*, τα οπτικά εξαρτήματα και η ταχύτητα πρόωσης της κινητής τράπεζας, ως προς την ποιότητα των παραγόμενων καναλιών.

Abstract

The need for reduction of materials used in photovoltaic cells, as well as reducing manufacturing costs led to the further development and study of thin film technology and their properties. An important part of the production process is the microscribing of the films in order to make the conversion from individual solar cells to full modules.

This master dissertation presents a micro-processing of two types of thin film technology are being presented. The type of films used, consist of zinc oxide (ZnO) and CIGS thin films. The ZnO films were samples provided by the photovoltaic production company Heliosphera, while CIGS films were produced by the method of e-beam evaporation method.

For the microscribing process, the experimental setup of the National Research Foundation, the apparatus was used included a pulsed Nd:YAG laser (at 355nm, repetition rate 10Hz and energy from 0.7 to 2.0 mJ/p, when applicable), various optical components (focus lenses, apertures) and a movable base, on which the films were placed.

The aim of the engravings of thin films was to create channels of 50 μ m width. During the engraving process, the influence of various factors such as the energy of laser, optical components and the velocity of the moving table, on the quality of the channel, was examined.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	21
1.1	Η ανάγκη για την φωτοβολταϊκή τεχνολογία	21
1.2	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	22
2	Ημιαγωγοί	27
2.1	Ημιαγωγοί	27
2.1.1	Κατηγορίες ημιαγωγών	31
2.1.2	Επαφή τύπου $p - n$	34
2.2	Τρόπος λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψέλης	37
2.3	Ισοδύναμο Κύκλωμα	39
2.4	Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	40
3	Κατηγοριοποίηση Φ/Β Στοιχείων	43
3.1	Κρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία ($c-Si$)	43
3.1.1	Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου ($sc-Si$)	43
3.1.2	Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου ($mc-Si$)	44
3.1.3	Ταινίας Πυριτίου ($ribbon-Si$)	46
3.2	Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Λεπτών Υμενίων ($Thin Films$)	48
3.2.1	Άμορφου Πυριτίου ($a-Si$)	48
3.2.2	Τελουριούχου Καδμίου ($CdTe$)	50
3.2.3	Αρσενιούχου Γαλλίου ($GaAs$)	51
3.2.4	Χαλκοπυριτών $CIS/CIGS$	52
3.2.5	Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία ($HJ - HIT$)	53
3.3	Πολυμερή και Οργανικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία	54
3.4	Θερμοφωτοβολταϊκά Στοιχεία (TPV)	57
3.5	Φωτοβολταϊκά Στοιχεία με την χρήση νανοτεχνολογίας	58
3.5.1	<i>Carbon nanotubes (CNT)</i>	59
3.5.2	<i>Quantum Dots (QD)</i>	60
3.5.3	<i>Hot carrier solar cell (HC)</i>	60

4	Μέθοδοι εναπόθεσης και ανάπτυξη λεπτών υμενίων και εγχάραξης	63
4.1	Τεχνικές εναπόθεσης	63
4.2	Χημική Εναπόθεση Ατμών (<i>CVD</i>)	64
4.3	Φυσική Εναπόθεση Ατμών (<i>PVD</i>)	65
4.3.1	Εξάχνωση υπό Κενό (<i>Vacuum Evaporation</i>)	66
4.3.2	Ιοντοβολή (<i>Sputtering</i>)	67
4.3.3	Ιοντική Επιμετάλλωση (<i>Ion Plating</i>)	68
4.3.4	Παλμική Εναπόθεσης με χρήση <i>Laser</i> (<i>Pulsed Laser Deposition</i> ή <i>PLD</i>) .	69
4.4	<i>Scribbling</i>	74
4.4.1	Διασύνδεση και εγχάραξη λεπτών υμενίων	75
5	Χαρακτηρισμός λεπτών υμενίων	79
5.1	Εισαγωγή	79
5.2	Περίθλαση Ακτινών – <i>X</i> (<i>XRD</i>)	79
5.2.1	Αρχές Λειτουργίας <i>XRD</i>	79
5.2.2	Πειραματική Διάταξη <i>XRD</i>	80
5.3	Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (<i>AFM</i>)	80
5.3.1	Αρχές Λειτουργίας <i>AFM</i>	81
5.3.2	Τρόποι λειτουργίας <i>AFM</i>	84
5.3.3	Αλληλεπίδραση με την επιφάνεια	86
5.3.4	Αναγνώριση και αποφυγή σφαλμάτων <i>AFM</i>	86
5.4	Υπολογισμός Πάχους Λεπτών Υμενίων	89
5.4.1	Ανάκλαση του φωτός	90
5.4.1.1	Διάθλαση του φωτός	90
5.4.1.2	Πόλωση του φωτός	92
5.4.2	Υπολογιστικά μοντέλα προσδιορισμού πάχους λεπτών υμενίων	93
5.4.2.1	Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός στην επιφάνεια ενός διαφανούς μέσου	93
5.4.2.2	Μέθοδος των πινάκων χρησιμοποιώντας τους συντελεστές <i>Freshel</i>	96
5.4.2.3	Εφαρμογή της μεθόδου των πινάκων για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας και της διαπερατότητας	98

5.4.3	Μέθοδος υπολογισμού πάχους λεπτών υμενίων με την βοήθεια της μεθόδου <i>Manifacier</i>	101
5.4.4	Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού πάχους πολύ λεπτών υμενίων	102
5.5	Φασματοφωτόμετρο (<i>Spectrophotometer</i>)	103
5.6	Μέθοδος <i>Tauc</i>	105
6	Πειραματική διάταξη	107
6.1	Περιγραφή της διάταξης <i>Scribing</i>	107
6.1.1	Υποσύστημα [1]	107
6.1.1.1	Οπτικά εξαρτήματα	107
6.1.2	Υποσύστημα [2]	112
6.1.2.1	Φασματόμετρο ή Μονοχρωμάτορας	112
6.1.2.2	Φωτοπολλαπλασιαστής	116
6.1.2.3	Η οπτική ίνα	117
6.1.3	Διαδικασία εγχάραξης των λεπτών υμενίων <i>ZnO</i> και <i>CuInGaSe_(1-x)Tex</i>	118
7	Αποτελέσματα	121
7.1	Πειραματικά δείγματα	121
7.2	Εγχάραξη δειγμάτων με χρήση <i>laser</i>	121
7.2.1	Εγχάραξη δειγμάτων <i>ZnO</i> με χρήση <i>laser</i>	124
7.2.2	Εγχάραξη δειγμάτων χαλκοπυρίτη <i>CIGS</i> με χρήση <i>laser</i>	150
7.2.3	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εγχάραξης - Συμπεράσματα	166
8	Βελτιώσεις	169
	Βιβλιογραφία	171

Κατάλογος Σχημάτων

1	Συνολική παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ	21
2	Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα	22
3	Περιοχή ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που περιλαμβάνει τα κύματα του φωτός και άλλα γνωστά κύματα	23
4	Η σχέση ανάμεσα στην ενέργεια, το χρώμα και το μήκος κύματος	24
5	Το μήκος της απόστασης σε μονάδες αέριας μάζας εξαρτάται από την ζενίθια γωνία	25
6	Εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και οι παράγοντες που την επηρεάζουν	25
7	Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εντός και εκτός της ατμόσφαιρας	26
8	Περιοδικός Πίνακας	27
9	(α) Στοιχειώδης κυψελίδα μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε μορφή κρυσταλλικού πλέγματος διαμαντιού (β) Η ατομική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου	28
10	Το μοντέλο δεμών κρυσταλλικού πυριτίου $c - Si$ (Αριστερά: Όλα τα άτομα πυριτίου είναι δεμσευμένα. Δεξιά: Σπάσιμο δεσμού ατόμων πυριτίου)	28
11	Κρυσταλλική δομή ατόμου πυριτίου	29
12	Αναπαράσταση ενεργειακών ζώνων και του ενεργειακού διάκενου	30
13	Ενεργειακές ζώνες και ενεργειακές στάθμες ενός κρυσταλλικού υλικού	31
14	Κρυσταλλική δομή ενδογενούς ημιαγωγού	32
15	Κρυσταλλική δομή εξωγενούς ημιαγωγού	32
16	Δημιουργία ημιαγωγού τύπου n	33
17	Δημιουργία ημιαγωγού τύπου p	34
18	Σχηματισμός της επαφής $p - n$ και οι ιδιότητες της	35
19	Επαφή $p - n$ σε ισορροπία	36
20	Ορθή πόλωση διόδου $p - n$ (-: ηλεκτρόνια, ο: οπές, \oplus : θετικά ιόντα, \ominus : αρνητικά ιόντα)	36
21	Αντίστροφη πόλωση διόδου $p - n$ (-: ηλεκτρόνια, ο: οπές, \oplus : θετικά ιόντα, \ominus : αρνητικά ιόντα)	37
22	Τυπική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου	38
23	Τυπική δομή φωτοβολταϊκού κελιού και ροή ρεύματος	38
24	Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ισοδύναμου κυκλώματος για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο	39
25	Χαρακτηριστική καμπύλη $I = f(V)$ για ένα ηλιακό κελί	40

26	Χαρακτηριστική $I - V$, $P - V$ και τα μεγέθη μέγιστης ισχύος ϕ/β στοιχείου	41
27	Χαρακτηριστικές $I - V$ σε συνάρτηση με την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	42
28	Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου	43
29	Διαδικασία παραγωγής της μεθόδου <i>Czochralski</i>	44
30	Αρχή λειτουργίας <i>Float - Zone</i> . Θερμαινόμενος δακτύλιος κινείται κατακόρυφα και λιώνει το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο τοπικά, έτσι ώστε οι ακαθαρσίες να κινηθούν προς τα πάνω κατά την κρυστάλλωση	44
31	Τυπική διάταξη της διαδικασίας <i>Bridgman</i> για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η τήξη και η στερεοποίηση γίνεται στο ίδιο δοχείο. Κατά τη στερεοποίηση το δοχείο με αργό ρυθμό κινείται εκτός της περιοχής των θερμοαντήρων.	45
32	Διαδικασία <i>block - casting</i> . Μετά την τήξη το μείγμα μεταφέρεται σε ειδικό δοχείο χωρίς σύστημα θέρμανσης για την στερεοποίηση.	46
33	Φωτοβολταϊκό στοιχείο <i>Ribbon Silicon</i>	47
34	Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής <i>EFG</i> σε καλούπι (a) και σε οκταγωνική διαμόρφωση (b).	47
35	Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου <i>STR</i>	48
36	Κρυσταλλική δομή α -Si και απεικόνιση παραγωγής α -Si με τη μέθοδο <i>Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)</i>	49
37	Τυπική δομή λεπτού υμενίου α -Si, με συνολικό πάχος εναπόθεσης $\sim 2\mu m$	49
38	Δομή υπερστρώματος κυψέλης <i>CdTe</i>	50
39	Τομή λεπτού υμενίου ΓaAs	51
40	Αρχή της δομής ενός κελιού <i>CIS/CIGS</i> και εικόνα μικροσκοπίου	52
41	Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων τύπων <i>HJ</i> και <i>HIT</i> ηλιακών κελιών	53
42	Σχηματική αναπαράσταση τυπικών μορφών οργανικών ϕ/β στοιχείων	55
43	Κανονική και αντεστραμμένη διάταξη οργανικής φωτοβολταϊκής κυψελίδας	56
44	Τυπική ηλεκτρική σύνδεση κυψελίδων	56
45	Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας <i>TPV</i>	57
46	Ισορροπία ενέργειας <i>TPV</i>	58
47	Τυπική δομή <i>Carbon nanotubes</i>	59
48	Τυπική δομή <i>Quantum Dots</i>	60
49	Τυπική δομή <i>Hot carrier solar cell</i>	61
50	Κύριες μέθοδοι εναπόθεσης	63
51	Βασικές Διεργασίες κατά τη χημική εναπόθεση από ατμό	64

52	Σχηματική αναπαράσταση θερμικής εναπόθεσης υπό κενό(Αριστερά:Με θέρμανση μέσω αντίστασης. Δεξιά: Με δέσμη ηλεκτρονίων)	66
53	Αρχή λειτουργίας ιοντοβολής	67
54	Απλοποιημένα διαγράμματα <i>DC</i> και <i>RF magnetron sputtering</i> . Η κυκλωματική διαφορά των δύο συσκευών βρίσκεται στο κύκλωμα προσαρμογής της <i>RF</i> μονάδας	68
55	Τυπική διάταξη ιοντικής επιμετάλλωσης	69
56	Τυπική διάταξη <i>PLD</i>	70
57	Τομές υμενίων για τις τρεις βασικές μεθόδους εναπόθεσης	73
58	Τυπική δομή (α) υπερστρωματικής(<i>superstrate</i>) και (β)υποστρωματικής(<i>substrate</i>) διαμόρφωσης λεπτών υμενίων	75
59	Σχηματική περιγραφή των βημάτων της παραγωγικής διαδικασίας για την δημιουργία μονολιθικών συνδέσεων σε λεπτά υμένια χαλκοπυρίτη.	76
60	Τυπικό σχεδιάγραμμα συνδέσεων (α) για λεπτά υμένια <i>CIGS</i> και (β) για λεπτά υμένια <i>CdTe</i>	76
61	Διαδικασία παραγωγής λεπτών υμενίων	77
62	Ευρύτερη οικογένεια των <i>SPM</i> (<i>Scanning Probe Microscope</i>)	81
63	Απεικόνιση διάταξης <i>AFM</i>	82
64	Εικόνα ακίδας ΑΦΜ από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο	83
65	Διάγραμμα αλληλεπίδρασης μεταξύ ακίδας – επιφάνειας συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης και περιοχές λειτουργίας του <i>AFM</i>	85
66	Τρόποι λειτουργίας <i>AFM</i>	85
67	Ακίδα <i>AFM</i> κοντά στην επιφάνεια ενός δείγματος. Οι δυνάμεις μικρής εμβέλειας απεικονίζονται με κόκκινο σημάδι ως η επικάλυψη των ηλεκτρονικών νεφών και οι δυνάμεις μακράς εμβέλειας απεικονίζονται με βέλη	86
68	Λάθος ίχνη εμφανίζονται από μια αμβλεία ή απότομη ακμή. Σε τέτοια σφάλματα, το αποτέλεσμα εμφανίζεται μεγαλύτερο από το πραγματικό.	87
69	Μια διπλή ακίδα εμφανίζει σκιάδης ή διπλές ενδείξεις κατά την κατεύθυνση σάρωσης. 87	
70	Λόγω του μεγέθους της ακίδας, η οπή δεν θα αναπαρασταθεί ακριβώς.	88
71	Μια αλλοιωμένη ακίδα λόγω φθοράς, δημιουργεί σφάλματα, ενώ σαρώνει μοτίβα. .	88
72	(α)Σφάλματα κατά την σάρωση ενός δοκιμαστικού μοτίβου λόγω της μη γραμμικότητας του σαρωτή. (β') Διάγραμμα κίνησης ανά σήμα οδήγησης. Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από έναν αντίστοιχο γραμμικό σαρωτή.	88
73	(α') Το φαινόμενο της υστέρησης κατά την σάρωση ανά βήμα.(β') Το διάγραμμα εμφανίζει την απόκλιση από την πραγματική τιμή των μετρήσεων κατά των <i>z</i> άξονα, από το σημείο βαθμονόμησης.	89
74	Το φαινόμενο ερπυσμού στην κάθετη διεύθυνση: υπερύψωση στις ακμές κάθε βήματος.	89

75	Σχηματική παράσταση (α) κατοπτρικής ανάκλασης, όπου όλες οι ανακλώμενες ακτίνες είναι παράλληλες και (β) της διάχυτης ανάκλασης (διάχυσης), όπου οι ανακλώμενες ακτίνες κατευθύνονται σε τυχαίες διευθύνσεις	90
76	Σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης, $\theta_1 = \theta_1'$	90
77	Ακτίνα προσπίπτει πλάγια στο επίπεδο που χωρίζει τον αέρα από το γυαλί. Η διαθλώμενη (στο γυαλί) ακτίνα πλησιάζει την κάθετο διότι $n_2 > n_1$ και $u_2 < u_1$	91
78	Διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατευθυνόμενου κατά τον άξονα x . Το διάνυσμα E του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται στο πεδίο xy , ενώ το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου H ταλαντώνεται στο επίπεδο xz	92
79	(α) Μη πολωμένη δέσμη φωτός που κατευθύνεται κάθετα προς τη σελίδα. Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να ταλαντώνεται με την ίδια πιθανότητα προς κάθε κατεύθυνση, (β) Γραμμικά (ή επίπεδα) πολωμένη δέσμη φωτός της οποίας το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται στην κατεύθυνση του βέλους	93
80	Το σύστημα συντεταγμένων κατά την πρόσπτωση ενός επίπεδου κύματος στο επίπεδο xOz για $z=0$	94
81	Σύστημα n υμενίων	97
82	Υμένιο που απορροφά πάνω σε υπόστρωμα που απορροφά	99
83	Πραγματικό και φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης $n(\lambda)$ υλικού γύρω από μία συχνότητα συντονισμού	103
84	Σχηματική απεικόνιση <i>UV/Vis Spectrophotometer</i>	104
85	Τυπικά αποτελέσματα φασματομετρίας σε χαλκοπυρίτη	105
86	Παράδειγμα υπολογισμού ενεργειακού διακένου με την μέθοδο <i>Tauc</i>	106
87	Διαγραμματική αναπαράσταση της διάταξης εγχάραξης	107
88	Το προφίλ της δέσμης όταν εξέρχεται από το <i>Nd:YAG laser</i>	108
89	Το ομογενοποιημένο προφίλ της δέσμης	108
90	Το διάφραγμα <i>D1</i> της πειραματικής διάταξης	109
91	(α) Ο διαχωριστής δέσμης της πειραματικής διάταξης, (β) Η λειτουργία του διαχωριστή δέσμης	110
92	Διάφραγμα <i>D2</i> και <i>filter 532 nm</i> της πειραματικής διάταξης	110
93	Φακός εστίασης, μικρομετρικός κοχλίας κίνησης της βάσης στήριξης του φακού και μεταλλικό διάφραγμα	111
94	<i>DC</i> κινητήρας της πειραματικής διάταξης για κίνηση της βάσης τοποθέτησης του στόχου	112
95	Αρχή λειτουργίας φράγματος περίθλασης τύπου <i>Czerny – Turner</i>	113
96	Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού περίθλασης σε φράγμα ανάκλασης	114
97	Επίδραση του πλάτους της σχισμής εισόδου στην ευκρίνεια του φάσματος	115

98	Επίδραση του πλάτους της σχισμής εισόδου στην ένταση του φάσματος	116
99	Διαγραμματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων ενός φωτοπολλαπλασιαστή	116
100	Σχηματική αναπαράσταση της οπτικής ίνας	117
101	Οπτική ίνα της πειραματικής διάταξης	118
102	Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (<i>Heat Affected Zone - H.A.Z.</i>)	121
103	Σχηματική αναπαράσταση της επικάλυψης των ατμών του μετάλλου στις άκρες της τομής	122
104	Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης με το διάφραγμα <i>D2</i> και τον εστιακό φακό	123
105	Απόσταση άνω ακμής φακού εστίασης – βάσης τοποθέτησης στόχου της πειραματικής διάταξης	124
106	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $0.7mJ/p$ (αριστερά) και $1.0mJ/p$ (δεξιά)	125
107	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.5mJ/p$ (αριστερά) και $1.25mJ/p$ (δεξιά)	125
108	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $2.0mJ/p$ (αριστερά) και $1.75mJ/p$ (δεξιά)	126
109	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $0.7mJ/p$.	126
110	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.0mJ/p$.	127
111	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.25mJ/p$.	127
112	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του <i>ZnO</i> , που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας $1.25mJ/p$, ταχύτητα $2Volts$, $D2 = 2mm$ και εστιακή απόσταση $d = 88mm$.	128
113	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.50mJ/p$.	129
114	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.75mJ/p$.	130
115	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $2.0mJ/p$.	131
116	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.25mJ/p$ και $1.0mJ/p$	132
117	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.75mJ/p$ και $1.5mJ/p$	132
118	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $2.0mJ/p$ και $1.75mJ/p$	133
119	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.0mJ/p$.	133
120	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία <i>ZnO</i> , με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.25mJ/p$.	134

121	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.25mJ/p$.	134
122	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.5mJ/p$.	135
123	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.75mJ/p$.	136
124	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$.	137
125	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$.	137
126	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.5mJ/p$.	138
127	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $2.0mJ/p$.	139
128	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητες από $0.5Volt$ έως $1.5Volts$ (από αριστερά προς τα δεξιά)	140
129	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $2.0Volts$	140
130	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του AFM , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του ZnO που παράχθηκε με εστιασμένο $laser$ ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $2Volts$ και $D2 = 2mm$, $d = 96mm$.	141
131	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του AFM , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του ZnO που παράχθηκε με εστιασμένο $laser$ ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $2Volts$, $D2 = 2mm$, $d = 96mm$	142
132	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $1.5Volts$	143
133	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του AFM , της δεξιάς πλευράς της ακμής και εντός του καναλιού, της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του ZnO που παράχθηκε με εστιασμένο $laser$ ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $1.5Volts$, $D2 = 2mm$, $d = 96mm$	144
134	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του AFM , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του ZnO που παράχθηκε με εστιασμένο $laser$ ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $1.5Volts$, $D2 = 2mm$, $d = 96mm$	145
135	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $1.0Volt$	146
136	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.75Volt$	146
137	Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.5Volt$	147
138	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του AFM , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του ZnO που παράχθηκε με εστιασμένο $laser$ ενέργειας $1mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$, $D2 = 2mm$ και εστιακή απόσταση $d = 96mm$	148
139	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του AFM , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του ZnO , που παράχθηκε με εστιασμένο $laser$ ενέργειας $1mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$, $D2 = 2mm$ και εστιακή απόσταση $d = 96mm$	149

140	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 2.8mJ/p και ταχύτητα 4.0Volts	150
141	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 2.8mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts	151
142	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 2.8mJ/p, ταχύτητα 2Volts	152
143	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 2.8mJ/p, ταχύτητα 2Volts	153
144	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.5Volts	154
145	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.5Volts	154
146	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.5Volts	155
147	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.5Volts, 2mm εκτός εστιακής απόστασης	156
148	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.5Volts, 4mm εκτός εστιακής απόστασης	156
149	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts, με εστιακή απόσταση 87mm	157
150	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.0Volts και εστιακή απόσταση 87mm	157
151	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , του πυθμένα της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.0Volts και εστιακή απόσταση 87mm	158
152	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.0Volts και εστιακή απόσταση 87mm	159
153	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 0.5mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts, με εστιακή απόσταση 87mm	160
154	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts, με εστιακή απόσταση 87mm	160
155	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> 1.25mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts, με εστιακή απόσταση 87mm	161

156	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας $1.25mJ/p$, ταχύτητα $2.0Volts$ και εστιακή απόσταση $87mm$	162
157	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $2.0Volts$, με εστιακή απόσταση $87mm$	163
158	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $1.0Volt$, με εστιακή απόσταση $87mm$	163
159	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.5Volt$, με εστιακή απόσταση $87mm$	164
160	Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου <i>laser</i> $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.5Volt$, με εστιακή απόσταση $87mm$	164
161	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$ και εστιακή απόσταση $87mm$	165
162	Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του <i>AFM</i> , της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο <i>laser</i> ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$ και εστιακή απόσταση $87mm$	166
163	Αρχή λειτουργίας διαμορφωτή δέσμης	169
164	Παράδειγμα διαμόρφωσης δέσμης. Αριστερά <i>Gaussian</i> δέσμη, δεξιά <i>flat top</i> δέσμη	169
165	Οπτικές παγίδες δέσμης <i>laser</i>	170
166	Αλληλεπίδραση της διαφορετικής διάρκειας παλμών <i>laser</i>	170

Κατάλογος Πινάκων

1	Βέλτιστα αποτελέσματα εγχυράξεων	167
---	--	-----

1 Εισαγωγή

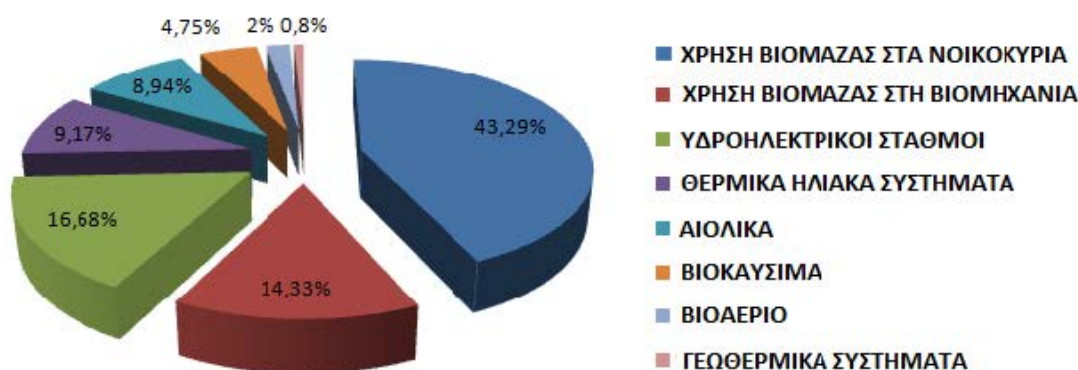
1.1 Η ανάγκη για την φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση, οι ενεργειακές ανάγκες των κοινωνιών άλλαξαν εξ ολοκλήρου. Η εξάρτησή τους από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε ραγδαία, συνεπώς και η παραγωγή της. Μέχρι τότε η παραγωγή ενέργειας προερχόταν από την καύση του ορυκτού πλούτου του πλανήτη, δηλαδή κυρίως πετρέλαιο και κάρβουνο. Αυτή η μέθοδος είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των διαθέσιμων ποσοτήτων των ορυκτών κοιτασμάτων, αγνοώντας τότε ότι τα αποθέματα των ορυκτών έχουν πεπερασμένη ποσότητα.

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής εξακολουθεί να απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας, τις οποίες συνεχίζουμε να τις καλύπτουμε από τις συμβατικές πηγές ενέργειας. Εξαιτίας αυτής της αλόγιστης χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας είχαμε ως αποτέλεσμα να καταναλωθεί το μεγαλύτερο μέρος των διαθέσιμων πόρων, και πλέον το διαθέσιμο ποσοστό τους προς εκμετάλλευση να αρκεί μόνο για 40-50 χρόνια ακόμα, μέχρι δηλαδή την ολοκληρωτική τους εξάντληση.

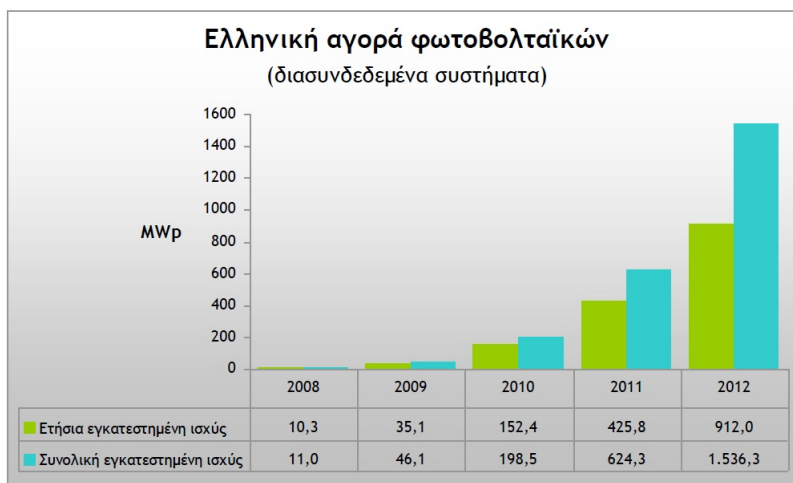
Εκτός από το μεγάλο ζήτημα που δημιουργείται από την προαναφερθείσα εξάντληση των πόρων, η σύγχρονη κοινωνία ήρθε αντιμέτωπη και με μια ακόμα συνέπεια τη αλόγιστης ενεργειακής χρήσης, την καταστροφή του περιβάλλοντος. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου από τις συνεχείς εκπομπές καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, η ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα εξαιτίας των εργοστασιακών λυμάτων και των διαρροών πετρελαίου, όπως επίσης και η μόλυνση του εδάφους με ραδιενέργεια από εργοστασιακά πυρηνικά ατυχήματα, έχουν καταστήσει πλέον επιτακτική την ανάγκη για την ανάπτυξη νέων εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας.

Η λύση στο ενεργειακό πρόβλημα που προέκυψε, από την εξάντληση των ορυκτών αποθεμάτων, αλλά και στη μείωση της περιβαλλοντικής καταστροφής είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Οι Α.Π.Ε. είναι μορφές ενέργειας που προκύπτουν από τη φύση, όπως ο άνεμος, η βιομάζα, το νερό, ο ήλιος κ.α. Αρχικά, αυτές οι μορφές ενέργειας είναι ανεξάντλητες, καθώς υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Μάλιστα είναι και οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε το ανθρώπινο είδος μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, όπου και στράφηκε πλέον στον άνθρακα. Επιπρόσθετα, δεν στηρίζονται σε ρυπογόνες για το περιβάλλον μεθόδους εκμετάλλευσης, αντιθέτως έχουν υψηλή αποδοτικότητα και ελάχιστη εκπομπή ρύπων.



Σχήμα 1: Συνολική παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ

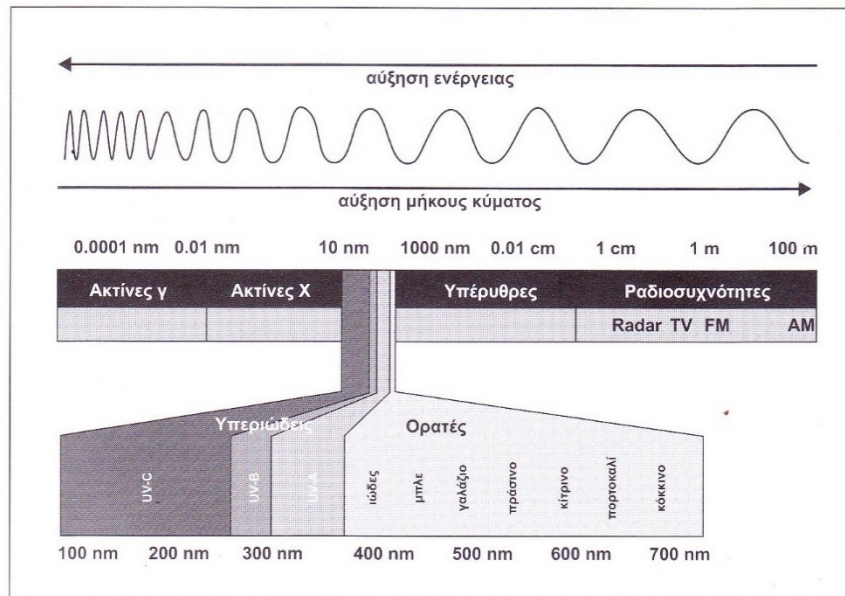
Από τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας, η πιο κατάλληλη για τη χώρα μας, εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης, είναι η ηλιακή ενέργεια. Ήδη την εκμεταλλευόμαστε ως πηγή θερμότητας (ηλιακός θερμοσίφωνας), μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου μετά από τη χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Κατά το φαινόμενο αυτό επιτελείται η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, στηριζόμενη στην ιδιότητα ορισμένων στοιχείων του περιοδικού πίνακα όταν απορροφούν ηλιακό φως, να εμφανίζουν ηλεκτρική τάση στα άκρα τους.



Σχήμα 2: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

1.2 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Μια από τις πιο βασικές λειτουργίες του φωτοβολταϊκού φαινομένου, στο οποίο στηρίζεται η λειτουργικότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι η παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίων - οπών, λόγω της απορρόφησης της ορατής ή άλλου είδους ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ημιαγωγούς.



Σχήμα 3: Περιοχή ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που περιλαμβάνει τα κύματα του φωτός και άλλα γνωστά κύματα

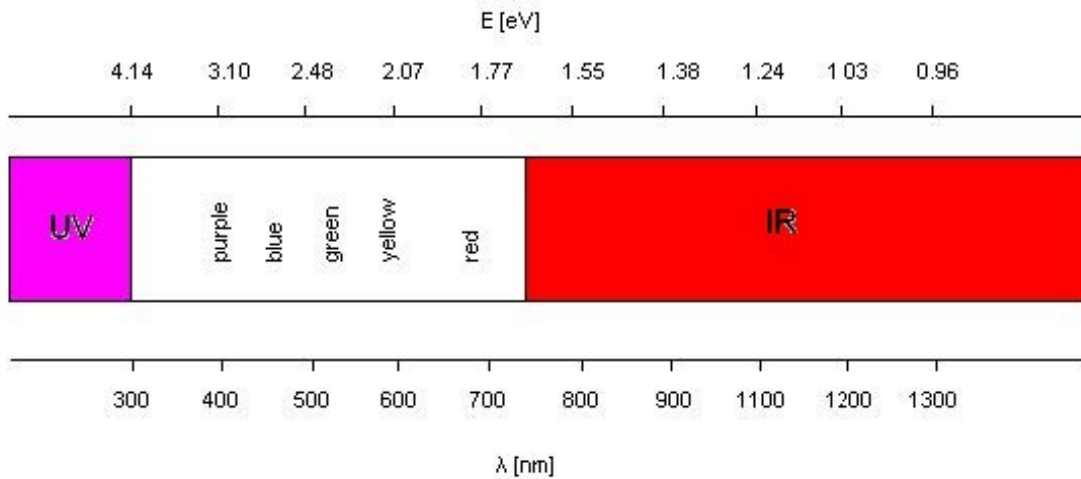
Στις αρχές του 20ου αιώνα, ο *Einstein* κατάφερε να εξηγήσει την επίδραση της συχνότητας και της έντασης του φωτός στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εισάγοντας τα κβάντα φωτός. Σήμερα μπορούμε να αναλύσουμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, στους όρους που την χαρακτηρίζουν, όπως το μήκος κύματος (l) και η συχνότητα (ν), καθώς και σε διακριτά σωματίδια, τα φωτόνια, τα οποία χαρακτηρίζονται από ενέργεια ($h\nu$) εκφρασμένη σε τάση ρεύματος.

Οι μαθηματικές εκφράσεις που εκφράζουν τα παραπάνω μεγέθη είναι οι εξής:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

$$h\nu = \frac{1}{q} \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Όπου, c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$), h είναι η σταθερά *Planck* ($6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$) και q είναι το στοιχειώδες φορτίο ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$). Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στην ενέργεια, το χρώμα και το μήκος κύματος στο φως.

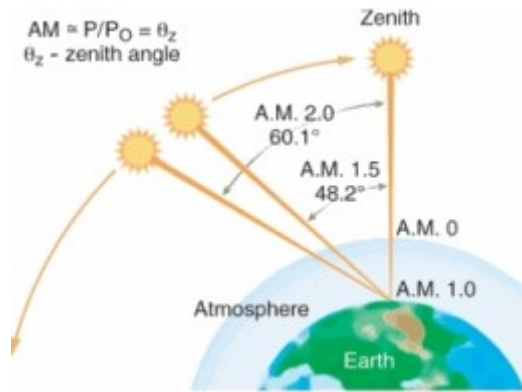


Σχήμα 4: Η σχέση ανάμεσα στην ενέργεια, το χρώμα και το μήκος κύματος

Μόνο ηλεκτρόνια με την κατάλληλη ενέργεια μπορούν να απορροφηθούν και να δημιουργήσουν ζεύγη ηλεκτρονίων - οπών σε έναν ημιαγωγό. Επομένως, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή τον αριθμό των φωτονίων μιας συγκεκριμένης ενέργειας ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται δυο ποσότητες που περιγράφουν το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτές οι ποσότητες είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος $P(\lambda)$ (*spectral power density*) και η πυκνότητα ροής φωτονίων $\Phi(\lambda)$ (*photon flux density*). Η φασματική πυκνότητα ισχύος είναι η προσπίπτουσα ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα εμβαδού και ανά μονάδα μήκους κύματος [W/m^3]. Η πυκνότητα ροής φωτονίων είναι το πλήθος φωτονίων ανά μονάδα εμβαδού, ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα μήκους κύματος [$ph/m^3 \times s$]. Η σχέση που διέπει τα δυο μεγέθη είναι η ακόλουθη:

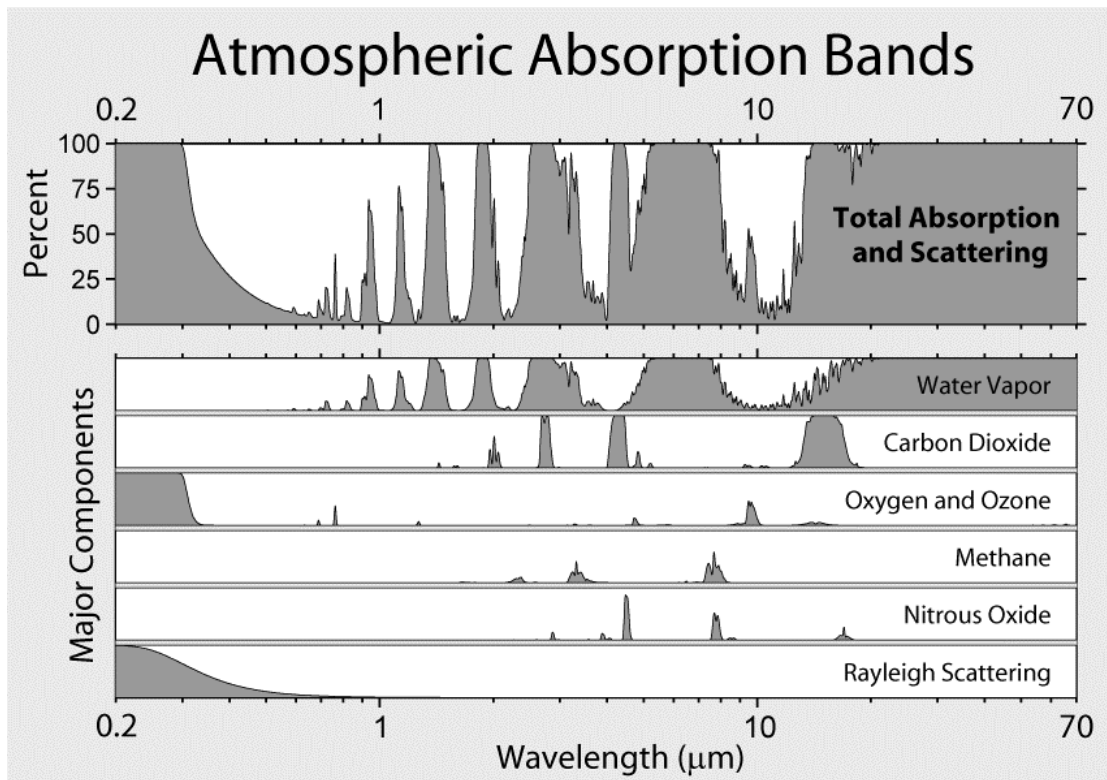
$$\Phi(\lambda) = P(\lambda) \frac{\lambda}{hc} \quad (3)$$

Ο ήλιος απελευθερώνει τεράστιες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας στο ηλιακό σύστημα. Η θερμοκρασία στον πυρήνα του ήλιου είναι αρκετή, ώστε να διευκολύνονται οι πυρηνικές αντιδράσεις, που αποτελούν την πηγή της ηλιακής ενέργειας. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ήλιου πλησιάζει τους $5900^\circ K$ (μέλαν σώμα), και ονομάζεται φωτόσφαιρα. Η συνολική ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας στην κάθετη απόσταση του ήλιου με την γη (κατά μέσο όρο) ονομάζεται ηλιακή σταθερά (*solar constant*) και ισούται με $1353 W/m^2$.



Σχήμα 5: Το μήκος της απόστασης σε μονάδες αέριας μάζας εξαρτάται από την ζενίθια γωνία

Η ηλιακή ακτινοβολία εξασθενεί, όταν περάσει την ατμόσφαιρα της γης. Επομένως, η κατανομή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζεται από την εξασθένιση, για αυτό το λόγο οι μετρήσεις στην επιφάνεια της γης παρουσιάζουν μεταβλητά φάσματα. Η σημαντικότερη παράμετρος της εξασθένισης είναι η απόσταση που πρέπει να διανύσει το φως σε συνθήκες καθαρού ουρανού μέσα από την ατμόσφαιρα. Ως βέλτιστη αέρια μάζα (*optical air mass*) ονομάζεται η αναλογία της πραγματικής απόστασης που πρέπει να διανύσει το φως ως προς την ελάχιστη.

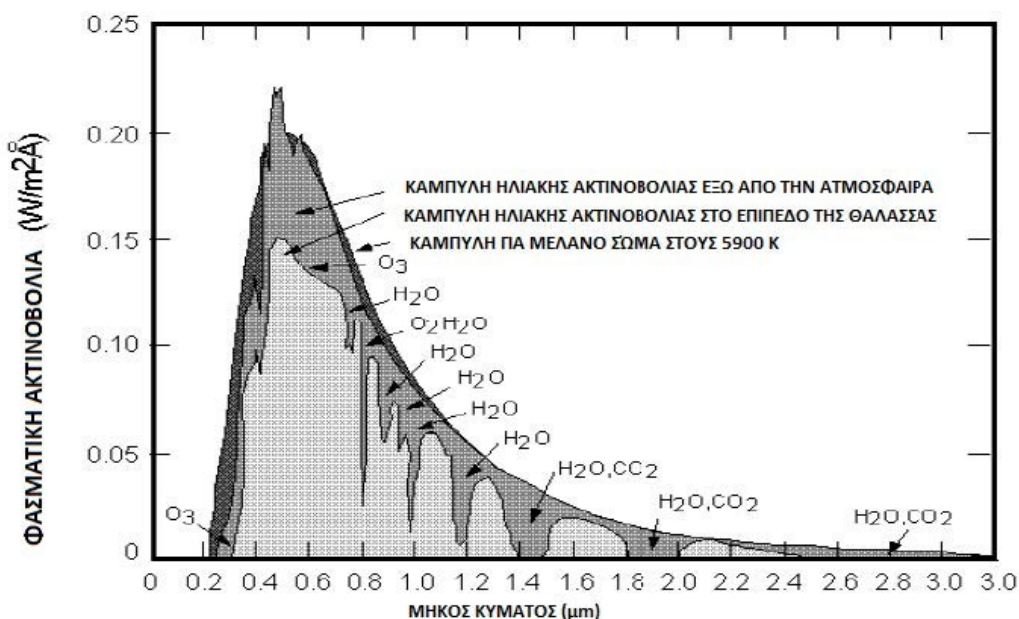


Σχήμα 6: Εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα και οι παράγοντες που την επηρεάζουν

Όταν ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία θ από την κατακόρυφο στο επίπεδο του γήινου παρατηρητή, τότε η αέρια μάζα χαρακτηρίζεται από τον τύπο:

$$AirMass = \cos(\vartheta)^{-1} \quad (4)$$

Ως *AM0* ορίζεται το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, το οποίο ισούται με την ηλιακή σταθερά. Ο όρος *AM1* αναφέρεται στην περίπτωση που ο ήλιος βρίσκεται κατακόρυφα από το επίπεδο της γης, και ως *AM1.5* ορίζεται ένα τυπικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, όταν ο ήλιος βρίσκεται στις 48.2°. Η εξασθένιση κατά *AM1.5* ισούται με $827W/m^2$, αλλά επικράτησε ως πρότυπη τιμή τα $1000W/m^2$ για την σχεδίαση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.



Σχήμα 7: Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εντός και εκτός της ατμόσφαιρας

Κύριο λόγος της εξασθένισης και της διασκόρπισης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι τα αέρια σωματίδια, τα σωματίδια σκόνης και άλλα αερολύματα στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, οι ατμοί, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα προκαλούν απορρόφηση, η οποία όμως είναι επιλεκτική ως προς τα μήκη κύματος, για αυτό το λόγο παρατηρούνται κενά στην κατανομή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Το όζον απορροφά μήκη κύματος κάτω των $0.3 \mu m$, εμποδίζοντας την υπεριώδη ακτινοβολία από τις αρνητικές επιπτώσεις της στους έμβιους οργανισμούς, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα παρεμποδίζει την υπέρυθη ($\lambda > 1 \mu m$), που προκαλεί κλιματικές αλλαγές.

2 Ημιαγωγοί

2.1 Ημιαγωγοί

Στη σημερινή εποχή, για την απορρόφηση των φωτονίων από την συντριπτική πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία φορέων φορτίου και τον επακόλουθο διαχωρισμό τους, χρησιμοποιούνται ημιαγωγά υλικά. Ένας ημιαγωγός διαθέτει δύο δρόμους τους οποίους μπορούν να κινηθούν τα ηλεκτρικά φορτία. Πρώτον, έχει το συνηθισμένο δρόμο που ακολουθούν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στη ζώνη αγωγιμότητας. Δεύτερο, διαθέτει τον ασυνήθιστο δρόμο της ζώνης σθένους, που ακολουθούν οι οπές. Τα ημιαγωγά στρώματα είναι το πιο σημαντικό τμήμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και αποτελούν την καρδιά του συστήματος.

Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το πυρίτιο (*Si*) και το γερμάνιο (*Ge*), καθώς και χημικές ενώσεις με τετραεδρική δομή, όπως το θειούχο κάδμιο (*CdS*) ή το αρσενιο-ύχο γάλλιο (*GaAs*). Η αγωγή του ρεύματος στους ημιαγωγούς διευκολύνεται όταν αυτοί δεν χρησιμοποιούνται σε καθαρή μορφή αλλά νοθευμένοι.

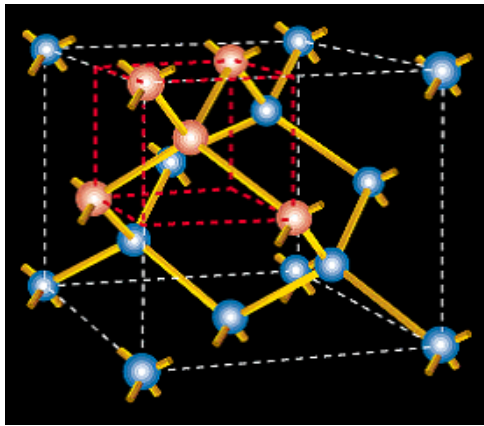
Οι ημιαγωγοί (*Semiconductors*) αποτελούν υλικά, που διαθέτουν μικρότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα, από τους αγωγούς, αλλά μεγαλύτερη από τους μονωτές. Η χρυσταλλική φύση τους σημαίνει την συσχέτιση των ατόμων με τον περιοδικό πίνακα. Αυτή η περιοδικότητα, σε συνδυασμό με τις ατομικές ιδιότητες των στοιχείων, είναι οι κύριοι λόγοι για τις ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών.

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te

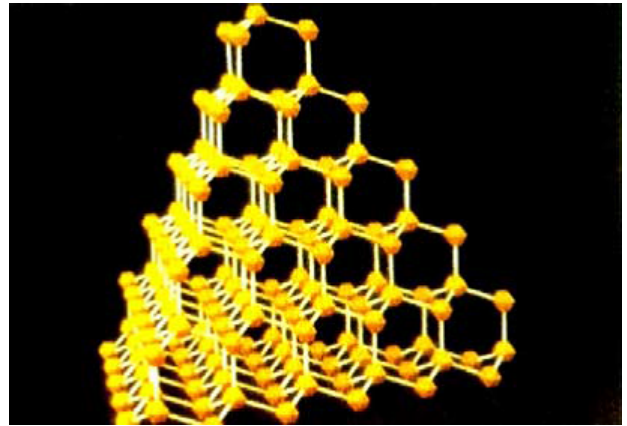
Σχήμα 8: Περιοδικός Πίνακας

Το πυρίτιο που είναι ένα υλικό σε αφθονία στη Γη, για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται από το 1950 στα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Από το Σχήμα 8, παρατηρούμε ότι το πυρίτιο βρίσκεται στην στήλη *IV*, διαθέτοντας στη ζώνη σθένους του 4 ηλεκτρόνια, που μπορεί να μοιραστεί με γειτονικά άτομα, ώστε να σχηματιστούν ομοιοπολικοί δεσμοί.

Ο ατομικός αριθμός του πυριτίου είναι 14, κάτι που σημαίνει ότι 14 ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας σε ένα άτομο πυριτίου υπάρχουν 4 ηλεκτρόνια σθένους. Τα ηλεκτρόνια σθένους δημιουργούν δεσμούς με άλλα άτομα πυριτίου. Οι δεσμοί που δημιουργούνται είναι ομοιοπολικοί για αυτό το λόγο κάθε άτομο πυριτίου μπορεί να σχηματίσει δεσμούς με άλλα 4 άτομα πυριτίου.



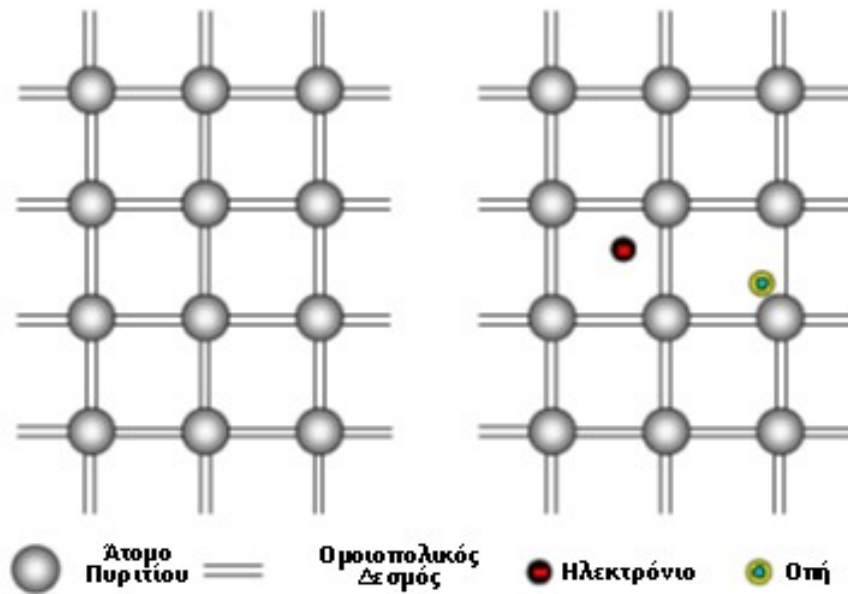
(α')



(β')

Σχήμα 9: (α) Στοιχειώδης κυψελίδα μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε μορφή κρυσταλλικού πλέγματος διαμαντιού (β) Η ατομική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων πυριτίου είναι δεσμευμένα στους ομοιοπολικούς δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει μόνο στην ιδανική κατάσταση ελάχιστης ενέργειας ($0^{\circ}K$) όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι δεσμοί αυτοί σπάνε, λόγω της απορρόφησης θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια προκαλεί την διέγερση ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε δεσμούς και ταυτόχρονα το σπάσιμο του δεσμού αυτού. Μέσω αυτής της διαδικασίας εμφανίζονται στο κρυσταλλικό πλέγμα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές.



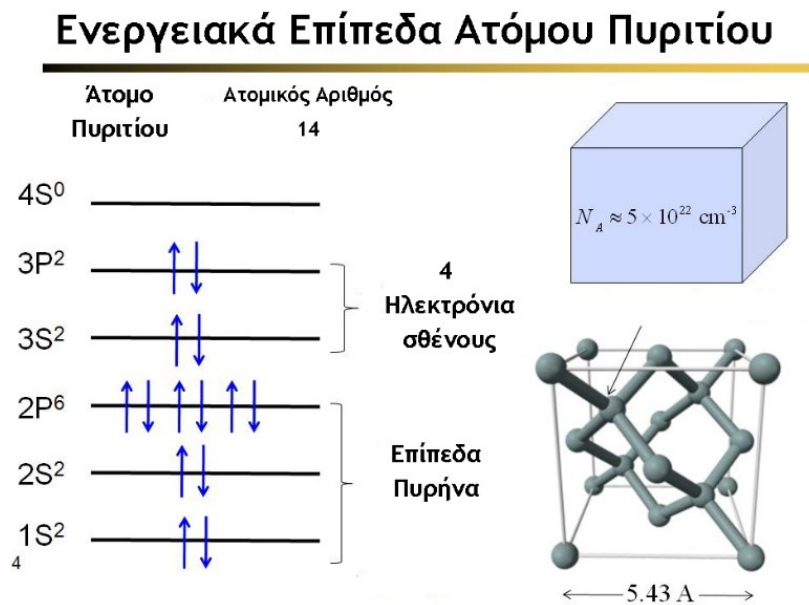
Σχήμα 10: Το μοντέλο δεμών κρυσταλλικού πυριτίου $c - Si$ (Αριστερά: Όλα τα άτομα πυριτίου είναι δεσμευμένα. Δεξιά: Σπάσιμο δεσμού ατόμων πυριτίου)

Οι οπές λειτουργούν σαν παγίδες δέσμευσης για όσα ηλεκτρόνια έχουν χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Αλλά ακόμη και αν δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή γύρω από την

οπή, δεν σημαίνει ότι η κενή θέση μένει αμετακίνητη, καθώς μπορεί να προσελκύσει κάποιο ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού δεσμού. Οι οπές διαγράφουν και αυτές μια άτακτη κίνηση στο σώμα, από ένα δεσμό στον άλλο, αφού είναι τυχαία η κατεύθυνση από την οποία θα έρθει το γειτονικό ηλεκτρόνιο που θα συμπληρώνει τον ατελή δεσμό. Όταν όμως επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο, το ηλεκτρόνιο θα προσέλθει από την κατεύθυνση που ευνοείται ενεργειακά. Τότε η κίνηση των οπών είναι προσανατολισμένη και αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς υψηλότερα δυναμικά.

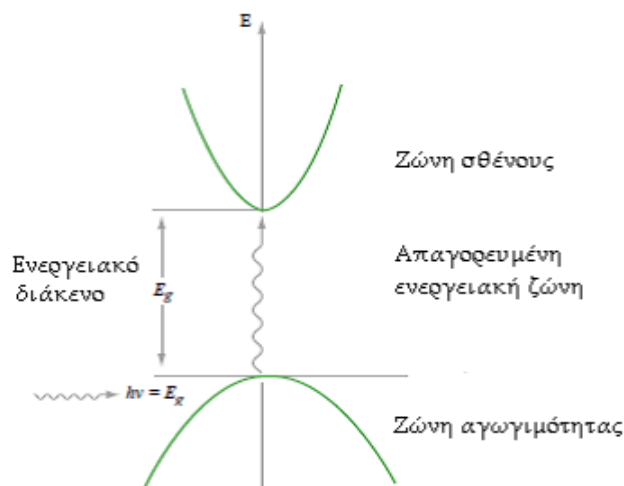
Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από την θερμική ενέργεια. Όταν η ενέργεια τους μειωθεί σημαντικά, δεσμεύονται στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού, που μπορεί να συναντήσουν στον δρόμο τους και παύουν να είναι ελεύθερα. Κατά συνέπεια ο ημιαγωγός διαθέτει πλέον ευκίνητους φορείς ηλεκτρισμού, οι οποίοι και του προσδίδουν αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Σε ένα μεμονωμένο άτομο, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται γύρω από τον πυρήνα και οι ενέργειές τους είναι κβαντισμένες, μπορεί δηλαδή να έχουν μόνο μια συγκεκριμένη διακριτή τιμή E_n ($n=1,2,3,\dots$). Κάθε ομάδα χωριστών ενεργειακών σταθμών ονομάζεται ενεργειακή ζώνη (*energy band*). Οι ζώνες διαχωρίζονται μεταξύ τους από ενεργειακά διάκενα (*energy gap*), δηλαδή απαγορευμένες τιμές ενέργειας στις οποίες δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθεροι φορείς.



Σχήμα 11: Κρυσταλλική δομή ατόμου πυριτίου

Η ζώνη που είναι πλήρως καλυμμένη ονομάζεται ζώνη σθένους (*valence band*) και τα ηλεκτρόνια δεν συμμετέχουν στην αγωγιμότητα του υλικού, αφού δεν διαθέτει ελεύθερες ενεργειακές θέσεις, που μπορούν να καταληφθούν. Η πρώτη κενή ή μερικώς πληρωμένη ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας (*conduction band*) και είναι υπεύθυνη για την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος στον ημιαγωγό.

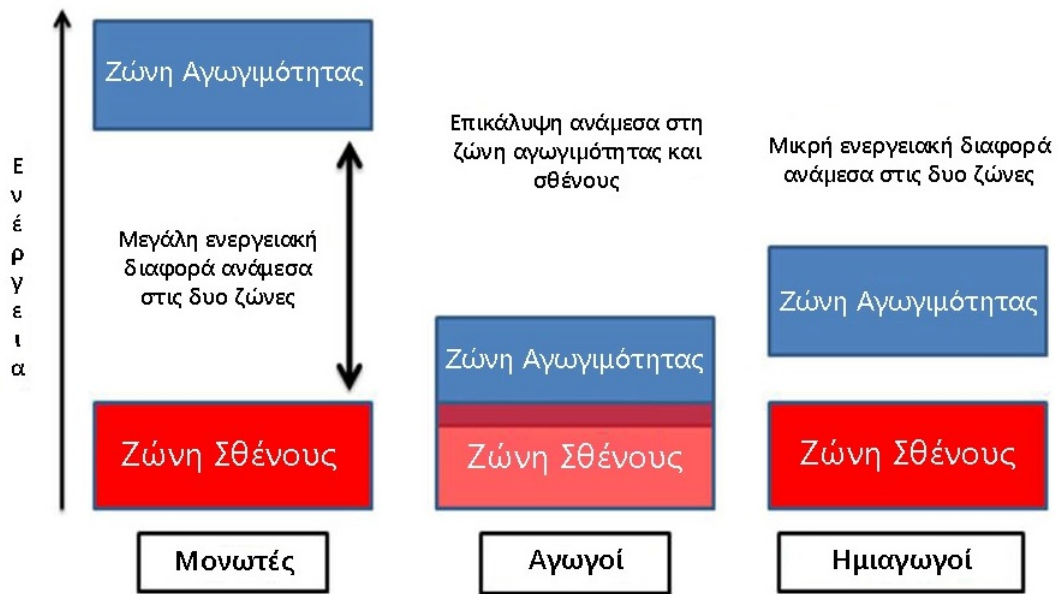


Σχήμα 12: Αναπαράσταση ενεργειακών ζώνων και του ενεργειακού διαύκωνου

Στους ηλεκτρικούς αγωγούς είτε η ζώνη σθένους είναι μερικώς συμπληρωμένη με ηλεκτρόνια, είτε οι ζώνες σθένους και αγωγιμότητας αλληλεπικαλύπτονται μεταξύ τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν υπάρχει ενεργειακό χάσμα ανάμεσα στις δύο ζώνες και συνεπώς η μετάβαση των ηλεκτρονίων μπορεί να γίνει πιο εύκολα.

Αν η ζώνη σθένους είναι συμπληρωμένη και υπάρχει μεγάλο ενεργειακό διάκενο μεταξύ αυτής και της κενής ζώνης αγωγιμότητας, τότε τα ηλεκτρόνια δεν είναι δυνατόν να μεταπηδήσουν στην άδεια ζώνη αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να μην καθίσταται δυνατή η αγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και το υλικό να παρουσιάζεται σαν μονωτής.

Οι ημιαγωγοί είναι βασικά μονωτές με μικρό ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στην ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγής. Λόγου του μικρού ενεργειακού διαύκωνου, με την αύξηση της θερμοκρασίας είναι δυνατόν ηλεκτρόνια να διεγερθούν και να μεταπηδήσουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγής. Έτσι, το υλικό συμπεριφέρεται σαν μονωτής στις χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ η αγωγιμότητα του αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, αφού ολοένα και περισσότερα ηλεκτρόνια αποκτούν την απαραίτητη ενέργεια, ώστε να προωθηθούν στην ζώνη αγωγής.

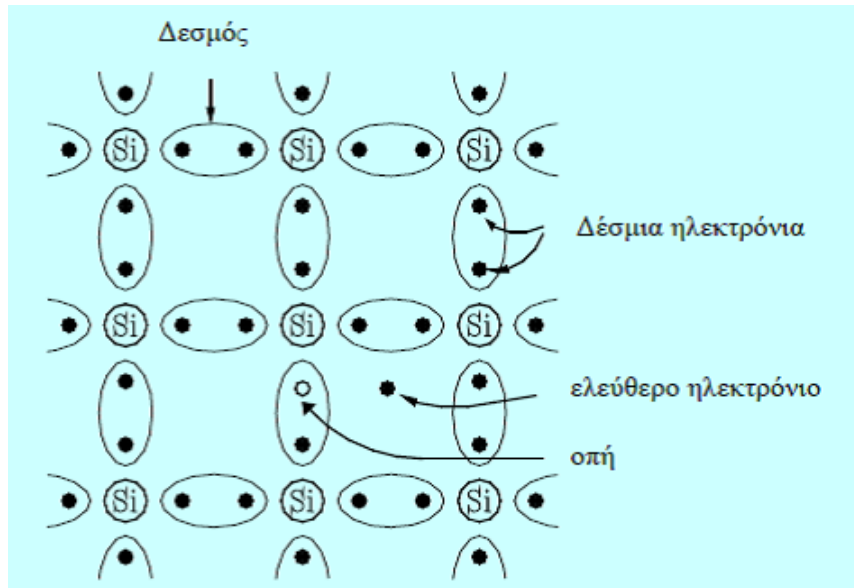


Σχήμα 13: Ενεργειακές ζώνες και ενεργειακές στάθμες ενός χρυσταλλικού υλικού

2.1.1 Κατηγορίες ημιαγωγών

Ενδογενείς ημιαγωγοί

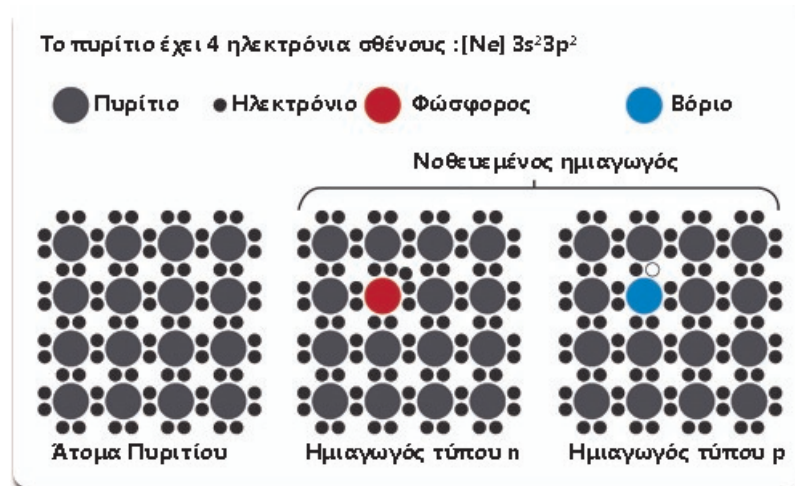
Ενδογενείς (*intrinsic semiconductors*) ονομάζονται οι ημιαγωγοί που δεν έχουν προσμείξεις. Κατά ακολουθία δεν υπάρχουν φορείς φορτίου στους 0K. Αν η θερμοκρασία αυξηθεί, θα υπάρξουν φορείς λόγω θερμικής διέγερσης, δηλαδή ηλεκτρόνια που θα αποκτήσουν αρκετή ενέργεια λόγω θερμότητας, ώστε να μεταπηδήσουν στην ζώνη αγωγής αφήνοντας ταυτόχρονα ένα κενό (οπή) στη ζώνη σθένους. Αυτό συνεπάγεται, ότι το πλήθος n των ηλεκτρονίων και το πλήθος p των οπών θα είναι ίδιο για τους ενδογενείς ημιαγωγούς.



Σχήμα 14: Κρυσταλλική δομή ενδογενούς ημιαγωγού

Εξωγενείς ημιαγωγοί

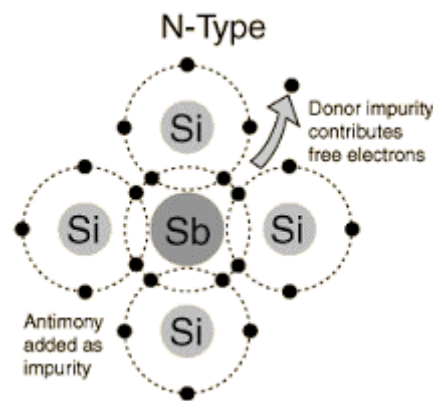
Εκτός από την αύξηση της αγωγιμότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας, η αγωγιμότητα των ημιαγωγών μπορεί να αυξηθεί και από την προσθήκη κατάλληλων προσμίξεων στο πλέγμα του ενδογενή ημιαγωγού. Οι προσμίξεις τοποθετούνται ανάμεσα στην ζώνη σθένους και αγωγής και δημιουργούν την ζώνη νόθευσης (*donor band*), καλύπτοντας έτσι το ενεργειακό διάκενο μεταξύ των δύο ζωνών του ημιαγωγού. Η ζώνη που παρεμβάλλεται λειτουργεί ως γέφυρα που ενώνει τις ζώνες σθένους και αγωγής, επιτρέποντας τη μετακίνηση ηλεκτρονίων και συνεπώς την εμφάνιση αγωγιμότητας. Οι ημιαγωγοί αυτού του είδους ονομάζονται εξωγενείς ημιαγωγοί ή ημιαγωγοί πρόσμιξης (*doped semiconductors*).



Σχήμα 15: Κρυσταλλική δομή εξωγενούς ημιαγωγού

Ημιαγωγοί τύπου n

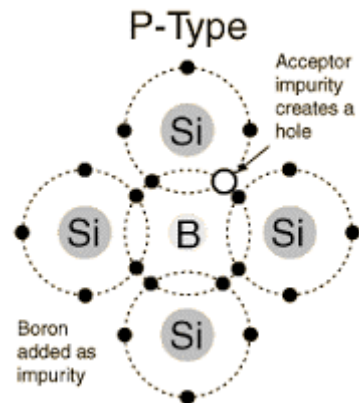
Για την δημιουργία ενός ημιαγωγού τύπου n (*negative*), απαιτείται η προσθήκη μιας ελάχιστης ποσότητας ενός στοιχείου της 5ης ομάδας του Περιοδικού Πίνακα. Τέτοια στοιχεία είναι ο Φώσφορος, το Αρσενικό, το Αντιμόνιο κ.ά.. Πιο αναλυτικά, για κάθε άτομο πρόσμιξης τα τέσσερα εξωτερικά ηλεκτρόνια του πυριτίου συμμετέχουν σε δεσμούς με γειτονικά άτομα, ενώ το πέμπτο παραμένει χωρίς κάποια ένωση. Αυτό το ηλεκτρόνιο, αποσπάται από το άτομο και κινείται ελεύθερα, όταν λάβει την ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να προσλάβει. Μάλιστα, αυτό το ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει στην ζώνη αγωγιμότητας απαιτείται πολύ μικρότερο ποσό ενέργειας από ότι στην περίπτωση του καθαρού ημιαγωγού. Επειδή με αυτή τη διαδικασία τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αποτελούν την πλειοψηφία και επειδή είναι φορείς αρνητικού φορτίου, για αυτό το λόγο ο ημιαγωγός λέγεται τύπου n . Τέλος, το στοιχείο πρόσμιξης ονομάζεται δότης.



Σχήμα 16: Δημιουργία ημιαγωγού τύπου n

Ημιαγωγοί τύπου p

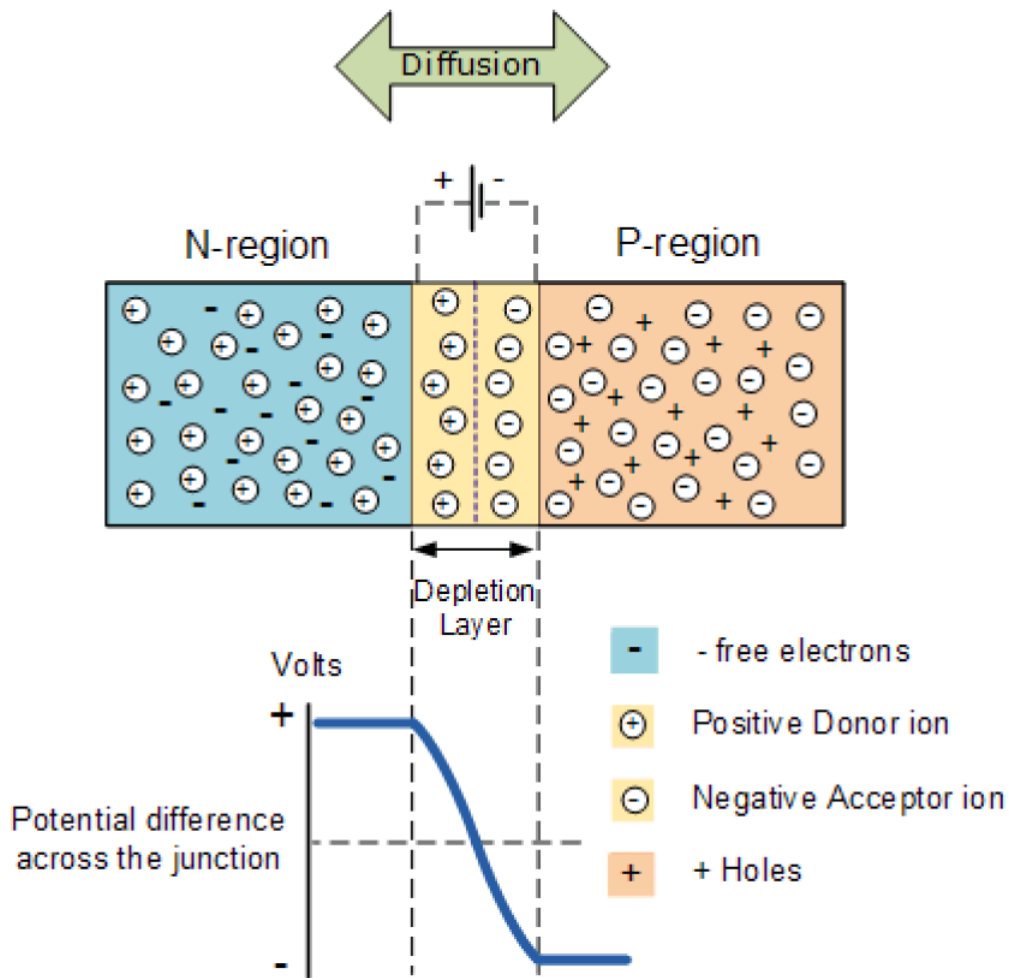
Στην περίπτωση πρόσμιξης του πυριτίου με τρισθενή άτομα, όπως το Βόριο (B), τότε θα προκύψει η χρυσταλλική δομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Τα τρία ηλεκτρόνια δεν επαρκούν για να σχηματιστούν τέσσερις δεσμοί με το πυρίτιο, επομένως δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς. Με αυτή τη διαδικασία εμφανίζονται τόσες οπές, όσα και τα άτομα πρόσμιξης, που επειδή έχουν την δυνατότητα να δεχτούν ηλεκτρόνιο στη θέση της οπής, λέγονται άτομα αποδέκτη.



Σχήμα 17: Δημιουργία ημιαγωγού τύπου p

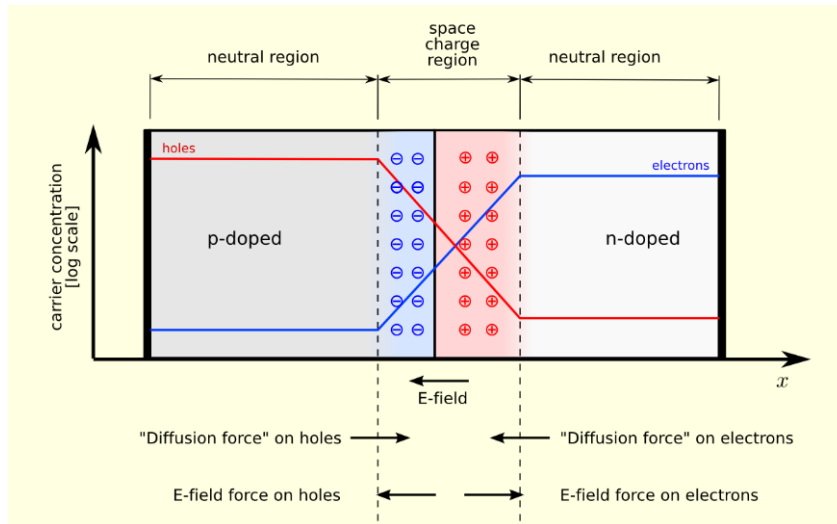
2.1.2 Επαφή τύπου $p - n$

Η χρήση των ημιαγωγών, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία, δεν οφείλεται στην καθ' αυτήν δημιουργία των ηλεκτρονίων ή των οπών (φορείς αγωγιμότητας), όπως περιεγράφηκε παραπάνω, αλλά στη διάχυση των φορέων όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n . Κατά την επαφή αυτή δημιουργείται η επαφή $p - n$ ($p - n$ junction), η οποία ουσιαστικά συνιστά την περιοχή κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια των δυο ημιαγωγών. Η ηλεκτρική διάταξη που αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου n σε επαφή με έναν ημιαγωγό τύπου p , τα άκρα των οποίων φέρουν ηλεκτρικές συνδέσεις, καλείται δίοδος ημιαγωγού (*semiconductor diode*).



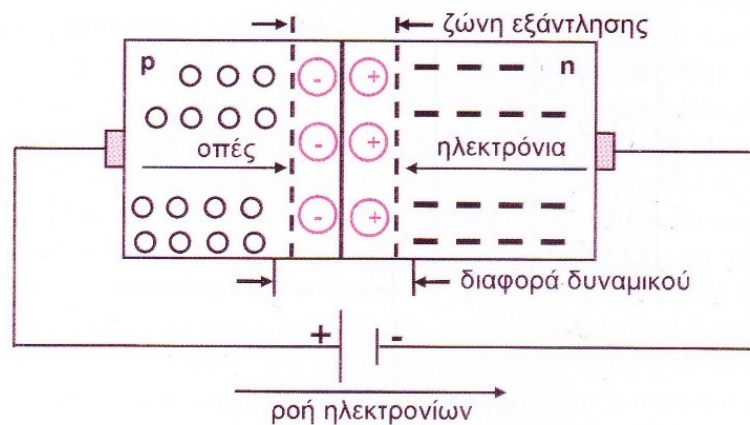
Σχήμα 18: Σχηματισμός της επαφής $p - n$ και οι ιδιότητες της

Κατά την επαφή των δυο ημιαγωγών ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n , όπου οι οπές είναι πολύ λιγότερες, ενώ παράλληλα ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p , όπου τα ηλεκτρόνια είναι λιγότερα. Οι μετακινήσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα, να αλλάξει δραματικά η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των οπών στην διαχωριστική επιφάνεια των δυο τμημάτων, η οποία και καλείται ζώνη εξάντλησης (*depletion layer*). Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 19, όταν επέλθει ισορροπία, οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων στην περιοχή εξάντλησης είναι δραματικά μικρότερες σε σύγκριση με εκείνες των ημιαγωγών p και n .



Σχήμα 19: Επαφή $p - n$ σε ισορροπία

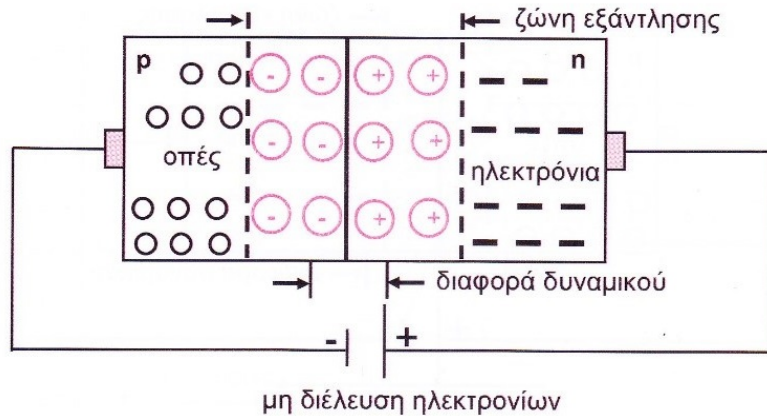
Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών προς τα τμήματα p και n αντίστοιχα, έχει ως αποτέλεσμα οι πλευρές της ένωσης να φορτίζονται θετικά και αρνητικά και το υλικό να χάνει στο σημείο επαφής την ηλεκτρική ουδετερότητα και παράλληλα να εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού στην περιοχή της ζώνης εξάντλησης. Αυτή η διαφορά δυναμικού εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των ηλεκτρονίων και οπών, επομένως η επαφή $p - n$ παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 20: Ορθή πόλωση διόδου $p - n$ (-: ηλεκτρόνια, ο: οπές, \oplus : θετικά ιόντα, \ominus : αρνητικά ιόντα)

Υπάρχουν δυο τρόποι επιβολής τάσεως σε μια διόδο $p - n$. Ο πρώτος είναι να επιβληθεί στην διόδο ορθή πόλωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 20. Αυτό σημαίνει ότι ο αρνητικός πόλος της πηγής πρέπει να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n και ο θετικός με το τμήμα τύπου p . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην εμποδίζεται η ροή των ηλεκτρονίων, τα οποία κινούνται από τον αρνητικό πόλο της πηγής προς την περιοχή της επαφής $p - n$, όπου συνδέονται με τις οπές που δημιουργούνται κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής. Η επαφή $p - n$ παρουσιάζει αντίσταση στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, όταν επιβληθεί αντίστροφη πόλωση. Στην αντίστροφη πόλωση ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με το τμήμα p , θετικός με το τμήμα τύπου n ,

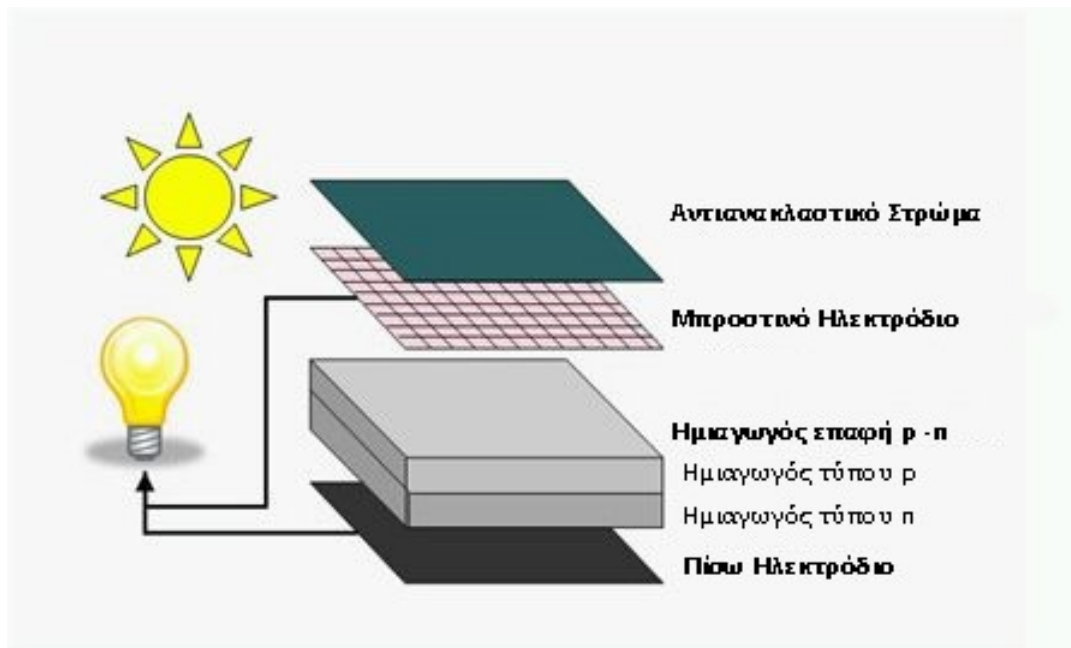
αποτέλεσμα να έχουμε απομάκρυνση ηλεκτρονίων από το τμήμα n προς το θετικό πόλο, όσο και επανασύνδεση των ηλεκτρονίων που έρχονται από την πηγή με τις οπές του τμήματος p . Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση των ηλεκτρονίων και των οπών στις δυο πλευρές της ένωσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά ο αριθμός των θετικών και αρνητικών ιόντων εκατέρωθεν της ένωσης. Ως τελικό αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι τα φορτισμένα ιόντα να δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο προβάλλει μεγάλη αντίσταση στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 21: Αντίστροφη πόλωση διόδου $p - n$ (-: ηλεκτρόνια, ο: οπές, \oplus : θετικά ιόντα, \ominus : αρνητικά ιόντα)

2.2 Τρόπος λειτουργίας φωτοβολταϊκής κυψέλης

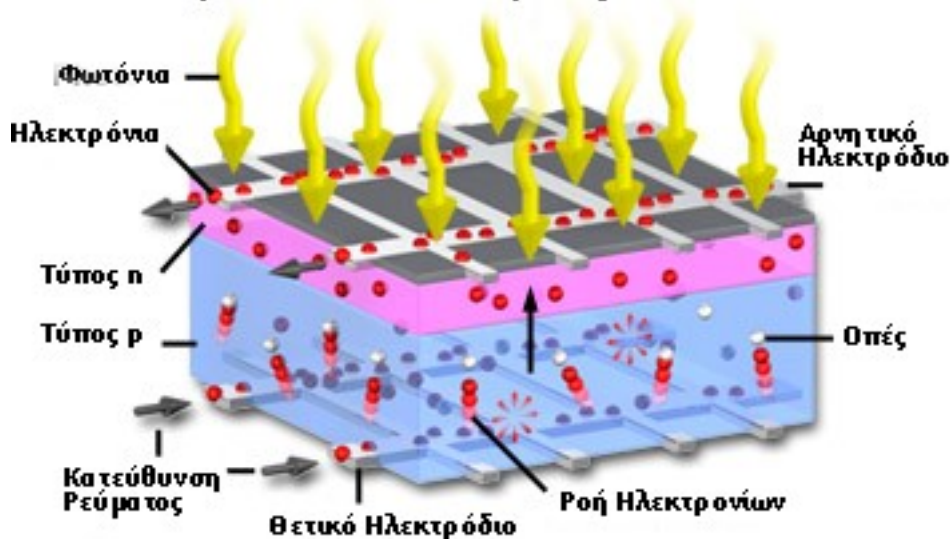
Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο απαρτίζεται από μια δίοδο, η οποία προστατεύεται από το εξωτερικό περιβάλλον. Η προστασία αυτή πρέπει να είναι κάποιο πολύ λεπτό στρώμα ($0.5 \mu m$), ώστε τα φωτόνια να μπορούν να φτάσουν στον ημιαγωγό. Ακόμα, υπάρχουν ηλεκτρόδια που μειώνουν την εσωτερική αντίσταση του συστήματος. Το ηλεκτρόδιο στην μπροστινή πλευρά δεν πρέπει να καλύπτει το φωτοβολταϊκό στοιχείο, παρά μόνο ένα μικρό τμήμα. Τέλος, μια ανταντανακλαστική επίστρωση βοηθά στην καλύτερη απορρόφηση του ηλιακού φάσματος, μηδενίζοντας την ανάκλαση του φωτός.



Σχήμα 22: Τυπική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το τμήμα του ημιαγωγού αποτελείται από μια λεπτή επιφάνεια τύπου n , νοθευμένη, που ονομάζεται εκπομπός, στην οποία εισέρχονται αρχικά τα φωτόνια. Στη συνέχεια, ο ημιαγωγός αποτελείται από ένα στρώμα μεγαλύτερου πάχους τύπου p , που απορροφάτε όσο δυνατόν περισσότερη ακτινοβολία. Τέλος, στα ηλεκτρόδια συλλέγεται και ρέει το ρεύμα.

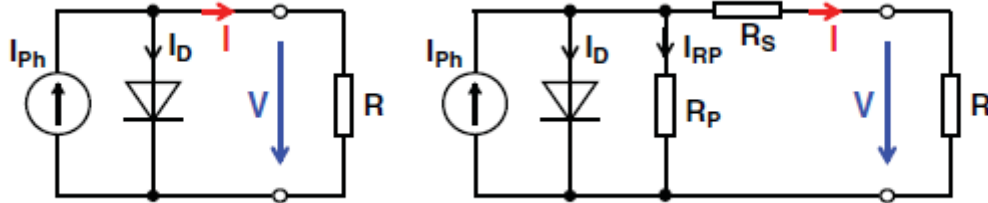
Ηλεκτρόνια και Ροή Ρεύματος σε Ηλιακά Κελιά



Σχήμα 23: Τυπική δομή φωτοβολταϊκού κελιού και ροή ρεύματος

2.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που δεν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από έναν τυπικό ημιαγωγό, στον οποίο ρέει ηλεκτρικό ρεύμα από τον ημιαγωγό τύπου p στον τύπου n , εάν η τάση είναι από το p προς n στη δίοδο. Όταν η δίοδος εκτεθεί στο φως, τότε παράγεται φωτορεύμα I_{Ph} , το οποίο είναι ανάλογο της ακτινοβολίας G και ρέει από την πλευρά n στην πλευρά p . Αυτή η σύμβαση μπορεί να αναπαρασταθεί σαν ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα με μια ιδανική πηγή ρεύματος I_{Ph} και μια δίοδο. Για λόγους πληρότητας μπορούμε να προσθέσουμε αντιστάσεις σε σειρά R_S και παράλληλα R_P .



Σχήμα 24: Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ισοδύναμου κυκλώματος για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο

Όταν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, ένα ρεύμα εξισορρόπησης ρέει συνεχώς στο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου, και έτσι λαμβάνει χώρα η εξής διαδικασία: ένα φωτορεύμα ίσο με I_{Ph} από την πλευρά n προς την πλευρά p (λόγω της επίδρασης της τάσης του ανοιχτού κυκλώματος V_{OC}) ρέει μέσω της διόδου από την πλευρά p στην πλευρά n , ως ρεύμα I_D .

Η μαθηματική εξίσωση που ορίζει το ρεύμα I στην απλοποιημένη μορφή του ισοδύναμου κυκλώματος (χωρίς τις αντιστάσεις) ως παράγοντας της τάσης V είναι η εξής:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{eV}{nkT}} - 1 \right) = I_{Ph} - I_D \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (5)$$

Όπου,

I_{Ph} = φωτορεύμα = ρεύμα βραχυκυκλώματος του απλοποιημένου κυκλώματος

I_D = ρεύμα κορεσμού που ρέει στην αντίθετη κατεύθυνση, και αυξάνεται εκθετικά με την άνοδο της θερμοκρασίας.

Αναπτύσσοντας την εξίσωση 5 μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου στο απλοποιημένο κύκλωμα. Επομένως,

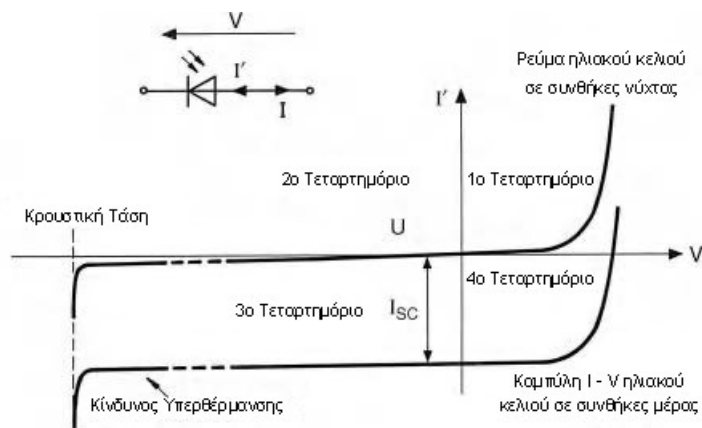
$$V = \frac{nkT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{Ph} - I}{I_S} \right) = V_T \ln \left(1 + \frac{I_{Ph} - I}{I_S} \right) \quad (6)$$

Όταν έχουμε $I = 0$, μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση του ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} :

$$V_{OC} = \frac{nkT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{Ph} - I}{I_S} \right) = V_T \ln \left(1 + \frac{I_{Ph} - I}{I_S} \right) \approx V_T \ln \left(\frac{I_{Ph}}{I_S} \right) \quad \text{for } I_{Ph} \gg I_S \quad (7)$$

2.4 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν βρίσκεται στο σκοτάδι, τότε δεν παράγει ρεύμα I_{Ph} , επομένως το ρεύμα της διάταξης είναι μόνο το ρεύμα της διόδου. Η χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου που δέχεται ακτινοβολία έχει την ίδια μορφή με την αντίστοιχη καμπύλη χωρίς ακτινοβολία, μετατοπισμένη όμως κατά I_{SC} (ρεύμα βραχυκύκλωσης), κατά την αρνητική διεύθυνση. Το ηλιακό κελί καταναλώνει ενέργεια στα τεταρτημόρια 1 και 3, ενώ παράγει ενέργεια όταν βρίσκεται στο 4^ο (Σχήμα 25), η οποία είναι η πιο σημαντική φάση για την μελέτη των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

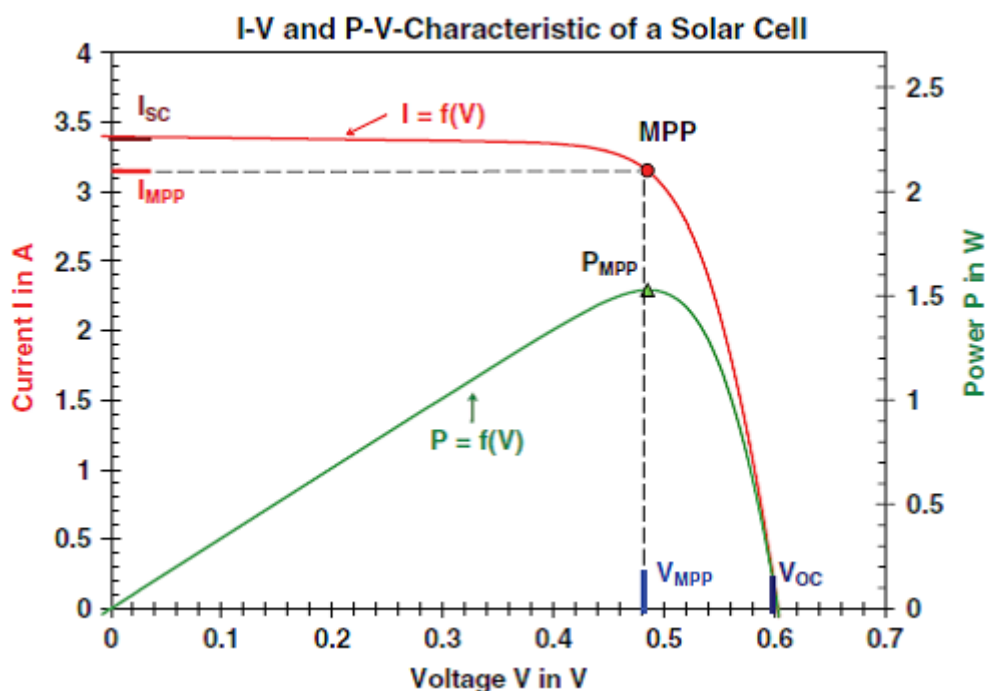


Σχήμα 25: Χαρακτηριστική καμπύλη $I = f(V)$ για ένα ηλιακό κελί

Το σχήμα 25 παρουσιάζει την χαρακτηριστική καμπύλη $I = f(V)$ για ένα ηλιακό κελί. Σε χαμηλές τιμές της τάσης του ρεύματος, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συμπεριφέρονται σαν ιδανικές πηγές ρεύματος. Όμως, καθώς η τάση πλησιάζει την τάση ενός ανοικτού κυκλώματος V_{OC} , το ρεύμα μειώνεται σχεδόν κατακόρυφα. Η ενέργεια αποτελεί τον κύριο παράγοντα για την σχεδίαση των ηλιακών κελιών. Ο τύπος της ισχύς ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δίνεται από την σχέση:

$$P = V * I \quad (8)$$

Υπολογίζοντας μέσω της καμπύλης $I = f(V)$ το ρεύμα, έχουμε την καμπύλη $P = f(V)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 26. Στο σημείο *MPP* (*maximum power point*) ένα ηλιακό κελί φτάνει την μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει. Για την βελτιστοποίηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, προσπαθούμε να επιτύχουμε την λειτουργία των στοιχείων κοντά σε αυτό το σημείο. Αυτό δεν είναι πάντα εύκολο λόγω παραγόντων όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, οι κατασκευαστικές ανοχές κ.ά.. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για αυτή τη εργασία ονομάζεται ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος (*maximum power point tracker*).



Σχήμα 26: Χαρακτηριστική $I - V$, $P - V$ και τα μεγέθη μέγιστης ισχύος ϕ/β στοιχείου

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει ένα ηλιακό κελί είναι πάντα μικρότερη από το γινόμενο του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{SC} με την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} . Ένα σημαντικό παράγοντας σύγκρισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ο παράγοντας πλήρωσης (*Fill Factor*, FF). Η σχέση που δίνει τον παράγοντα είναι:

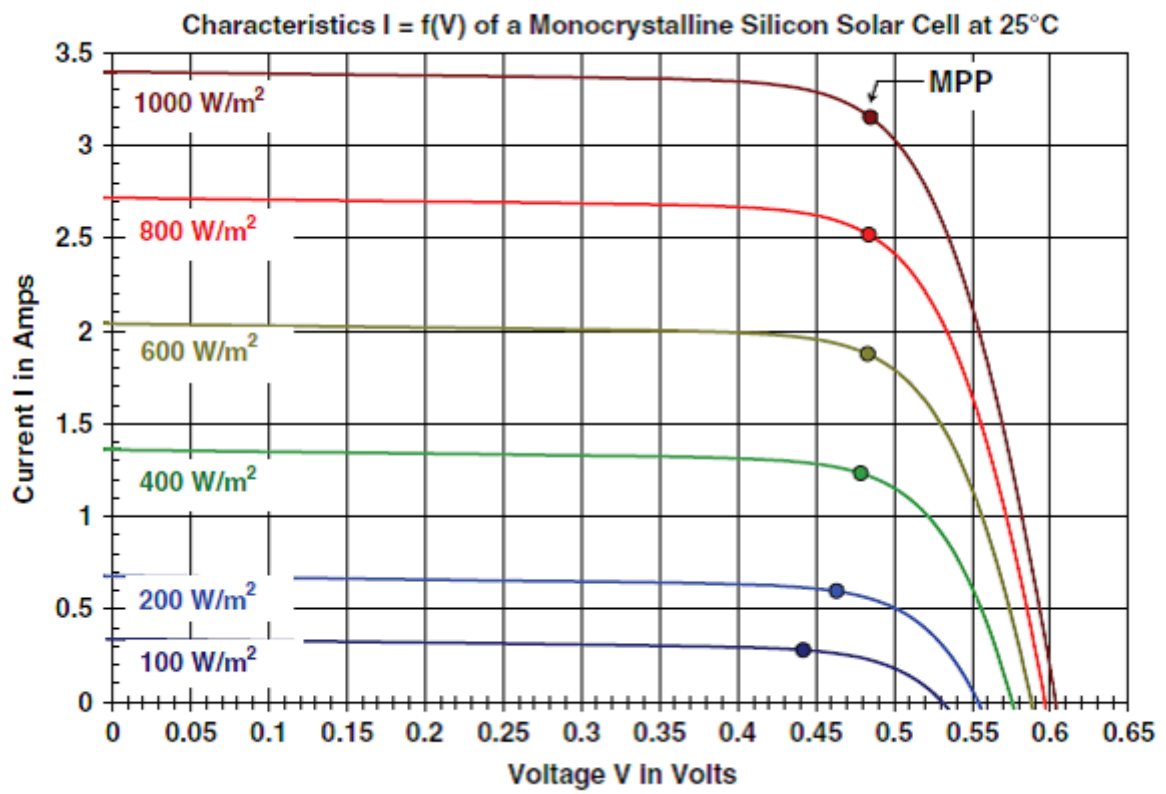
$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (9)$$

Ο παράγοντας πλήρωσης για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου κυμαίνεται στο 60% με 80%, ενώ για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των εργαστηρίων είναι στο 85%.

Ως συντελεστής απόδοσης ενός ηλιακού κελιού η ορίζεται το ηλίκο της μέγιστης ισχύος (P_{max}) προς το γινόμενο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G) με την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου (A).

$$\eta = \frac{P_{max}}{G * A} \quad (10)$$

Τέλος, σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος που αλλάζουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες όταν επιδρά στο ηλιακό κελί η ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Αρχικά, πρέπει να λάβουμε υπόψιν ότι το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι εκθετικά ανάλογο της ακτινοβολίας, αντιθέτως η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνεται ελάχιστα με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι η τάση ενός φωτοβολταϊκού κελιού μπορεί να είναι μεγάλη ακόμα και αν δεν επικρατεί ηλιοφάνεια, κάτι που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στην τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων (Σχήμα 27).



Σχήμα 27: Χαρακτηριστικές $I-V$ σε συνάρτηση με την ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

3 Κατηγοριοποίηση Φ/Β Στοιχείων

3.1 Κρυσταλλικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία (c-Si)

3.1.1 Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (sc-Si)

Τα ηλιακά κελιά από φέτες πυριτίου είναι ο παλαιότερος τύπος ηλιακών κελιών καθώς αναπτύχθηκε κατά το 1950 από την εταιρεία *Bell Laboratories* για διαστημικές εφαρμογές. Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο που δημιουργήθηκε το 1953 είχε απόδοση 6%, αλλά το 1958 τα 108 ηλιακά κελιά του διαστημόπλοιου “*Vanguard 1*” πέτυχαν απόδοση 10.5%. Στην σημερινή εποχή οι αποδόσεις αυτού του τύπου των φωτοβολταϊκών στοιχείων κυμαίνονται στα ~25% σε εργαστηριακά επίπεδα και στα ~15% σε βιομηχανικές συνθήκες.



Σχήμα 28: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

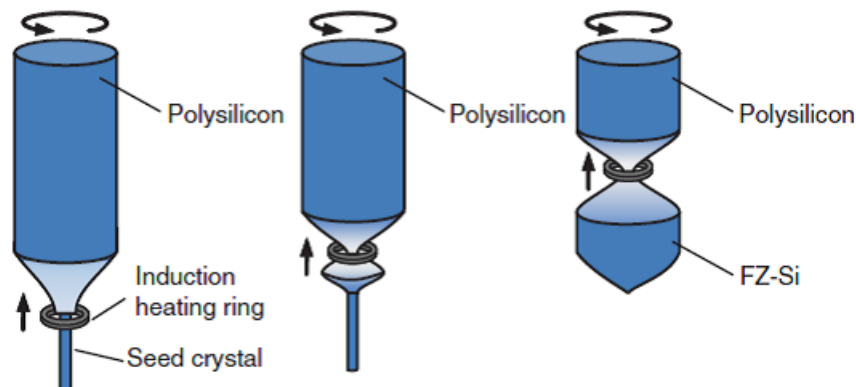
Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (*monocrystalline silicon* ή *sc-Si*) αποτελείται από μια ομοιόμορφη μοριακή δομή και συγκρινόμενο με άλλα υλικά που δεν παρουσιάζουν δομή κρυστάλλου, παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση λόγω της υψηλής του ομοιομορφίας. Η κύρια διαδικασία που ακολουθείται για την παραγωγή του είναι η μέθοδος *Czochralski* (*CZ process* ή *CZ – Si*). Η μέθοδος αυτή είναι η κυρίαρχη στην παραγωγή μονοκρυσταλλικών ηλιακών κελιών.

Κατά την διαδικασία αυτή αρχικά γίνεται τήξη πολυκρυσταλλικού πυριτίου στους 1400°C . Στη συνέχεια, μέσω ενός κρυστάλλου πολυπυριτίου (*seed crystal*) που βυθίζεται στην επιφάνεια του λιωμένου πυριτίου, ωθείται προς τα πάνω με αργή κατακόρυφη και περιστροφική κίνηση ταυτόχρονα το ρευστό πυρίτιο. Το αρχικό κομμάτι του πυριτίου λειτουργεί σαν πυρήνας κρυστάλλωσης και το ρευστό πυρίτιο στερεοποιείται και σχηματίζεται σταδιακά ένας μεγάλος κρύσταλλος πυριτίου με την αργή ανύψωση. Η τελική ράβδος που θα δημιουργηθεί είναι το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο που αποτελείται από πλινθώματα (*ingots*). Το πάχος της ράβδου μπορεί να φτάσει έως 30cm διάμετρο και έως 2m μήκος και μπορεί να μεταβληθεί μέσω της αλλαγής της θερμοκρασίας ή των ταχυτήτων κίνησης. Τέλος, η ράβδος υπόκειται κοπή σε λεπτούς δίσκους πάχους $150\mu\text{m}$ έως $500\mu\text{m}$.



Σχήμα 29: Διαδικασία παραγωγής της μεθόδου *Czochralski*

Αν η ποιότητα του κρυστάλλου πρέπει να αυξηθεί, τότε χρησιμοποιείται η μέθοδος *Float – Zone* (*FZ* ή *Zone Melt*) αντί της μεθόδου *CZ – Si*. Σε αυτή τη μέθοδο ο αρχικός κρυστάλλος πολυκρυσταλλικού πυριτίου τοποθετείται κάτω από μια κατακόρυφη ράβδο πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Παράλληλα, ένα πηνίο κινείται κατά μήκος της ράβδου και δημιουργεί μια ζώνη λιωμένου πυριτίου. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου αναγκάζουμε τις προσμίξεις του κρυστάλλου να μετακινηθούν προς τα επάνω λόγω της θερμότητας και να σχηματίζουμε υψηλής ποιότητας μονοκρυσταλλικές μορφές στον αρχικό κρυστάλλο. Όμως, η μέθοδος *FZ – Si* θεωρείται αρκετά πιο δαπανηρή σε σχέση με την *CZ – Si* και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.



Σχήμα 30: Αρχή λειτουργίας *Float – Zone*. Θερμαινόμενος δακτύλιος κινείται κατακόρυφα και λιώνει το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο τοπικά, έτσι ώστε οι ακαθαρσίες να κινηθούν προς τα πάνω κατά την κρυστάλλωση

Στο τελικό στάδιο τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια στις δυο όψεις των δίσκων και οι διάφορες επιφάνειες προστασίας, όπως το γυαλί και η αντιαντανακλαστική επιφάνεια. Το μονοκρυσταλλικά ηλιακά κελιά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, όπως τη απόδοσης ανά μονάδα επιφάνειας, αλλά και τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά μειονεκτούν στον τομέα του κόστους παραγωγής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά.

3.1.2 Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (*mc -Si*)

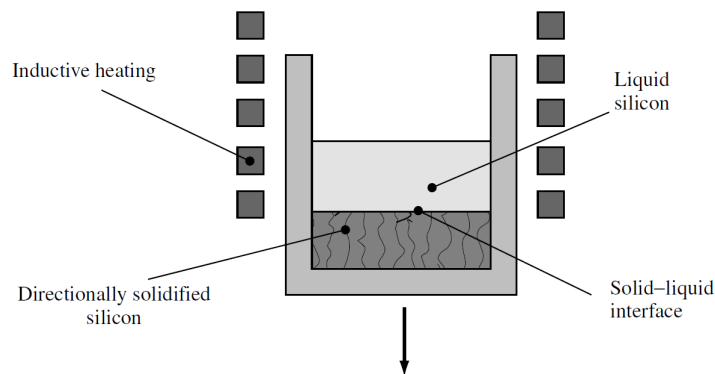
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (*multicrystalline silicon* ή *mc-Si*) αποτελούνται από περιοχές μονοκρυσταλλικού πυριτίου που μπορούν να παρατηρηθούν οπτικά, αλλά

δεν παρουσιάζουν την ομοιόμορφη δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία εμφανίζουν μικρότερη απόδοση σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά. Σε εργαστηριακές συνθήκες ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στο ~20%, ενώ τα εμπορικά ηλιακά κελιά ~15%.

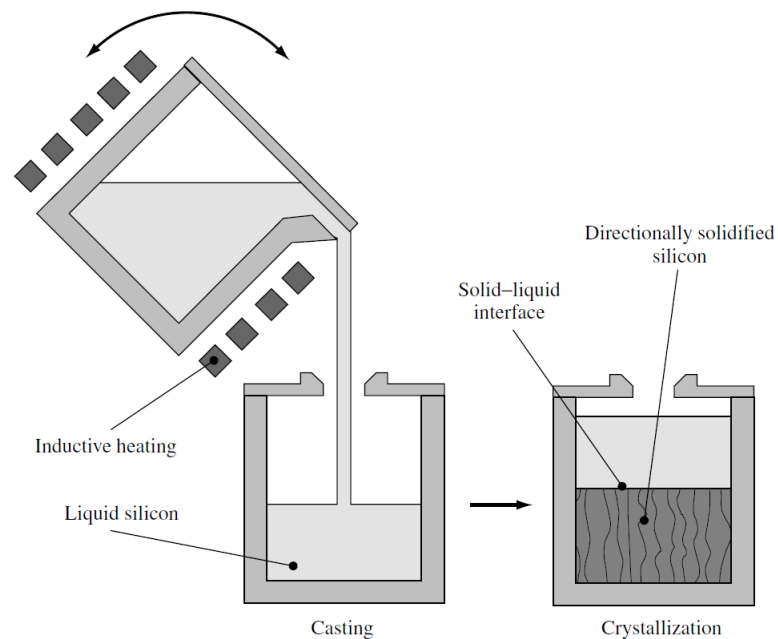
Οι δυο κύριες τεχνικές παραγωγής είναι η μέθοδος *Bridgman* και η μέθοδος *block – casting*. Και οι δυο διαδικασίες είναι οικονομικά φθηνότερες και περιορίζουν την ποσότητα χαμένου υλικού κατά την παραγωγική διαδικασία. Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις δυο διαδικασίες είναι η χρήση μιας χοάνης για την τήξη και την στερεοποίηση του πυριτίου κατά την μέθοδο *Bridgman*, ενώ στην μέθοδο *block – casting* είναι απαραίτητη η χρήση και δεύτερης για την φάση της στερεοποίησης.

Στην περίπτωση της μεθόδου *Bridgman*, το πυρίτιο τήχεται σε ειδικά κατασκευασμένο δοχείο και παραμένει εκεί για την στερεοποίηση του σε πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Το δοχείο αυτό διαθέτει ειδική επιφάνεια που αποτρέπει τυχόν κολλήματα του ρευστού στα τοιχώματα, κατά την αύξηση του όγκου του υλικού κατά την στερεοποίηση, που θα οδηγούσαν στην καταστροφή του δοχείου ή του υλικού. Σε αντίθεση με αυτή τη μέθοδο, κατά την διαδικασία *block – casting* η τήξη γίνεται σε ένα απλό δοχείο και για την στερεοποίηση χρησιμοποιείται ένα δεύτερο δοχείο.

Συνήθως, και για τις δυο διαδικασίες παραγωγής, η στερεοποίηση πραγματοποιείται στον πυθμένα του δοχείου κάτω από την θερμοκρασία τήξης (1400°C) του πυριτίου. Κατά την μέθοδο *Bridgman* η μείωση της θερμοκρασίας γίνεται απλά μεταφέροντας εκτός κλιβάνου στερεοποίησης το δοχείο. Σε αντίθεση, με την μέθοδο *block – casting*, που ο έλεγχος της θερμοκρασίας γίνεται από ειδικούς θερμοαντήρες που προσαρμόζονται στο πρώτο δοχείο. Το δεύτερο σύστημα παραγωγής, λόγω της εξέλιξης και ευελιξίας του θερμικού συστήματος παρουσιάζει μικρότερες ταχύτητες παραγωγής.



Σχήμα 31: Τυπική διάταξη της διαδικασίας *Bridgman* για την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η τήξη και η στερεοποίηση γίνεται στο ίδιο δοχείο. Κατά τη στερεοποίηση το δοχείο με αργό ρυθμό κινείται εκτός της περιοχής των θερμοαντήρων.



Σχήμα 32: Διαδικασία *block – casting*. Μετά την τήξη το μείγμα μεταφέρεται σε ειδικό δοχείο χωρίς σύστημα θέρμανσης για την στερεοποίηση.

Τέλος, κατά την παραγωγή πολυκρυσταλλικού πυριτίου οι λεπτές φέτες του τελικού προϊόντος είναι σε τετραγωνικό σχήμα, σε αντίθεση με το κυκλικό των μονοκρυσταλλικών στοιχείων. Επομένως, καλύπτεται μεγαλύτερη επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου από πλάκες πυριτίου.

Τα πλεονεκτήματα που έχουν τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ευκολότερη και λιγότερο δαπανηρή διαδικασία παραγωγής σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά στοιχεία. Επίσης, η απόδοσή τους επηρεάζεται λιγότερο από τις υψηλές θερμοκρασίες. από την άλλη μεριά, κύριο μειονέκτημα είναι η χαμηλή απόδοση που παρουσιάζουν, λόγω της χαμηλότερης καθαρότητας του πυριτίου.

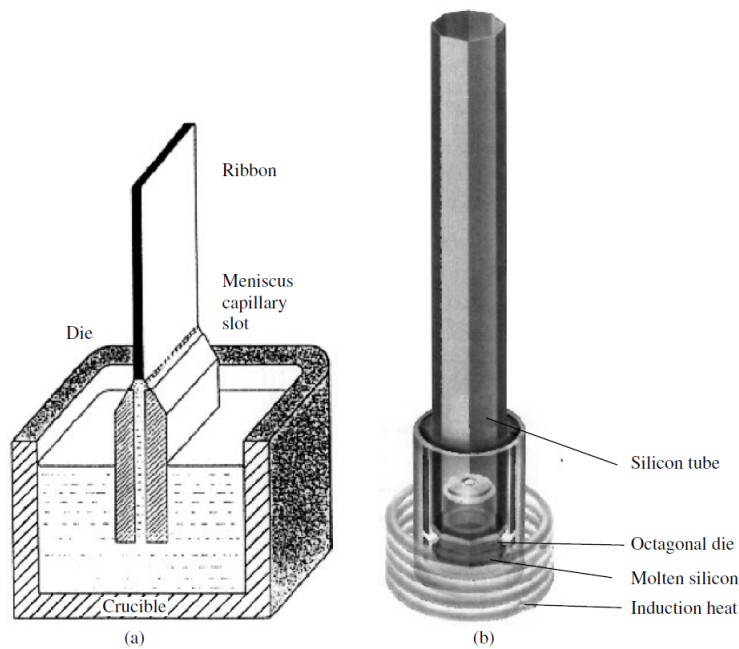
3.1.3 Ταινίας Πυριτίου (*ribbon-Si*)

Κύριος στόχος της ανάπτυξης φωτοβολταϊκών στοιχείων ταινιών πυριτίου (*Ribbon Silicon*) ήταν η μείωση του κόστους, μέσω της διαδικασίας της κοπής, αλλά και το λιγότερο χαμένο πυρίτιο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της απευθείας χρησιμοποίησης των παραγόμενων ταινιών στα ηλιακά κελιά. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας έγινε με ραγδαίους ρυθμούς κατά τη δεκαετία του 1980. Πάνω από 20 τεχνικές δοκιμάστηκαν, όμως μόλις 2 χρησιμοποιήθηκαν για μαζική εμπορική παραγωγή.



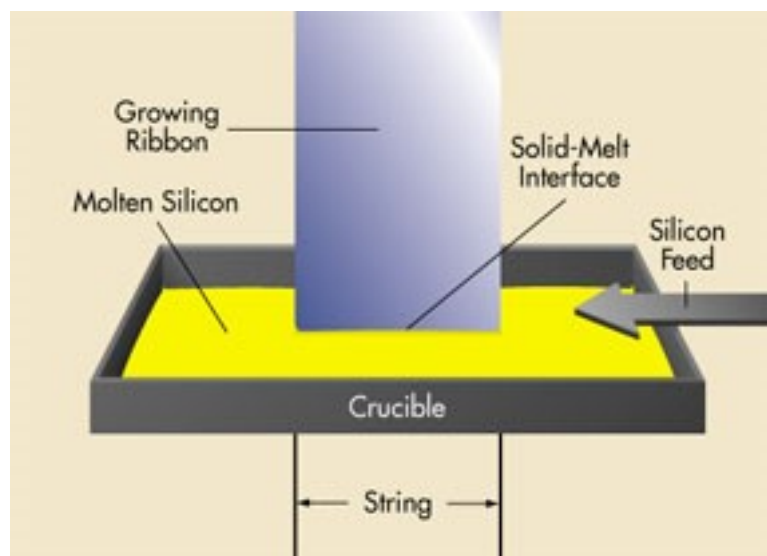
Σχήμα 33: Φωτοβολταϊκό στοιχείο *Ribbon Silicon*

Η εταιρεία *ASE Americas* ανέπτυξε την μέθοδο *Edge deformed film fed growth process (EFG)*. Κατά τη διαδικασία αυτή η ταινία πυριτίου εξέρχεται μέσα από μήτρα που περιέχει λιωμένο πυρίτιο, σε σχήμα που είναι προκαθορισμένο. Τα εξαγόμενα φύλλα παρουσιάζουν μικρότερη ποιότητα υλικού, σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά, αλλά έχουν απόδοση ~15%.



Σχήμα 34: Σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής *EFG* σε καλούπι (a) και σε οκταγωνική διαμόρφωση (b).

Η δεύτερη πιο δημοφιλής παραγωγική διαδικασία είναι η *String ribbon process (STR)* και αναπτύχθηκε το 1994 από την εταιρεία *Evergreen*. Η παραγωγική διαδικασία είναι απλή και στηρίζεται στην ανοδική κίνηση δυο αντιστάσεων σε κυλινδρική μορφή μέσα από μια μήτρα με λιωμένο πυρίτιο. Το πάχος της ταινίας εξαρτάται από την ταχύτητα που κινούνται οι δυο κύλινδροι. Η κοπή γίνεται με κοπτικά εργαλεία από διαμάντι και τα τελικά στοιχεία έχουν απόδοση ~15%.



Σχήμα 35: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου STR

3.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία Λεπτών Υμενίων (*Thin Films*)

Η συνεχής ανάγκη μείωση του κόστους παραγωγής ήταν ο κύριος λόγος της συνεχούς έρευνας πάνω σε νέα υλικά και νέους τρόπους παραγωγής ηλιακών κελιών. Μια τεχνολογία που βρίσκεται σε ραγδαία ανάπτυξη είναι η τεχνολογία λεπτών υμενίων (*thin films solar cells*). Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας είναι το χαμηλό κόστος των υλικών. Επιπλέον, ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η σύνδεση σε σειρά κατά την παραγωγή μεγάλων επιφανειών στρωμάτων ηλιακών κελιών. Για αυτό το λόγο ολόκληρα τμήματα κελιών κατασκευάζονται μέσω διαδικασιών εναπόθεσης υλικών. Αυτή η παραγωγική διαδικασία αποτελεί το οικονομικό πλεονέκτημα της μεθόδου, η οποία όμως είναι αρκετά απαιτητική, λόγω της ελαχιστοποίησης των ατελειών στα ηλιακά κελιά. Το μερίδιο αγοράς αυτή τη στιγμή είναι μικρό για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτής της τεχνολογίας, όμως εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά πολύ στο μέλλον.

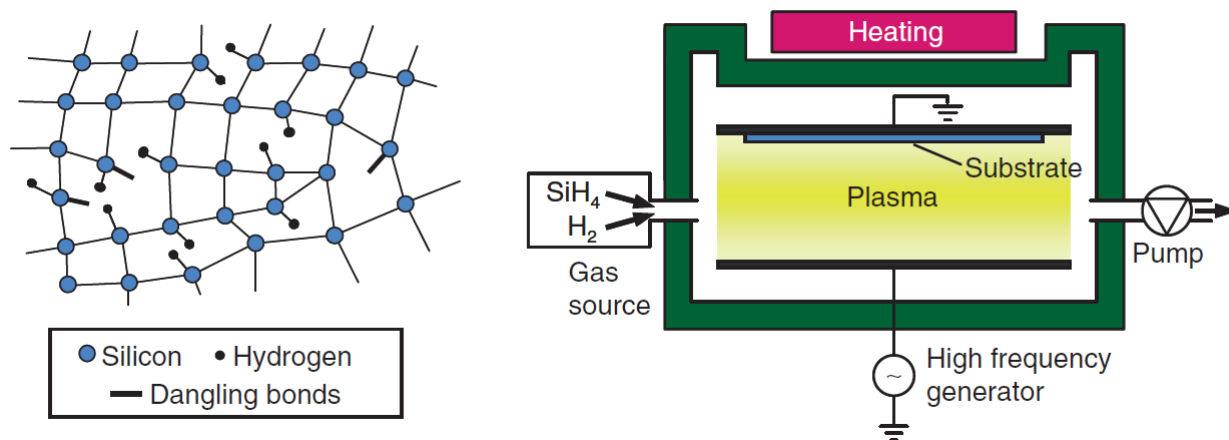
3.2.1 Άμορφου Πυριτίου (*a-Si*)

Η πρώτη επιστημονική δημοσίευση που αφορούσε το άμορφο πυρίτιο (*a-Si*) στην φωτοβολταϊκή τεχνολογία έγινε στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Τα πρώτα εμπορικά προϊόντα εμφανίστηκαν μια δεκαετία αργότερα. Όμως, η κατανόηση βασικών ιδιοτήτων έγινε αρκετό καιρό αργότερα. Κύριο πρόβλημα ήταν η απότομη πτώση της απόδοσης των κελιών, όταν αυτό εκτεθεί στο ηλιακό φως (*Staebler-Wronski effect*). Το φαινόμενο αυτό ακόμα δεν έχει εξηγηθεί πλήρως, αλλά μια επικρατούσα εξήγηση είναι ότι το ηλιακό φως που δημιουργεί τους φορείς φορτίου (οπές – ηλεκτρόνια) σπάει τους ασθενείς δεσμούς πυριτίου και υδρογόνου, δημιουργώντας παράλληλα περιττό υλικό χωρίς δομή. Αυτό το περιττό υλικό μειώνει την ικανότητα απορρόφησης του κελιού.

Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν μερίδιο αγοράς και χρησιμοποιούνται για οικιακές χρήσεις. Η εργαστηριακή απόδοση τους είναι ~13%, ενώ σε εμπορικής χρήσης πάνελ είναι ~7%.

Τα κύρια πλεονεκτήματα που εμφανίζουν είναι η καλύτερη απόδοση σε συνθήκες διάχυτου φωτός

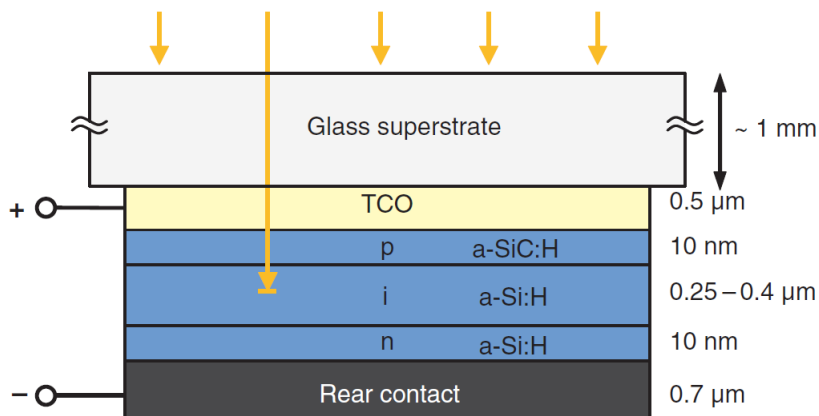
και ο μικρός επηρεασμός από τις υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 36: Κρυσταλλική δομή $a\text{-Si}$ και απεικόνιση παραγωγής $a\text{-Si}$ με τη μέθοδο *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)*

Το άμορφο πυρίτιο ουσιαστικά είναι ένα κράμα πυριτίου με υδρογόνο. Το ενεργειακό φάσμα παρουσιάζει αύξηση από 1.12eV σε 1.7eV . Η διαδικασία παραγωγής ονομάζεται Χημική Εναπόθεση Ατμών (*Chemical Vapor Deposition* ή *CVD*) και στηρίζεται στο σιλάνιο (SiH_4). Οι τυπικές θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι κάτω των 500°C , ώστε να συσσωματωθεί το υδρογόνο στην μεμβράνη. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής είναι η Χημική Εναπόθεση Ατμών με τη χρήση Πλάσματος (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* ή *PECVD*).

Κατά τη διαδικασία αυτή, το σιλάνιο και το υδρογόνο σε μορφή αερίου ρέουν σε θερμό θάλαμο ($\sim 200^\circ\text{C}$) και εισέρχονται σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υψηλών συχνοτήτων. Αυτό προκαλεί επιτάχυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων, που με την σειρά τους διασπούν τα αρχικά μόρια των αερίων. Τα φορτισμένα σωματίδια του πλάσματος αντιδρούν με την επιφάνεια του υποστρώματος και δημιουργούν έτσι το αρχικό επίπεδο του άμορφου πυριτίου. Με την συνεχή παροχή των δύο αερίων το επίπεδο αυτό αναπτύσσεται. Αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί και χωρίς την παρουσία του πλάσματος, αλλά σε υψηλότερη θερμοκρασία ($\sim 450^\circ\text{C}$).



Σχήμα 37: Τυπική δομή λεπτού υμενίου $a\text{-Si}$, με συνολικό πάχος εναπόθεσης $\sim 2\mu\text{m}$

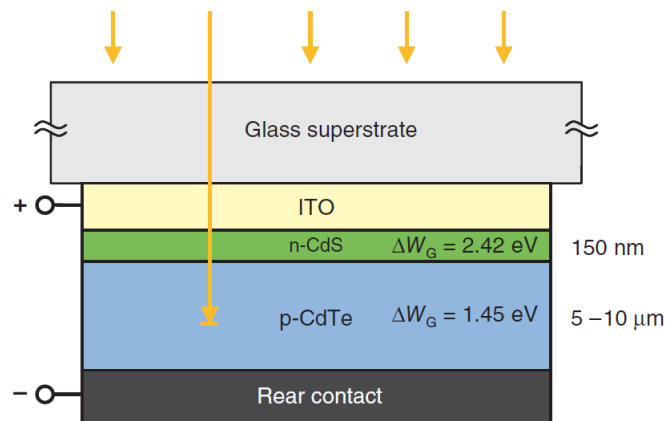
Μια τυπική διάταξη ενός ηλιακού κελιού άμορφου πυριτίου που παράχθηκε μέσω της διαδικασίας *PECVD*, φαίνεται στο Σχήμα 37. Αρχικά, όλη η επιφάνεια καλύπτεται με γυαλί και στην συνέχεια με ένα επίπεδο διαφανών αγωγικών οξειδίων (*Transparent Conducting Oxide* ή *TCO*), μιας τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στην παραγωγή επίπεδων οθονών τηλεόρασης. Τα πιο συνηθισμένα υλικά είναι το οξείδιο του ίνδιου και κασσιτέρου (*ITO*) και το οξείδιο του ψευδαργύρου (*ZnO*). Η τυπική μορφή δομή του ημιαγωγού που ακολουθεί είναι *p-i-n* σε μορφή *sandwich*. Τέλος, το οπίσθιο ηλεκτρόδιο είναι συνήθως από αλουμίνιο.

3.2.2 Τελουριούχου Καδμίου (*CdTe*)

Το Τελουριούχο Κάδμιο είναι μια χημική ένωση ημιαγωγών από την 2η και 6η ομάδα στοιχείων του Σχήματος. Το *CdTe* είναι ένας άμεσος ημιαγωγός, κάτι που αποφέρει μεγαλύτερη ηλιακή απορρόφηση, με ενεργειακό διάκενο 1.45eV . Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που παρουσιάζει είναι η πληθώρα μεθόδων εναπόθεσης με πολύ καλά ποιοτικά αποτελέσματα. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία παραγωγής είναι η θερμική εναπόθεση (*Close Spaced Sublimation* ή *CSS*). Σε αυτή την διαδικασία ο ημιαγωγός θερμαίνεται σε θερμοκρασία $\sim 500^\circ\text{C}$ και ο ημιαγωγός ατμοποιείται και εναποτίθεται σε υπόστρωμα χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Η τυπική διάταξη ενός ηλιακού κελιού *CdTe* παρουσιάζεται στο Σχήμα 38. Τα ηλιακά κελιά αυτού του τύπου παρουσιάζουν καλές αποδόσεις τόσο σε διάταξη υποστρώματος, όσο και σε διάταξη υπερστρώματος. Μεγαλύτερη απόδοση εμφανίζεται στη δομή υποστρώματος, η οποία και αναλύεται παρακάτω.

Κάτω από το επίπεδο του γυαλιού τοποθετείται αγωγίμα ηλεκτρόδια *ITO*. Για το *n-type* στρώμα χρησιμοποιείται θειούχο κάδμιο (*CdS*), επειδή το *CdTe* δεν σχηματίζει αποτελεσματικό *n-type* στρώμα. Το στρώμα που πραγματοποιείται η απορρόφηση του φωτός είναι το αμέσως επόμενο και αποτελείται από *p-type* πολυκρυσταλλικό *CdTe*. Τα δύο αυτά στρώμα λόγω των διαφορετικών υλικών ονομάζονται έτερο-επαφή (*heterojunction*).



Σχήμα 38: Δομή υπερστρώματος κυψέλης *CdTe*

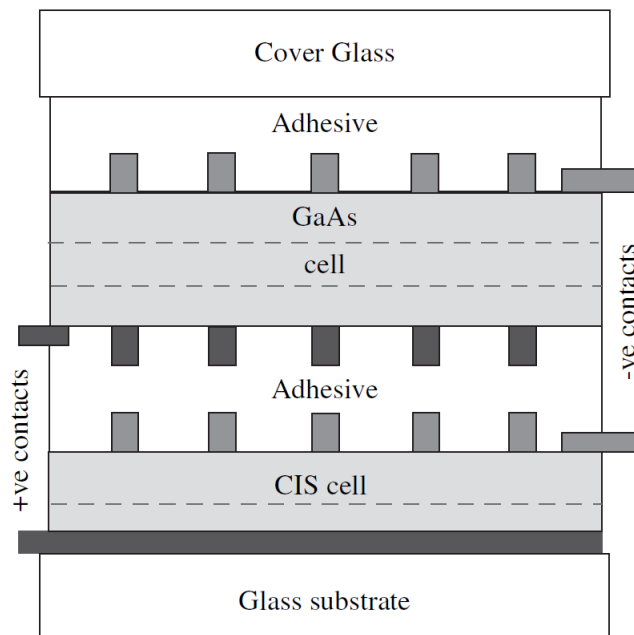
Οι ιδιότητες απορρόφησης της ένωσης αρχικά δεν αποδίδουν ικανοποιητικά, για αυτό το λόγο επεξεργάζονται με τη χρήση χλωριούχου καδμίου (*CdCl₂*). Η επεξεργασία γίνεται σε θάλαμο θερμοκρασίας 450°C με ταυτόχρονη διάχυση *CdCl₂*. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 38, το τμήμα του

CdTe έχει πάχος 5 – 10 μm , αν και παρουσιάζει μεγάλο βαθμό απορρόφησης φωτός, λόγω της δυσκολίας παραγωγής λεπτών υμενίων με καλή κρυσταλλική δομή σε μεγάλες επιφάνειες. Τέλος, ο μεγαλύτερος απόδοσης που έχει καταγραφεί είναι 18.3%, ενώ σε εμπορικές εφαρμογές είναι 13%.

3.2.3 Αρσενιούχου Γαλλίου (*GaAs*)

Η μελέτη του φωτοβολταϊκού φαινομένου με τη χρήση αρσενιούχου γαλλίου έγινε αρχικά το 1954, από τον *Heinrich Welker*. Συγκρινόμενο με άλλους ημιαγωγούς, το *GaAs* έχει ενεργειακό διάκενο 1.424eV, τιμή που θεωρείται πρακτικώς βέλτιστη, τόσο για το φάσμα *AM1.5* όσο και για το *AM0* (Σχήμα 7). Επειδή, το *GaAs* είναι άμεσα απορροφητικός ημιαγωγός, λόγω του υψηλού συντελεστή απορρόφησης ηλιακού φωτός χρειάζεται υλικά υπέρλεπτων υμενίων, κάτι που το καθιστά ικανό για παραγωγή τόσο κρυσταλλικών όσο και λεπτών υμενίων φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το συγκεκριμένο κράμα υλικών είναι το μεγάλο ενεργειακό διάκενο, η υψηλή απόδοση στην απορρόφηση του φωτός και οι πολύ καλές ιδιότητες των φορέων φορτίων (μικρή μάζα και μεγάλη κινητικότητα). Στον αντίποδα, κύρια αρνητικά είναι το υψηλό κόστος παραγωγής, το πλήθος ατελειών στην κρυσταλλική δομή και οι ακαθαρσίες, που δεν μπορούν να αντισταθμιστούν μέσω κάποια τεχνικής εναπόθεσης και προκαλούν μείωση στην απόδοση της απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμα, παρουσιάζει χειρότερες μηχανικές ιδιότητες από το *Si* κάτι που οδηγεί εύκολα στην αστοχία των παραγόμενων στοιχείων.



Σχήμα 39: Τομή λεπτού υμενίου ΓαAs

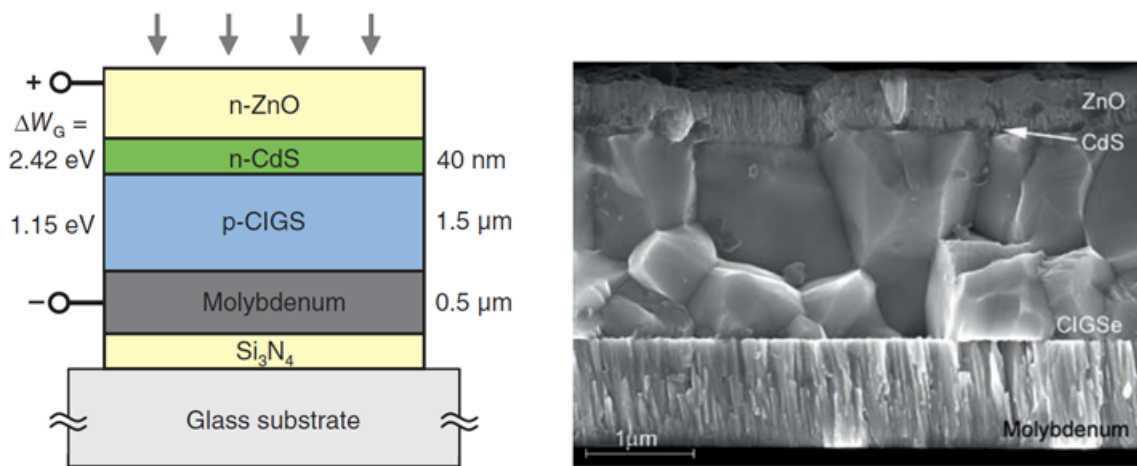
Το *GaAs* λόγω της μεγάλης θερμικής αδράνειας που εμφανίζει, σε συνδυασμό με την απόδοσή του, χρησιμοποιείται σε διαστημικές εφαρμογές. Ειδικότερα, η απόδοση του μειώνεται στο μισό σε θερμοκρασία 2000°C, σε σύγκριση με το *Si* που έχει αντίστοιχη θερμοκρασία τους 1200°C. Ακόμα, σε περιπτώσεις συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, το υψηλό κόστος παραγωγής του ισοσταθ-

μίζεται από την υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρει. Ο βαθμός απόδοσης των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών στοιχείων κυμαίνεται στα 25% - 30%.

3.2.4 Χαλκοπυριτών CIS/CIGS

Οι χαλκοπυρίτες αποτελούν χημικές ενώσεις βασισμένες σε στοιχεία της 1ης, 3ης και 6ης ομάδας του περιοδικού πίνακα (Σχήμα 8). Τα κυριότερα κράματα αυτής της κατηγορίας είναι ο δισεληνοϊνδίου χαλκός (*Copper Indium Diselenide* ή *CIS* ή $CuInSe_2$) και ο δισεληνογαλλίου χαλκός (*Copper Gallium Diselenide* ή *CIGS* ή $CuGaSe_2$). Όμοια με το *a-Si* και το *CdTe*, αυτή η ομάδα υλικών έχει άμεσο ενεργειακό διάκενο και υψηλό συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι που μειώνει το πάχος του στοιχείου και ταυτόχρονα το κόστος του. Έρευνες πάνω στα κελιά *CIS* πραγματοποιήθηκαν πρώτη φορά το 1970. Το 1974 ο *Sigurd Wanger* κατασκεύασε ηλιακό κελί από $CuInSe_2/CdS$ πετυχαίνοντας απόδοση 12%, ιδιαίτερα υψηλή για την εποχή.

Το ενεργειακό διάκενο, μετά την προσθήκη *Ga*, που επιτυγχάνεται σε στοιχεία *CIGS* είναι 1.25eV, χωρίς να έχουμε μείωση της απόδοσης. Επίσης, το διθειούχο ίνδιο (*Copper Indium Disulphide* ή $CuInS_2$) παρουσιάζει ενεργειακό διάκενο 1.5eV, κοντά δηλαδή στο βέλτιστο για την ηλιακή απορρόφηση και αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για μελλοντικές εφαρμογές. Το πλέον υποσχόμενο υλικό αυτή τη στιγμή είναι $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$. Όταν έχουμε συμμετοχή του *Ga* ($x = 0$), τότε έχουμε το κράμα $CuGaSe_2$ με ενεργειακό διάκενο 1.7eV, ενώ με την απουσία του *Ga* και την ταυτόχρονη παρουσία του *In*, έχουμε ενεργειακό διάκενο 1eV. Επομένως, μεταβάλλοντας την ύπαρξη *In* και *Ga* μπορούμε να κινηθούμε ανάμεσα δυο ακραίες τιμές ενεργειακών διακένων και να επιτύχουμε βέλτιστη απόδοση ανά συνθήκη.



Σχήμα 40: Αρχή της δομής ενός κελιού CIS/CIGS και εικόνα μικροσκοπίου

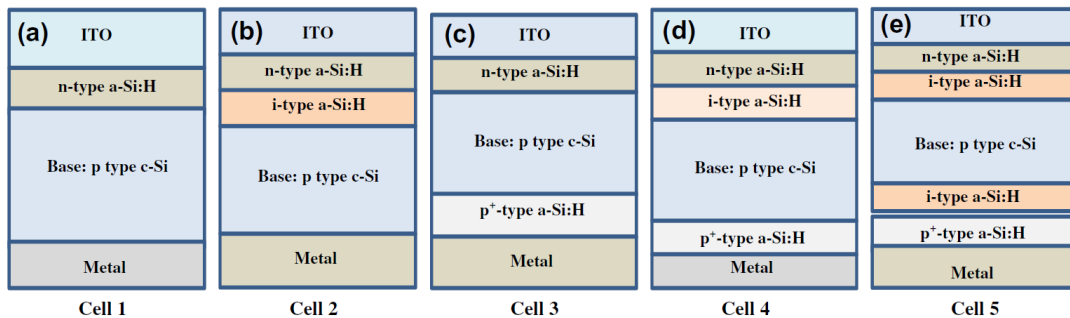
Μια τυπική διάταξη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου CIS/CIGS ακολουθεί την δομή υποστρώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 40. Αρχικά, τοποθετούνται όλα τα υλικά σε γυάλινο υπόστρωμα που έχει υποστηρικτικό ρόλο. Το οπίσθιο ηλεκτρόδιο αποτελείται από μολυβδαίνιο (*Mo*) και αποτελεί την ωμική επαφή που βοηθά στη ροή του ρεύματος. Η επιλογή του *Mo* έγινε καθώς έχει αντιδιαβρωτικές ιδιότητες σε αντιδιαστολή με τις διαβρωτικές συνθήκες παραγωγής του CIS. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στρώμα από νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), ώστε να αποφευχθεί προσμίξεις κατά την παραγωγική διαδικασία από την γυάλινη επιφάνεια στον απορροφητή. Η επα-

φή $p - n$ σχηματίζεται όπως ακριβώς και στα κελιά $CdTe$, ανάμεσα στο επίπεδο του απορροφητή και το επίπεδο CdS . Λόγω της τοξικότητας του Cd , έχει γίνει προσπάθεια αντικατάστασης του, με κυριότερο αρνητικό την μείωση της απόδοσης. Τέλος, χρησιμοποιείται ως TCO , οξειδίο του ψευδαργύρου (ZnO) και στην ουσία παίζει το ρόλο του $n - type$ ημιαγωγού, που αυξάνει την διαπερατότητα προς τον απορροφητή.

Η κυριότερη τεχνική παραγωγής εναπόθεσης είναι η θερμική συνεξάτμιση των στοιχείων, κατά την οποία έχουμε την εναπόθεση με τη μορφή ατμών κάθε στοιχείου ξεχωριστά σε θερμαινόμενο υπόστρωμα. Έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία νατρίου στην διαδικασία μπορεί να βελτιώσει την κρυσταλλική δομή και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του $CIGS$. Ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης ποικίλει από 10 έως 90 λεπτά, ανάλογα τους ρυθμούς έγχυσης των ατμών. Με αυτή τη τεχνική παραγωγής έχουμε επιτευχθεί οι μεγαλύτερες αποδόσεις σε εργαστηριακό επίπεδο (19.6%), ενώ σε εμπορικό επίπεδο υπάρχουν κελιά απόδοσης 15%.

3.2.5 Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία ($HJ - HIT$)

Η ανακάλυψη της ετερο-επαφής (*Heterojunction* ή HJ) και της ετερο-επαφής με εσωτερικό στρώμα *Hetrojunction with intrinsic layer* ή HIT) από την *Sanyo Ltd.* Τα πρώτα χρόνια του 1960 οδήγησε στη δημιουργία νέων τεχνολογιών ηλιακών κελιών με βάση το πυρίτιο. Η τεχνολογία αυτή στηρίζεται στην ένωση επιπέδων κρυσταλλικού πυριτίου με άμορφο πυρίτιο. Ηλιακά κελιά HJ παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση από τα κελιά $c - Si$ και χαμηλότερο κόστος παραγωγής από λεπτά υμένα τύπου $a - Si$. Λόγω των ελαττωμάτων που παρουσιάζουν τα επίπεδα $c - Si$, απαιτεί μεγάλος συνδυασμός επιπέδων $a - Si$ και $c - Si$. Το πρόβλημα αυτό ξεπεράστηκε με την προσθήκη ενδιάμεσου επιπέδου άμορφου υδρογονοποιημένου πυριτίου ($a - Si : H$), ανάμεσα στο επίπεδο του νοθευμένου $a - Si : H$ και το νοθευμένου $c - Si$. Η δομή που προκύπτει ονομάζεται ετερο-επαφή με ενδιάμεσο στρώμα (HIT).



Σχήμα 41: Σχηματική αναπαράσταση διαφόρων τύπων HJ και HIT ηλιακών κελιών

Για την αύξηση της απόδοσης των στοιχείων HJ και HIT προτάθηκαν η εισαγωγή επαφής ηλεκτρικού πεδίου στην πίσω επιφάνεια (*Back Surface Field* ή BSF), καθώς και αμφίπλευρες δομές. Το 1991 η εταιρεία *Sanyo* πέτυχε απόδοση ~16%, κάτι που κατάφερε να αυξήσει στο ~21% το 2005. Η μεγαλύτερη καταγεγραμμένη απόδοση είναι 23%. Παράλληλα, γίνονται προσπάθειες ελαχιστοποίησης του κόστους μέσω της μείωσης του πάχους των φύλλων κρυσταλλικού πυριτίου. Οι εργαστηριακές έρευνες σε αυτή την τεχνολογία ηλιακών κελιών προσανατολίζεται στην βελτιστοποίηση βασικών παραμέτρων, όπως το είδος και οι συνδυασμοί των επιπέδων, καθώς και το πάχος κάθε στρώματος.

3.3 Πολυμερή και Οργανικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

Εισαγωγικά & Τύποι OPVs

Οι οργανικές φωτοβολταϊκές διατάξεις (*OPVs*) έχουν σαν δομική τους μονάδα την οργανική φωτοβολταϊκή κυψελίδα (*OSC – Organic Solar Cell* ή αλλιώς *PSC – Plastic Solar Cell*). Η *OSC* χρησιμοποιεί οργανικά ηλεκτρονικά υλικά, όπως αγώγιμα οργανικά πολυμερή ή μικρότερα οργανικά μόρια κατάλληλα για την δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου από την απορρόφηση του φωτός και για την μεταφορά του φορτίου αυτού στους ειδικούς ακροδέκτες της διάταξης.

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά παραγωγής των *OSC* έχουν, πρώτον, χαμηλό κόστος παρασκευής και συνεπώς είναι οικονομικά εφικτή η μαζική τους παραγωγή. Αυτό αποτελεί ξεκάθαρο πλεονέκτημα έναντι των ανόργανων ημιαγωγών (*Si, Ge, GaAs*, κτλ). Δεύτερο πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα παραγωγής τους σε συνθήκες περιβάλλοντος δωματίου, χωρίς έτσι να απαιτούν συνθήκες υψηλού κενού ή υψηλές θερμοκρασίες, όπως απαιτεί για παράδειγμα η παρασκευή των *silicon wafers*. Τρίτον, η ευκαμψία των οργανικών αγώγιμων πολυμερών τα καθιστά ικανά να χρησιμοποιηθούν υπό συνθήκες κάμψης ή στρέψης της *OSC* χωρίς να επηρεάζεται αισθητά η απόδοση της διάταξης *OPV*. Από την άλλη, η κρυσταλλική δομή των ανόργανων ημιαγωγών τους προσδίδει σκληρότητα μεν, αλλά αδυναμία προσαρμογής σε παρόμοιες συνθήκες. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, ένα ύφασμα από μόνο του παρουσιάζει ευκαμψία. Για την πλήρη εναρμόνιση της ηλεκτρονικής διάταξης με το ύφασμα, είναι απαραίτητη λοιπόν η χρήση οργανικών αγώγιμων πολυμερών.

Ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης των οργανικών πολυμερών είναι υψηλός. Αυτό σημαίνει πως μεγάλη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να απορροφηθεί από σχετικά μικρή ποσότητα τέτοιου υλικού, μειώνοντας έτσι ακόμα περισσότερο το κόστος κατασκευής. Εντούτοις, σημαντικό –προς το παρόν– μειονέκτημα των *OSCs* έναντι των ανόργανων φωτοβολταϊκών κυψελίδων είναι η χαμηλή απόδοσή τους. Ακολουθεί η χημική αστάθεια (λόγω της πολυμερικής φύσης τους) και η χαμηλότερη αντοχή τους σε μηχανική καταπόνηση.

Στα οργανικά φωτοβολταϊκά είναι σημαντική η σειρά τοποθέτησης των επιμέρους στρωμάτων αλλά και το υλικό τους. Αυτό το κριτήριο κατηγοριοποιεί τα *OPVs* σε: *Single Layer OPVs*, *Bilayer OPVs*, *Bulk Heterojunction OPVs (BHJ)*, *Graded Heterojunction OPVs*. Θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε αυτά ώστε να παρουσιαστούν αργότερα οι διαδικασίες παρασκευής των οργανικών ηλεκτρονικών διατάξεων με πληρέστερο τρόπο.

Single Layer OPVs

Αποτελούν την απλούστερη δομή *OSC*. Σε αυτά, το πολυμερές που δημιουργούνται τα εξιτόνια συμπίεζεται από δύο αγώγιμα υποστρώματα εκατέρωθέν του. Το πρώτο υπόστρωμα έχει υψηλό έργο εξόδου (*work function*) και συνήθως επιλέγεται σαν υλικό το *ITO (Indium Tin Oxide)* και λειτουργεί σαν άνοδος της διάταξης. Το δεύτερο *layer* πρέπει να έχει χαμηλό έργο εξόδου και λειτουργεί ως κάθοδος της διάταξης. Συνήθως επιλέγονται μέταλλα όπως *Al, Mg* ή *Ca*. Τέτοιες διατάξεις όμως μειονεκτούν ως προς την απόδοσή τους. Ο συντελεστής μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι μικρότερος του 0.1% κυρίως διότι η διαφορά των έργων εξόδου που έχουν τα υλικά άνοδου και καθόδου δεν είναι αρκετά υψηλή ώστε να διαχωριστεί οριστικά ένα εξιτόνιο σε ένα ηλεκτρόνιο και μια οπή. Αντ'αυτού παρατηρείται συνήθως επανασύνδεση ηλεκτρονίων & οπών προτού αυτά φτάσουν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Η υποτυπώδης μορφή ενός τέτοιου *OSC* φαίνεται στο Σχήμα 42.1.

Bilayer OPV

Αυτός ο τύπος περιλαμβάνει δύο υποστρώματα ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο της διάταξης. Τα υλικά αυτών διαφέρουν σκόπιμα ως προς την ηλεκτρονιοσυγγένεια (*electron affinity*) και την ενέργεια ιονισμού τους. Έτσι αναπτύσσονται ηλεκτροστατικές δυνάμεις στη διεπιφάνειά τους.

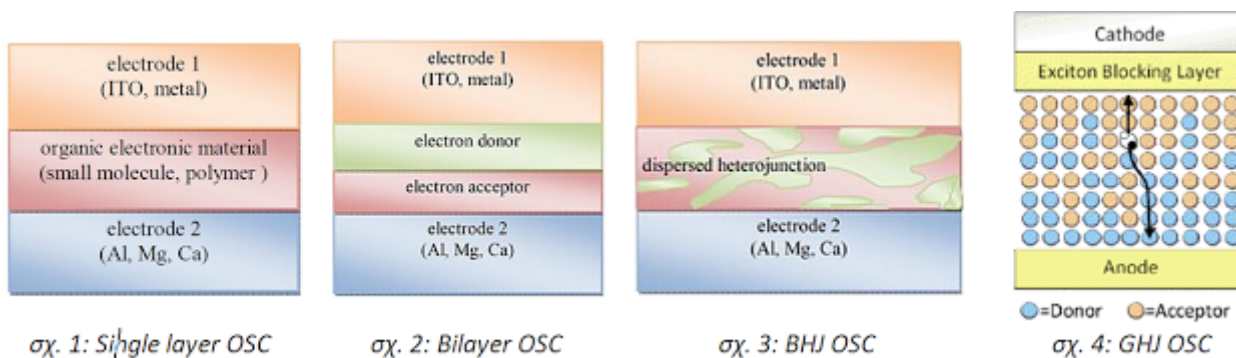
Εξαιτίας του εντονότερου ηλεκτροστατικού πεδίου υπάρχει αυξημένη πιθανότητα μετάπτωσης ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη αγωγιμότητας του υλικού που απορρόφησε το φωτόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας του πολυμερικού δέκτη ηλεκτρονίων. Με λίγα λόγια αυξάνεται η πιθανότητα διάσπασης των εξιτονίων στη διεπιφάνεια. Το υπόστρωμα με τη μεγαλύτερη ηλεκτρονιοσυγγένεια και ενέργεια ιονισμού λειτουργεί σαν δέκτης ηλεκτρονίων ενώ αυτό με τη χαμηλότερη σαν δότης. Ο συντελεστής μετατροπής ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται έτσι στο 1% υπό μονοχρωματική ακτινοβολία αλλά προβληματίζει το κατάλληλο πάχος κάθε υποστρώματος, διότι ένα ελάχιστο πάχος κατάλληλο για αξιόλογη απορρόφηση φωτονίων είναι τα 100nm, ενώ το βάθος διάχυσης ενός εξιτονίου μόλις τα 10nm. Έτσι μόνο ένα μικρό ποσοστό εξιτονίων προσεγγίζει τη διεπιφάνεια των υποστρωμάτων αυτών. Η μορφή ενός τέτοιου *OSC* δίνεται στο Σχήμα 42.2.

Bulk Heterojunction OSC (BHJ)

Στο βελτιωμένο αυτό τύπο *OSC* ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο υπάρχει ένα υπόστρωμα, το οποίο αποτελεί μίξη δύο πολυμερών με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφορά ηλεκτρονιοσυγγένειας και ενέργειας ιονισμού. Αποτελεί βελτίωση της *bilayer* μορφής, διότι το πάχος του *layer* είναι συγκρίσιμο με την απόσταση διάχυσης του εξιτονίου (10nm). Έτσι, τα εξιτόνια που προκύπτουν μπορούν ευκολότερα να πλησιάσουν την διεπαφή δότη-δέκτη και να διασπαστούν σε ηλεκτρόνια & οπές σε μεγαλύτερες ποσότητες. Κατόπιν, τα ηλεκτρόνια και οι οπές συλλέγονται από τον αντίστοιχο δέκτη (ο δότης ηλεκτρονίων λειτουργεί επίσης σαν δέκτης οπών και το αντίστροφο) και οδηγούνται στην κάθοδο και άνοδο αντίστοιχα. Στο σχήμα 42.3 δίνεται η υποτυπώδης δομή μιας *BHJ* κυψελίδας.

Graded Heterojunction OSC (GHJ)

Αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων δομών, όπου ουσιαστικά αντί για μια επίπεδη διεπαφή ανάμεσα στα ενεργά οργανικά στρώματα, γίνεται διείδυση του ενός τύπου πολυμερούς στον άλλο. Η διείδυση όμως προϋποθέτει όσο το δυνατόν καλύτερα καθορισμένη θέση και συγκέντρωση του ενός πολυμερούς στον χώρο που θα άνηκε στον άλλο πολυμερές (αν υπήρχε μόνον *bilayer* δομή). Έτσι αυξάνεται η ροή ηλεκτρονίων και οπών διότι μειώνεται μεν η απόσταση που διανύει ένα εξιτόνιο προτού διασπαστεί και αυξάνεται η διεπιφάνεια δότη – δέκτη ηλεκτρονίων. Ο συντελεστής απόδοσης έχει φτάσει πειραματικά μέχρι και 4% [2].



Σχήμα 42: Σχηματική αναπαράσταση τυπικών μορφών οργανικών φ/β στοιχείων

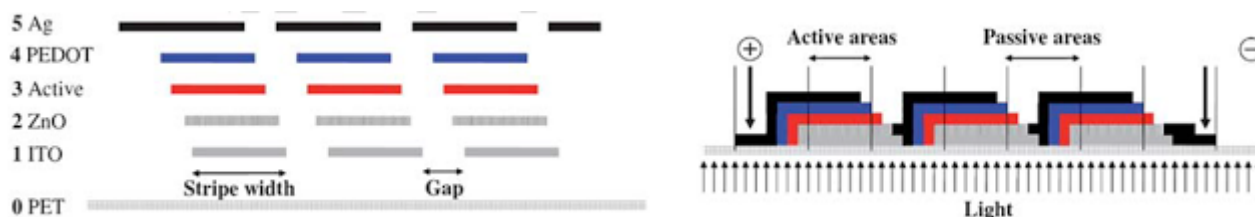
Οι παραπάνω δομές μπορούν να συμπεριληφθούν σε μια ολοκληρωμένη διάταξη όπως φαίνεται στο Σχήμα 43. Η σειρά με την οποία τοποθετούνται τα υποστρώματα καθορίζει τις δύο βασικές μορφές των *OPV*: την κανονική (*regular*) και την ανεστραμμένη (*inverted*). Επιλέγοντας *regular* ή *inverted* δομή είναι δυνατή η επιλογή της πολικότητας της διάταξης. Επίσης, αποδεικνύεται πειραματικά πως η *inverted* δομή παρατείνει το χρόνο ζωής της διάταξης. Σε κάθε περίπτωση όμως επιβάλλεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφάνεια των υποστρωμάτων έως το ενεργό υπόστρωμα. Τέλος, το πάχος του τελικού υμενίου είναι της τάξης των δεκάδων μm .



Σχήμα 43: Κανονική και ανεστραμμένη διάταξη οργανικής φωτοβολταϊκής κυψελίδας

Πώς συνδέονται μεταξύ τους οι φωτοβολταϊκές κυψελίδες

Τα παραπάνω σχήματα απεικονίζουν αφαιρετικά μια κυψελίδα. Όμως το *OPV* συνήθως αποτελείται από πολλές *OSC*s συνδεδεμένες σε σειρά. Μια τέτοια συστοιχία, που μπορεί μετά να συνδεθεί εν παραλλήλω με τις υπόλοιπες αντίστοιχες, παρουσιάζεται σαν παράδειγμα στο Σχήμα 44: 3 *inverted OSC*s εν σειρά. Η ηλεκτρική σύνδεση επιτυγχάνεται με το να συνδεθεί το ηλεκτρόδιο καθόδου της μιας κυψελίδας με το ηλεκτρόδιο ανόδου της αμέσως επόμενης κ.ο.κ. Συνεπώς τα υποστρώματα δεν στοιβάζονται το ένα ακριβώς πάνω στο άλλο, αλλά με την παρακάτω μορφή. Τα υποστρώματα συνήθως προτιμάται να τοποθετούνται κλιμακωτά ώστε να μεγαλώσει η απόσταση ανόδου - καθόδου της ίδιας κυψελίδας και να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα βραχυκύκλωσης της.

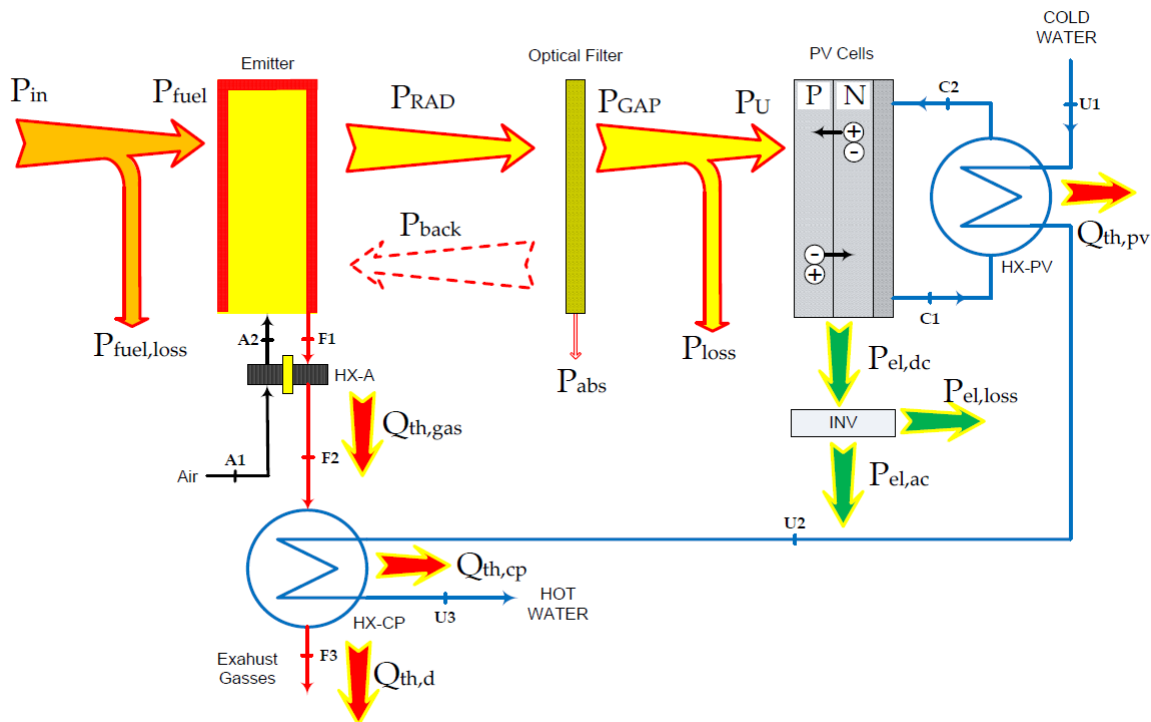


Σχήμα 44: Τυπική ηλεκτρική σύνδεση κυψελίδων

Μετά τη δημιουργία του υμενίου (*regular* ή *inverted* διάταξης), απομένει να γίνει το λεγόμενο *encapsulation* (ενθυλάκωση). Είναι απαραίτητο για την προστασία της διάταξης από τη φθορά της επιφάνειάς της (λόγω οξειδωσης από το οξυγόνο του αέρα, από μόρια νερού ή λόγω άλλων διαβρωτικών παραγόντων). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι *encapsulation*.

3.4 Θερμοφωτοβολταϊκά Στοιχεία (TPV)

Μέσω της διαρκούς αναζήτησης βελτίωσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, η θερμοβολταϊκή τεχνολογία μπήκε στο στόχαστρο της ακαδημαϊκής μελέτης. Ένα θερμοβολταϊκό στοιχείο αποτελεί ένα καινοτόμο σύστημα μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της καύσης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εναλλαγή αυτή πραγματοποιείται μέσω του συστήματος του Σχήματος 45. Τα βασικά μέρη ενός θερμοφωτοβολταϊκού συστήματος είναι μια πηγή θερμότητας (P_{in}), ένας εκπομπός (*Emitter*), ένα φίλτρο (*Filter*) και μια διάταξη φωτοβολταϊκών κελιών (*PV Cells*).



Σχήμα 45: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας TPV

Στο Σχήμα 45 επίσης παρουσιάζεται το σύστημα προθέρμανσης της διάταξης ($HX - A$), που χρησιμοποιεί τα προϊόντα της καύσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας $HX - PV$ και $HX - CP$ είναι τα σημεία που πραγματοποιείται η παραγωγή θερμότητας του συστήματος και οι οποίοι ανακτούν της θερμότητα μέσα από την ψύξη των ηλιακών κελιών και τα αέρια παράγωγα της καύσης.

Μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα του θερμοβολταϊκού συστήματος είναι:

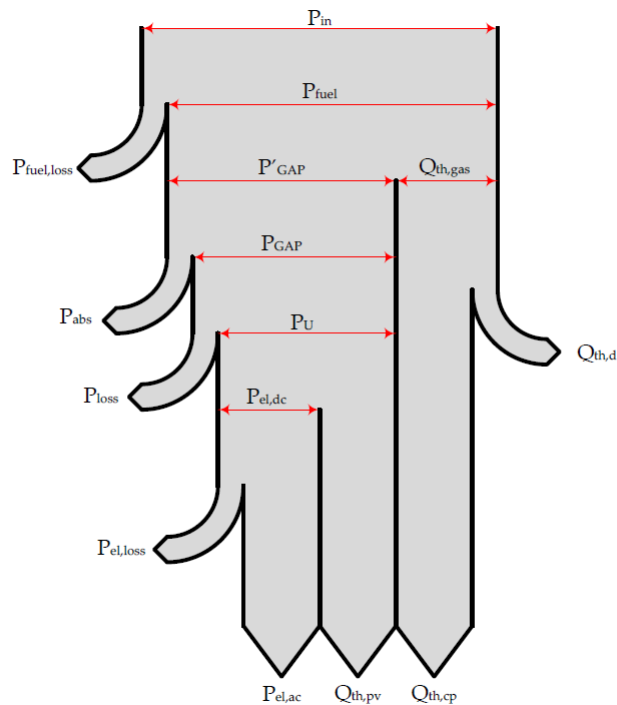
- ο υψηλός συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμων, καθώς γίνεται ανάκτηση του μεγαλύτερου μέρους των θερμικών απωλειών, καθιστώντας το σύστημα ικανό τόσο για χρήση παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, όσο και για παραγωγή θερμότητας
- χαμηλός βιομηχανικός θόρυβος, λόγω της απουσίας κινούμενων μερών
- εύκολη συντήρηση, όμοια με κοινούς λέβητες
- μεγάλη ευελιξία καυσίμων

Με βάση τα παραπάνω, οι πηγές θερμότητας για ένα TPV σύστημα μπορούν από μια ευρεία ομάδα καυσίμων, όπως ορυκτά καύσιμα (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο), στερεά αστικά απόβλητα, πυρηνικά

καύσιμα. Ένα *TPV* σύστημα έχει πολύ μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο (π.χ. CO , NO_x), επειδή στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται χρήση συσκευών καύσης, όπως οι κοινοί λέβητες.

Η κύρια χρήση των θερμοφωτοβολταϊκών συστημάτων είναι είτε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε η παραγωγή θερμότητας. Όμως, με την περαιτέρω μελέτη της έχει βρει εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε τομείς της βιομηχανίας με αυξημένες ενεργειακές ανάγκες. Επίσης, τα συστήματα αυτά έχουν προταθεί για χρήση ως φορητές γεννήτριες, συστήματα συμπαραγωγής ενέργειας και ηλιακές μονάδες ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, περαιτέρω έρευνα πάνω στα *TPV* συστήματα πραγματοποιείται σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές.

Οι πρώτες ερευνητικές μελέτες στα *TPV* πραγματοποιήθηκαν στην αρχή της δεκαετίας του 1960, όμως μόλις την τελευταία δεκαετία είχαμε σημαντική αξιοποίηση και συστηματική έρευνα σε αυτή τη τεχνολογία. Η απόδοση που προσφέρουν τα συστήματα *TPV* κυμαίνεται σε ένα εύρος 0.6% - 11% με την προοπτική αύξησης μέχρι 24% στο μέλλον.



Σχήμα 46: Ισορροπία ενέργειας *TPV*

3.5 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία με την χρήση νανοτεχνολογίας

Η σημερινή τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πολύ δύσκολο να ανταγωνιστεί τα ορυκτά καύσιμα ή τις μεγάλες ηλεκτρικές παραγωγικές μονάδες. Η μικρή απόδοση που παρουσιάζουν καθώς και το υψηλό κόστος παραγωγής καθιστούν αδύνατη την εμπορική κυριαρχία τους, αλλά η χρήση της νανοτεχνολογίας θεωρείται πολλά υποσχόμενη για την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

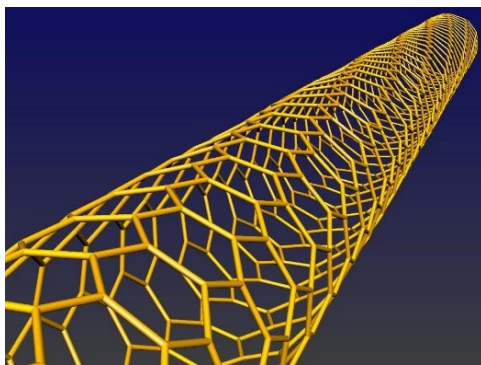
Η νανοτεχνολογία είναι η επιστήμη που στηρίζονται αυτή τη στιγμή τα φωτοβολταϊκά 3ης γενιάς, ώστε να συμπίεσουν σημαντικά το κόστος παραγωγής και να αυξήσουν την απόδοσή τους.

Άλλες θετικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα ηλιακά κελιά αυτής της τεχνολογίας είναι τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά τους καθώς και το χαμηλό βάρος. Οι νανοδομές χαρακτηρίζονται βάσει των διαστάσεων που χρησιμοποιούν. Ειδικότερα, υπάρχουν τα νανοδομημένα διαχυτα υλικά (*Nanostructured Bulk Materials*) (3D), κβαντικά πηγάδια (*Quantum Wells*) (2D), ανθρακούχοι νανοσωλήνες και νανოსύρματα (*Carbon Nanowires – Nanotubes*) (1D) και κβαντικές κηλίδες (*Quantum Dots*) (0D).

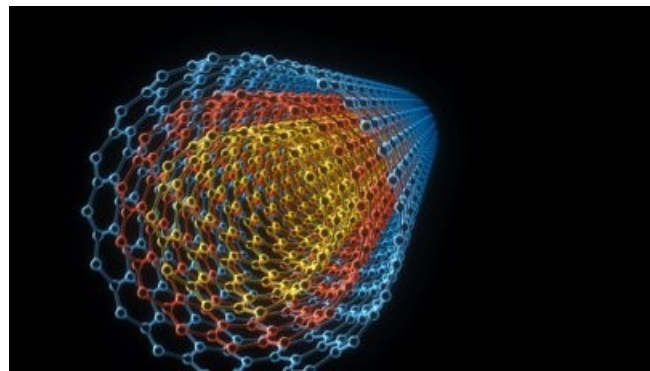
Τα νανοδομημένα διάχυτα υλικά ήταν ανάμεσα στα πρώτα υλικά σε επίπεδο νανοκλίμακας που μελετήθηκαν, κυρίως λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους που βάσει του νόμου *Hall – Petch* έχουν όριο αντοχής αντιστρόφως ανάλογο με το μέγεθός τους. Επίσης, τα υλικά αυτά δεν παρουσίαζαν τους περιορισμούς των περισσότερων γνωστών τεχνολογιών, κυρίως λόγω της ικανότητας του ελέγχου του ενεργειακού διακένου. Τα νανοδομημένα υλικά (*Al, Ni* κ.ά.) και τα κεραμικά (οξειδία, νιτρίδια, καρβίδια κ.ά.) που επιλέχθηκαν παράχθηκαν με διάφορες μεθόδους όπως χημική σύνθεση νανο – σκόνης ακολουθούμενη από πυροσυσσωμάτωση.

3.5.1 *Carbon nanotubes (CNT)*

Η δομή των ανθρακούχων νανοσωλήνων αποτελείται από πλέγματα διατεταγμένα σε εξαγωνικό σχήμα, παρουσιάζοντας παράλληλα εξαιρετικές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Η διάταξη στο χώρο μπορεί να αναπαρασταθεί σαν πίνακας n γραμμών και m στηλών, οι οποίες καθορίζουν την ανάπτυξη του γραφενίου στον χώρο. Οι νανοσωλήνες διακρίνονται σε μεταλλικούς και ημιαγωγίμους και ανήκουν είτε στους νανοσωλήνες μονού τοιχώματος (*single walled*), είτε στους νανοσωλήνες πολλών τοιχωμάτων (*multi walled*), οι οποίοι αποτελούνται από δομές έκκεντρων σωλήνων.



(α')



(β')

Σχήμα 47: Τυπική δομή *Carbon nanotubes*

Η επιλογή τους σαν αξιόπιστο φωτοευαίσθητο υλικό στηρίζεται στα πλεονεκτήματα που εμφανίζει σαν ένωση $p - n$. Συγκεκριμένα, οι νανοσωλήνες επικαλύπτονται από ειδικά ημιαγωγίμια υλικά, ώστε να δημιουργηθούν οι επαφές p και n . Η ένωση $p - n$ που προκύπτει εμφανίζει μεγαλύτερη επιφάνεια, επομένως έχουμε περισσότερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.

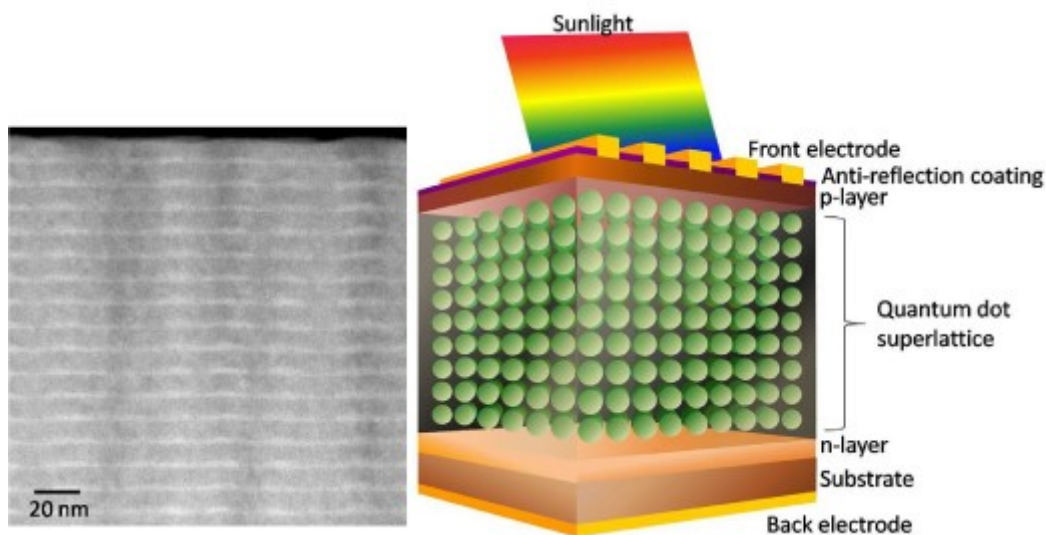
Η εφαρμογή των νανοσωλήνων σήμερα περιορίζεται στη χρήση τους σαν διαφανή ηλεκτρόδια σε πολυμερικά ηλιακά κελιά βελτιώνοντας την απόδοσή τους. Ακόμα, ερευνητικές ομάδες εργάζονται στην δημιουργία ηλιακών κελιών με νανοδομημένα υλικά από *CdSe* και *CdTe*. Η απόδοση των κελιών

κυμαίνεται ανάμεσα στο 3 με 4%, η οποία αναμένεται να αυξηθεί λόγω της εντατικής έρευνας στον συγκεκριμένο τομέα.

3.5.2 Quantum Dots (QD)

Οι χβαντικές κηλίδες αποτελούν την βάση για τη δημιουργία ενός ειδικού ημιαγωγικού συστήματος, το οποίο είναι συνδυασμός υλικών από ομάδες του περιοδικού πίνακα διατεταγμένες σε διάφορες μορφές σε κλίμακα νανομέτρων. Τα ηλιακά κελιά παρουσιάζουν ρυθμιζόμενο ενεργειακό διάκενο. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με μεγάλο ενεργειακό διάκενο απορροφούν μεγαλύτερη ποσότητα φωτός δημιουργώντας μεγαλύτερη τάση εξόδου, ενώ στοιχεία με μικρό ενεργειακό διάκενο παράγουν περισσότερο ρεύμα και μικρότερη τάση εξόδου.

Κύριο χαρακτηριστικό των χβαντικών κηλίδων είναι η αποδοτικότητα που παρουσιάζουν στην απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα μεγάλο εύρος των φασμάτων εκπομπής. Για αυτό το λόγο οι ερευνητές στοχεύουν στην αύξηση της αποδοτικότητας των παραγόμενων ηλιακών κελιών αυτού του τύπου. Η σχεδίαση της διάταξης στηρίζεται σε μια τρισδιάστατη μορφή, η οποία επιμηκύνει την ζωή των ζευγών οπών – ηλεκτρονίων, τα οποία συλλέγουν και μεταφέρουν τους θερμούς φορείς (*hot carriers*) για την παραγωγή υψηλότερης τάσης.



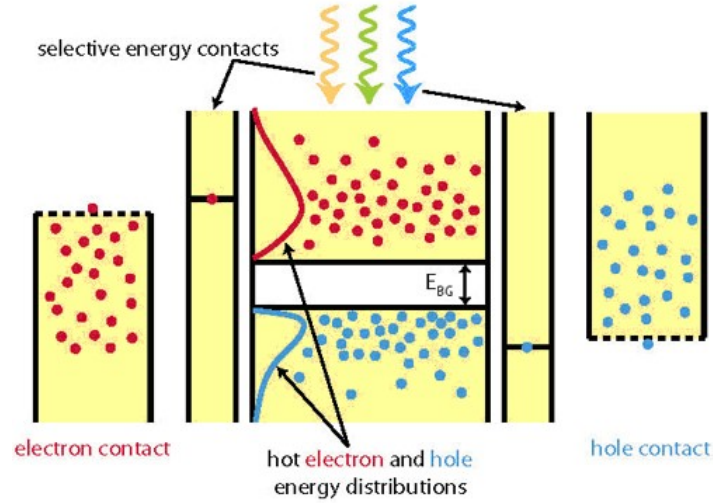
Σχήμα 48: Τυπική δομή *Quantum Dots*

Η τεχνολογία των χβαντικών κηλίδων έχει εφαρμοστεί σε αρκετά ημιαγωγικά υλικά. Τα αποτελέσματα αφορούσαν κυρίως την χρήση του *GaAs*, το οποίο αν και παρουσίαζε καλύτερα αποτελέσματα στην έξοδο, ήταν ακριβότερο σε σύγκριση με ημιαγωγούς πυριτίου.

3.5.3 Hot carrier solar cell (HC)

Η τεχνική των θερμών φορέων είναι μια απαιτητική μέθοδος για την αύξηση της απόδοσης των ηλιακών κελιών. Αυτό οφείλεται στην χρήση επιλεκτικών επαφών ενέργειας, οι οποίες απορροφούν ενέργειες φωτονίων πριν το σημείο που μετατρέψουν την επιπλέον ενέργεια σε θερμότητα. Πιο συγκεκριμένα, οι θερμοί φορείς πρέπει να συλλεχθούν από τον απορροφητή, από ένα μικρό

ενεργειακό εύρος μέσω επιλεγμένων επαφών. Οι αποδόσεις στοιχείων αυτής της τεχνολογίας είναι ~65%, μεγαλύτερη τόσο από τα στοιχεία πυριτίου, όσο και από τα στοιχεία που βασίζονται στην μέθοδο *QD*. Αυτό οφείλεται στη χρήση μη τοξικών υλικών, που μειώνουν τις απώλειες της ηλιακής ακτινοβολίας και την αποδοτικότερη λειτουργία σε μεγαλύτερη θερμοκρασία των φορέων.



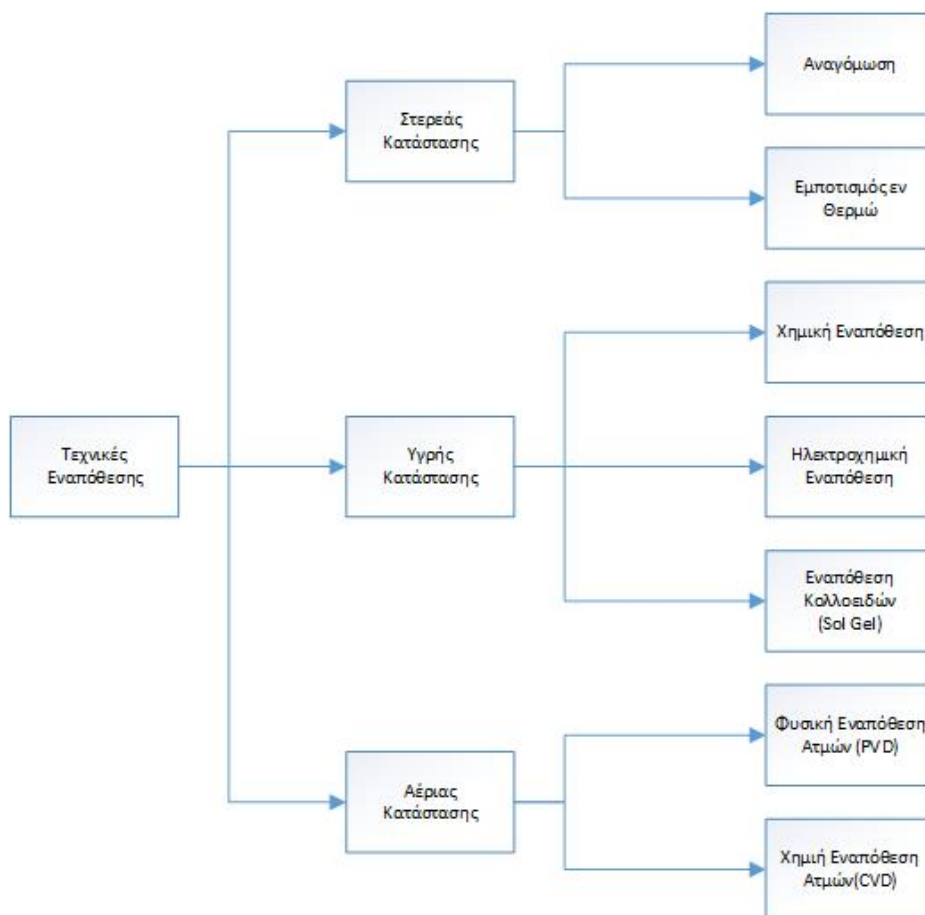
Σχήμα 49: Τυπική δομή *Hot carrier solar cell*

4 Μέθοδοι εναπόθεσης και ανάπτυξη λεπτών υμενίων και εγχάραξης

4.1 Τεχνικές εναπόθεσης

Οι τεχνικές εναπόθεσης θεωρούνται ο κυριότερος παράγοντας για την ανάπτυξη συσκευών, όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι οποίοι στηρίζονται σε μικροηλεκτρονικές συσκευές που παράχθηκαν με την μέθοδο εναπόθεσης λεπτών υμενίων. Λόγω της ζήτησης υμενίων αυξημένης ποιότητας, υπήρξε μεγάλη πρόοδος και βελτίωση στις διαδικασίες και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται κατά την παραγωγική διαδικασία. Ένας επιπλέον παράγοντας για την μαζική χρήση αυτής της τεχνολογίας ήταν η περαιτέρω κατανόηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των υμενίων, των επιφανειών και της μικροδομής τους.

Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τις επιφανειακές κατεργασίες, στις οποίες το υλικό διαφορετικής σύστασης από το αντικείμενο επικάλυψης (υπόστρωμα/*substrate*) εναποτίθεται σχηματίζοντας επιπρόσθετο στρώμα, το οποίο καλείται επίστρωμα (*coating*). Οι διαδικασίες εναπόθεσης γίνονται σε αντιδραστήρες, στους οποίους υπάρχουν το υπόστρωμα και το υλικό επικάλυψης εισέρχεται με την μορφή ατμών, υδατικών διαλυμάτων ή τήγματος. Οι τεχνικές διακρίνονται με βάση το επιθυμητό πάχος του τελικού τεμαχίου. Για επιστρώματα λεπτού πάχους (<5 μm) χρησιμοποιούνται οι τεχνικές εναπόθεσης ατμών, ενώ για επιστρώματα μεγάλου πάχους οι τεχνικές στερεάς κατάστασης (>200 μm). Τέλος, για ενδιάμεσα πάχη χρησιμοποιούνται οι τεχνικές υδατικών διαλυμάτων (20 – 80 μm).



Σχήμα 50: Κύριες μέθοδοι εναπόθεσης

Η κατηγοριοποίηση είναι η εξής:

- Χημική Εναπόθεση
- Φυσική Εναπόθεση

Γενικότερα, οι τεχνικές εναπόθεσης λεπτών υμενίων στηρίζονται σε καθαρά φυσικές ή χημικές διεργασίες. Σπανιότερα, εμφανίζονται τεχνικές που χρησιμοποιούν συνδυασμό διεργασιών (*glow discharge – reactive sputtering*) και κατατάσσονται ως φυσικοχημικές διεργασίες.

Η φυσική εναπόθεση καλύπτει όλες τις τεχνικές εναπόθεσης που στηρίζονται στην ατμοποίηση, μεταφορά και εναπόθεσή του σε κατάλληλο υπόστρωμα με φυσικό τρόπο. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως Φυσική Εναπόθεση Ατμών (*Physical Vapor Deposition* ή *PVD*). Αντιθέτως, όταν για την ατμοποίηση του υλικού εναπόθεσης πρέπει να λάβουν χώρα χημικές διεργασίες, τότε η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως Χημική Εναπόθεση Ατμών (*Chemical Vapor Deposition* ή *CVD*).

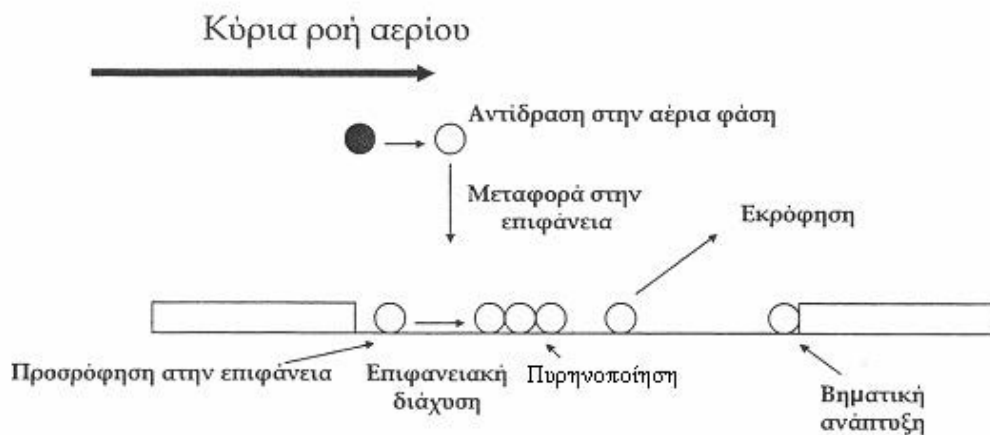
Ανάμεσα στους παράγοντες που διακρίνουν την μέθοδο *PVD* από την *CVD* είναι:

- Η απουσία χημικών αντιδράσεων στην αέρια φάση του αρχικού υλικού και στην επιφάνεια του υποστρώματος
- Οι φυσικοί μηχανισμοί, με τους οποίους το υλικό μεταπηδά στην αέρια φάση
- Η μικρότερη πίεση που υπάρχει στο σύστημα, η οποία ευνοεί την μεταφορά των αερίων

4.2 Χημική Εναπόθεση Ατμών (*CVD*)

Η μέθοδος *CVD* αποτελεί μια πολύ διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής ημιαγωγών και λεπτών υμενίων. Η πλειοψηφία των εφαρμογών αυτής της τεχνικής είναι η δημιουργία επιστρωμάτων σε κατάλληλες επιφάνειες, αλλά και η παραγωγή συμπαγών υλικών υψηλής καθαρότητας, καθώς και σύνθετων υλικών. Στο Σχήμα 8 φαίνεται ότι η πλειονότητα των στοιχείων του Περιοδικού Πίνακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τις τεχνικές *CVD*, είτε ως συνδυασμός στοιχείων, είτε μόνα τους.

Κατά την χημική εναπόθεση ατμών, οι ατμοί των επιθυμητών υλικών παράγονται μέσω χημικών αντιδράσεων και μεταφέρονται διαμέσου του θαλάμου στο υπόστρωμα, όπου και προκαλείται συμπύκνωση τους.



Σχήμα 51: Βασικές Διεργασίες κατά τη χημική εναπόθεση από ατμό

Οι τεχνικές *CVD* παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνικών. Το κυριότερο χαρακτηριστικό είναι η ομοιομορφία που παρουσιάζει το πάχος του υμενίου κατά μήκος του, για αυτό το λόγο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πολύπλοκων σχημάτων υμενίων. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η μεγάλη καθαρότητα που παρουσιάζουν τα παραγόμενα υμένια, μέσω της απομάκρυνσης των ακαθαρσιών με κατάλληλη τεχνικές απόσταξης. Τέλος, οι τεχνικές *CVD* παρουσιάζουν μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης και δεν χρειάζονται απόλυτο κενό για να πραγματοποιηθούν.

Από την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι αυτές εμφανίζουν αρνητικά σημεία, που σχετίζονται κυρίως με τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές και τις ιδιότητές τους. Αρχικά, οι πρόδρομες ουσίες που χρησιμοποιούνται για χημική αντίδραση ονομάζονται πρόδρομα υλικά (*precursors*). Αυτά τα υλικά μπορεί να είναι πολύ τοξικά, εκρηκτικά ή διαβρωτικά. Επίσης, μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας μπορούν να παρουσιάζουν και τα παραπροϊόντα των αντιδράσεων. Σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας είναι το κόστος αρκετών πρόδρομων υλικών.

Οι τεχνικές *CVD* εμφανίζουν διάφορες παραλλαγές που χρησιμοποιούνται ευρέως. Ο γενικός διαχωρισμός στηρίζεται στην αρχική χημική αντίδραση που ξεκινάει την διεργασία, καθώς και στις συνθήκες του περιβάλλοντος της διεργασίας. Μερικές από αυτές είναι:

- Κατάταξη με βάση την πίεση λειτουργίας
 - *CVD* ατμοσφαιρικής πίεσης (*Atmospheric pressure CVD* ή *APCVD*)
 - *CVD* χαμηλής πίεσης (*Low – pressure CVD* ή *LPCVD*)
 - *CVD* υπερυψηλού κενού (*Ultrahigh vacuum CVD* ή *UHV CVD*)
- Κατάταξη με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του ατμού
 - *CVD* με υποβοηθούμενο αερόλυμα (*Aerosol assisted CVD* ή *AACVD*)
 - *CVD* με απευθείας έγχυσης υγρού (*Direct liquid injection CVD* ή *DLICVD*)
- Μέθοδοι πλάσματος
 - *CVD* με χρήση πλάσματος μικροκυμάτων (*Microwave plasma–assisted CVD* ή *MPCVD*)
 - *CVD* με χρήση ενισχυμένου πλάσματος (*Plasma – Enhanced CVD* ή *PECVD*)
 - *CVD* με χρήση απομακρυσμένου ενισχυμένου πλάσματος (*Remote plasma–enhanced CVD* ή *RPECVD*)
- *CVD* ατομικού στρώματος (*Atomic – layer CVD* ή *ALCVD*)
- *CVD* απόθεσης χημικού ατμού καύσης (*Combustion Chemical Vapor Deposition* ή *CCVD*)
- *CVD* θερμού καλωδίου (*Hot filament CVD* ή *HFCVD*)
- Εναπόθεση υβριδικού φυσικο-χημικού ατμού (*Hybrid Physical–Chemical Vapor Deposition* ή *HPCVD*)
- Εναπόθεση χημικών μεταλλοργανικών ατμών (*Metalorganic chemical vapor deposition* ή *MOCVD*)
- Ταχείας θέρμανσης *CVD* (*Rapid thermal CVD* ή *RTCVD*)
- Επιταξία ατμών (*Vapor – phase epitaxy* ή *VPE*)

4.3 Φυσική Εναπόθεση Ατμών (*PVD*)

Κατά την μέθοδο της *PVD* παράγονται συμπυκνωμένοι ατμοί με φυσικούς τρόπους, οι οποίοι με κατάλληλες τεχνικές εναποθέτονται σε κατάλληλο υπόστρωμα για τον σχηματισμό λεπτών υμενίων. Οι ατμοί μπορούν να δημιουργηθούν είτε με θέρμανση του υλικού μέσω σύρματος πυρακτώσεως, είτε με δέσμη ηλεκτρονίων, είτε ακόμα με τη μέθοδο του *sputtering*.

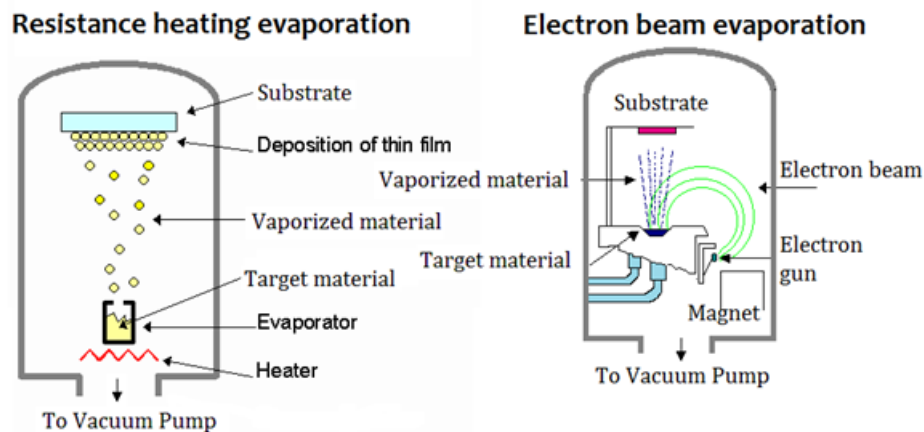
Η διαδικασία παραγωγής *PVD* περιλαμβάνει τα εξής κύρια στάδια:

- Το στερεό υλικό που θέλουμε να εναποτεθεί, ατμοποιείται με φυσικό τρόπο
- Το υλικό στην αέρια φάση μεταφέρεται από την πηγή στο υπόστρωμα, μέσα από μια περιοχή χαμηλής (ή μηδενικής) πίεσης
- Το υλικό με την μορφή ατμών εναποτίθεται στο υπόστρωμα με τη διαδικασία της συμπύκνωσης και σχηματίζεται το λεπτό υμένιο

Οι τεχνικές *PVD* διακρίνονται με βάση το περιβάλλον που λαμβάνουν χώρα. Ειδικότερα, διακρίνονται σε τεχνικές που πραγματοποιούνται υπό κενό και σε τεχνικές με περιβάλλον πλάσματος.

4.3.1 Εξάχνωση υπό Κενό (*Vacuum Evaporation*)

Οι τεχνικές της εξάτμισης ή της εξάχνωσης είναι ευρέως διαδεδομένες για την παραγωγή λεπτών υμενίων. Κύριο χαρακτηριστικό της διεργασίας είναι η ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών στον θάλαμο εναπόθεσης που βρίσκεται υπό κενό.



Σχήμα 52: Σχηματική αναπαράσταση θερμικής εναπόθεσης υπό κενό(Αριστερά:Με θέρμανση μέσω αντίστασης. Δεξιά: Με δέσμη ηλεκτρονίων)

Η εναπόθεση πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

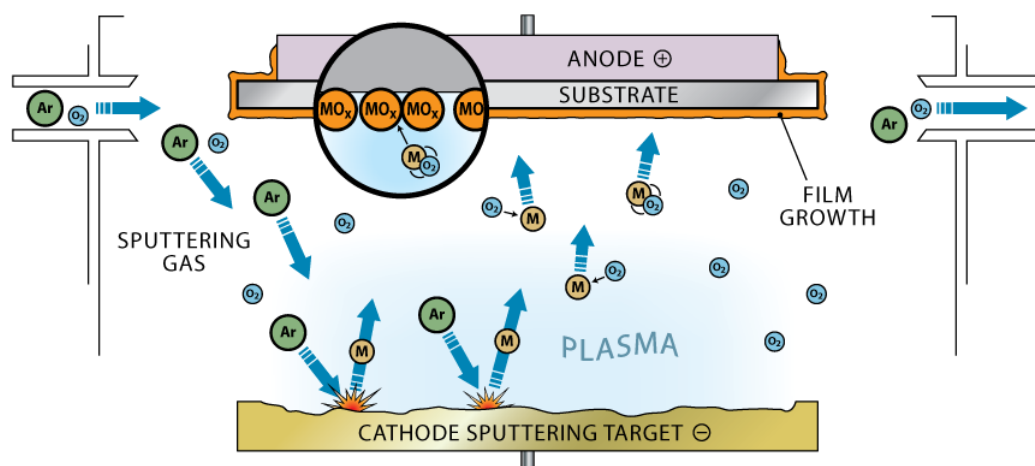
- Αρχικά, δημιουργείται κενό στον θάλαμο εναπόθεσης (πιέσεις μικρότερες των 10^{-3} Pa).
- Με τη βοήθεια ωμικών αντιστάσεων ή με δέσμη ηλεκτρονίων, το επιθυμητό υλικό εξαχνώνεται.
- Οι ατμοί του υλικού κινούνται στον θάλαμο εναπόθεσης προς το υπόστρωμα, όπου και συμπυκνώνονται στην επιφάνειά του, μεταφέροντας σε αυτό την ενέργεια τους και αυξάνοντας παράλληλα την θερμοκρασία του ($\sim 500^{\circ}\text{C}$).

Τα στοιχειώδη σωματίδια του υλικού έχουν κινητική ενέργεια ίση με την θερμοκρασία του θαλάμου και όταν κινούνται στο κενό δεν συγκρούονται, αλλά έχουν ευθύγραμμες τροχιές. Η κίνηση τους στο υπόστρωμα γίνεται με τυχαίο τρόπο, ενώ η στερεοποίηση ευνοείται, όπου υπάρχουν κρυσταλλικές ατέλειες ή ακαθαρσίες, δηλαδή σημεία έναρξης πυρηνοποίησης. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η απλή και οικονομική διάταξη, καθώς και οι υψηλοί ρυθμοί εναπόθεσης που την χαρακτηρίζουν. Αντιθέτως, κύριο μειονέκτημα είναι ο ελλιπής έλεγχος στοιχειομετρίας.

4.3.2 Ιοντοβολή (*Sputtering*)

Η τεχνική της ιοντοβολής (*Sputtering*) είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη εμπορική μη θερμική τεχνική εναπόθεσης. Κύρια εφαρμογή έχει στην δημιουργία ημιαγωγικών στρωμάτων σχετικά μεγάλου πάχους και υλικών που είναι δύσκολο να παραχθούν με τις χημικές μεθόδους (*CVD*). Σε αντίθεση με την εξάχνωση υπό κενό, η τεχνική αυτή λαμβάνει χώρα σε θάλαμο εν ψυχρώ με παρουσία ακτινοβολούντος πλάσματος.

Το φαινόμενο *Sputtering* είναι ο βομβαρδισμός μιας επιφάνειας στερεού με επιταχυνόμενα ιόντα, τα οποία προκαλούν οπισθοσκέδαση στα άτομα της επιφάνειας του στερεού λόγω των κρούσεων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 53, το υλικό τοποθετείται στο θάλαμο με την μορφή δίσκου σε στερεή κατάσταση και συνδέεται με ψυχόμενο ηλεκτρόδιο που αποτελεί και την κάθοδο. Το υπόστρωμα βρίσκεται απέναντι από την κάθοδο και αποτελεί την άνοδο. Στο θάλαμο εισέρχεται αδρανές αέριο, συνήθως αργό, και στην κάθοδο εφαρμόζεται αρνητική τάση.



Σχήμα 53: Αρχή λειτουργίας ιοντοβολής

Με την εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης (της τάξεως kV) στην κάθοδο, το αδρανές αέριο ιονίζεται και σχηματίζεται το ηλεκτρικό αγώγιμο νέφος (πλάσμα). Εν συνεχεία, τα θετικά ιόντα του πλάσματος έλκονται από την κάθοδο και βομβαρδίζουν το υλικό, προκαλώντας την διάσπαση στοιχειωδών σωματιδίων. Τα σωματίδια είτε αυτούσια, είτε σε μορφή ένωσης με το αέριο του πλάσματος κινούνται προς την άνοδο, όπου και δημιουργούν το επίστρωμα. Παράγοντες που επηρεάζουν την μικροδομή του επιστρώματος είναι η θερμοκρασία του υποστρώματος και η πίεση του αδρανούς αερίου.

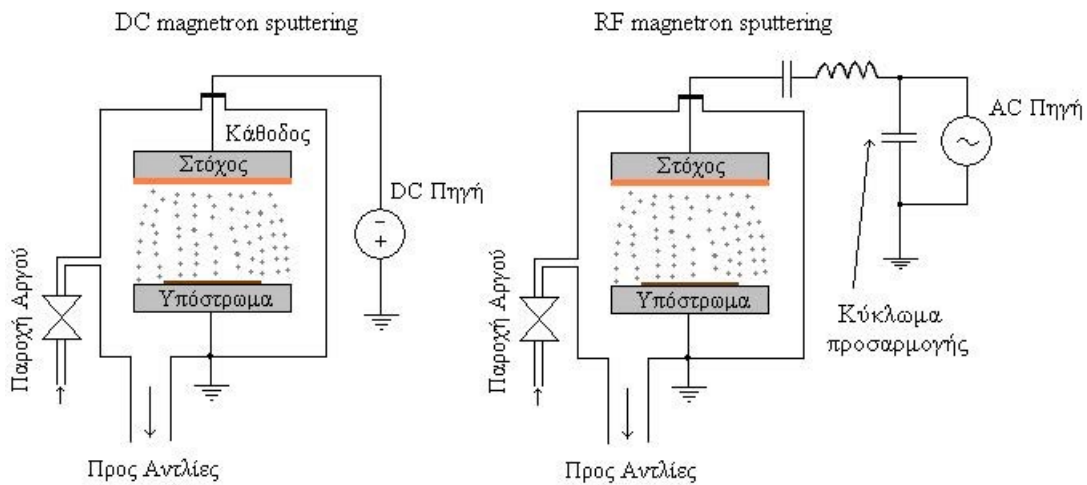
Ανάλογα με τις συνθήκες της ενεργειακής ανταλλαγής, παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι συστημάτων εναπόθεσης με την τεχνική *sputtering*. Οι κυριότεροι είναι:

- DC Sputtering
- RF Sputtering
- Magnetron Sputtering

Τα συστήματα *sputtering* διακρίνονται σε *DC* και *RF*. Τα πρώτα χρησιμοποιούνται όταν το υλικό

εναπόθεσης είναι αγωγίμο και γίνεται χρήση συνεχούς ρεύματος. Για την παραγωγή υμενίων από μονωτικά υλικά επιλέγεται η τεχνική *RF Sputtering*, λόγω των υψηλών τάσεων που απαιτούνται κατά την *DC Sputtering*. Η αρχή λειτουργίας στηρίζεται στην εφαρμογή μικρής εναλλασσόμενης τάσης στην περιοχή των ραδιοκυμάτων ($\sim 13.5\text{MHz}$).

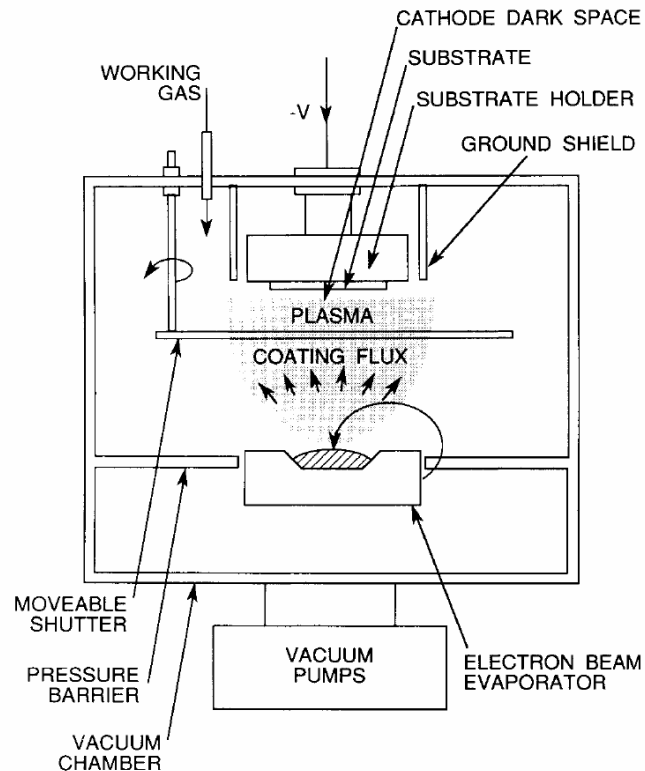
Τέλος, η μέθοδος *Magnetron Sputtering* είναι παραλλαγή της *DC Sputtering* και βρίσκει εφαρμογή, σε σημεία χαμηλής απόδοσης της δεύτερης. Ειδικότερα, με τη χρήση μαγνητικού πεδίου επιτυγχάνουμε τον ιοντισμό των ατόμων του αερίου του πλάσματος σε μια συγκεκριμένη περιοχή, κάτι που επιφέρει και αύξηση της ομοιομορφίας του τελικού υμενίου. Η βελτιωμένη αυτή τεχνική παρουσιάζει μεγαλύτερους ρυθμούς εναπόθεσης έναντι της αρχικής, καθώς και μικρότερη τάση λειτουργίας και μικρότερη πίεση στο αδρανές αέριο, το οποίο βοηθάει στην επιμήκυνση της ζωής του συστήματος αντλιών κενού.



Σχήμα 54: Απλοποιημένα διαγράμματα *DC* και *RF magnetron sputtering*. Η κυκλωματική διαφορά των δύο συσκευών βρίσκεται στο κύκλωμα προσαρμογής της *RF* μονάδας

4.3.3 Ιοντική Επιμετάλλωση (*Ion Plating*)

Η ιοντική επιμετάλλωση είναι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται επίστρωση σε κλίμακα ατόμων υπό κενό. Η επιφάνεια του υποστρώματος πολώνεται αρνητικά σε τάση έως 5kV και υπόκειται σε βομβαρδισμό από ιόντα ευγενούς αερίου για αρκετό χρόνο, ώστε να καθαρισθεί η επιφάνεια του. Στη συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία εναπόθεσης από την πηγή εξάχνωσης, χωρίς να διακοπεί η προηγούμενη διαδικασία της οποίας ο ρυθμός “*sputtering*” πρέπει προφανώς να είναι μικρότερος από αυτόν της αποδόμησης λόγω του βομβαρδισμού από τα ιόντα αερίου.



Σχήμα 55: Τυπική διάταξη ιοντικής επιμετάλλωσης

Ο βομβαρδισμός επηρεάζει την πυρηνοποίηση, την ανάπτυξη, καθώς και τις ιδιότητες του επιστρώματος. Μόλις σχηματισθεί η διεπιφάνεια μεταξύ του μενίου και του υποστρώματος ο βομβαρδισμός μπορεί να διακοπεί ή και να συνεχισθεί. Σαν αποτέλεσμα έχουμε καλύτερη πρόσφυση του μενίου στο υπόστρωμα και μεγαλύτερη ενέργεια των ατόμων στην επιφάνεια του υποστρώματος ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη κάλυψη βήματος πέρα από την “γραμμή οπτικής επαφής” (*line-of-sight*).

Σημαντική ιδιότητα των μενίων που παράγονται με τη συγκεκριμένη τεχνική και παίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές είναι η καλή σύμφυση τους με το υπόστρωμα εξαιτίας του συνεχούς βομβαρδισμού από ιόντα που απομακρύνει πολλά άτομα της επιφάνειας του υποστρώματος. Η ιοντική επιμετάλλωση χρησιμοποιείται για την εναπόθεση μετάλλων και κραμάτων αυτών όπως του τιτανίου, αργιλίου, χαλκού, χρυσού και παλλαδίου. Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται για την παραγωγή θαλάμων ακτίνων Q ($X - Ray$ tubes), παρεμβυσμάτων από αργίλιο για θαλάμους κενού, διακοσμητικών ειδών, εξαρτημάτων για αεροδιαστημικές εφαρμογές κ.α.

4.3.4 Παλμική Εναπόθεσης με χρήση Laser (*Pulsed Laser Deposition* ή *PLD*)

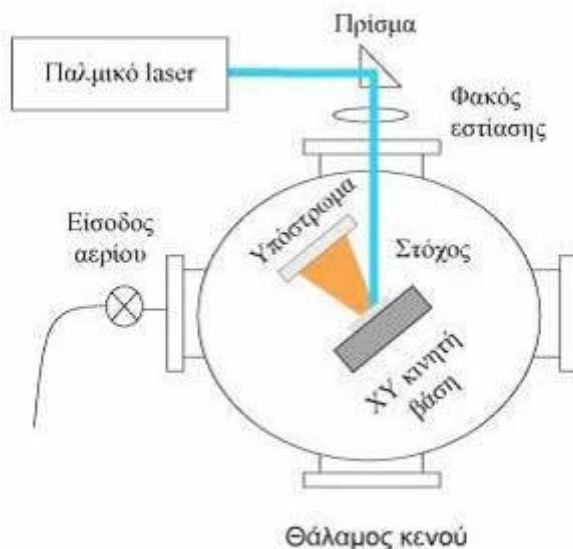
Παλμική Εναπόθεση με χρήση Laser (*Pulsed Laser Deposition* ή *PLD*) είναι μια τεχνική δημιουργίας παραγωγής λεπτών μενίων, κατά την οποία χρησιμοποιείται υψηλής ισχύος παλμικό laser, εστιασμένο στο υλικό στόχο που θέλουμε να διασπαστεί, σε συνθήκες κενού. Η τεχνική *PLD* ανακαλύφθηκε και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1965 για την παραγωγή ημιαγωγών και διηλεκτρικών λεπτών μενίων από τους *Smith* και *Turner* και μέσω της περαιτέρω μελέτης του *Dijkkamp* και της ομάδας του καθιερώθηκε το 1987 για την παραγωγή υπεραγωγών.

Αρχή Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας της *PLD*, σε αντίθεση με την απλότητα της διάταξης, στηρίζεται σε πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα. Ως τέτοια θεωρούνται, οι φυσικές διεργασίες της αλληλεπίδρασης του στόχου με το *laser*, ο σχηματισμός του πλάσματος λόγω της αποικοδόμησης του στόχου, η μεταφορά του υλικού διαμέσου του πλάσματος και η εναπόθεση του στο υπόστρωμα, καθώς και η διαδικασία σχηματισμού του λεπτού υμενίου. Η τεχνική χωρίζεται σε 4 βασικά στάδια:

1. Αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας του *laser* με το υλικό – στόχο
2. Δυναμική αποικοδόμηση του υλικού
3. Συμπεριφορά πλάσματος
4. Σχηματισμός λεπτού υμενίου

Μια τυπική διάταξη *PLD* φαίνεται στο Σχήμα 56. Σε θάλαμο υπερυψηλού κενού (*UHV*) τοποθετούνται υλικά – στόχοι σε στοιχειώδη ή κραματούχα μορφή. Σε γωνία 45° ως προς τον στόχο τοποθετείται το εστιασμένο παλμικό *laser*. Το υπόστρωμα βρίσκεται σε μικρή απόσταση από τον δίσκο του στόχου και με την βοήθεια του πλάσματος που δημιουργείται, τα σωματίδια μεταφέρονται και γίνεται η εναπόθεση τους σε αυτό. Συνήθως, το υπόστρωμα βρίσκεται παράλληλα της επιφάνειας του στόχου και σε απόσταση 2 έως 10 *cm*. Το υπόστρωμα μέσω κατάλληλης διάταξης θερμαίνεται ομοιόμορφα. Παραλλαγές της μεθόδου αυτής, εμφανίζουν περιστροφικές διατάξεις, τόσο στον στόχο, για ομοιόμορφη αποικοδόμηση, όσο και στο υπόστρωμα για ομοιόμορφη εναπόθεση.



Σχήμα 56: Τυπική διάταξη *PLD*

Αλληλεπίδραση Laser – Στόχου

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο βομβαρδισμός ενός υλικού με ιόντα προκαλεί διάσπαση του υλικού σε ατομικά σωματίδια. Ομοίως, και στην τεχνική *PLD* εμφανίζεται η ίδια διάσπαση με πηγή ενέργειας το παλμικό *laser* και ειδικότερα τα φωτόνια που εκπέμπει (*pulsed photons*). Η βασικότερες διαφορές είναι η υψηλότερη ροή ενέργειας και οι συχνότητες των παλμών. Οι μηχανισμοί κατά την μεταφορά της ενέργειας είναι οι κύριοι (*primary*) και οι δευτερεύοντες

(secondary). Οι κύριοι μηχανισμοί διάσπασης διακρίνονται σε:

1. Θερμικός (*Thermal Sputtering*)
2. Ηλεκτρονικός (*Electronic Sputtering*)
3. Αποφλοιωτικός (*Exfoliation Sputtering*)
4. Υδροδυναμικός (*Hydrodynamic Sputtering*)
5. Λόγω συγκρούσεων (*Collisional Sputtering*)

Θερμικός θρυμματισμός

Στην πραγματικότητα συμβαίνει εξάχνωση του υλικού του στόχου ως αποτέλεσμα της τοπικής θέρμανσης που προκαλεί η δέση του *laser*. Ο θερμικός θρυμματισμός του στόχου συχνά προϋποθέτει, η θερμοκρασία του να είναι πάνω από το σημείο ζέσεως και να διατηρείται εκεί μέχρι να είναι εφικτή η αποδόμηση του.

Ηλεκτρονικός θρυμματισμός

Ο ηλεκτρονικός θρυμματισμός περιλαμβάνει διάφορες διαδικασίες, οι περισσότερες εκ των οποίων αφορούν κάποιο είδος διέγερσης ή ιονισμού. Τα φωτόνια της δέσης του *laser* δημιουργούν ένα αρκετά ισχυρό ηλεκτρικό φορτίο με αποτέλεσμα ορισμένα από τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται εντός του βάθους της οπτικής απορρόφησης του υλικού να απομακρύνονται από τα άτομα τους μέσω μη γραμμικών διαδικασιών και πιο συγκεκριμένα μέσω Πολυφωτονιακού Ιονισμού (*Multiphoton Ionization* ή *MPI*).

Είναι γνωστό ότι το πλάσμα αποδόμησης προέρχεται από αυτά τα αρχικά ελεύθερα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται στα 10 πρώτα *picoseconds* για *ns* – παλμούς *laser*. Δεδομένου ότι κάθε παλμός *laser* περιέχει μόνο 10^{14} UV – φωτόνια, μπορεί να οδηγηθεί εσφαλμένα, κανείς στο συμπέρασμα ότι ο Πολυφωτονιακός Ιονισμός (*MPI*) είναι ιδιαίτερα ανεπαρκής. Εντούτοις, ενισχύεται από την ύπαρξη μικροσκοπικών ρωγμών, κόνδυλων και κενών στην επιφάνεια του στόχου, τα οποία αυξάνουν το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο με ένα συντελεστή κοντά στο n^4 , όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης στο αντίστοιχο μήκος κύματος του *laser*.

Τα ηλεκτρόνια ταλαντεύονται υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τη φωτεινή δέση του *laser* και συγκρούονται με τα γειτονικά άτομα ή ιόντα. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρουν μέρος από την ενέργειά τους στο χρυσταλλικό πλέγμα της επιφάνειας του στόχου. Στη συνέχεια η ενέργεια αυτή μέσω των δονήσεων του πλέγματος μετατρέπεται σε θερμότητα. Εξαιτίας της αυξανόμενης έντασης του *laser*, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του στόχου αυξάνεται με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός υπέρθερμου λεπτού στρώματος αερίου στην επιφάνεια του υλικού (στρώμα *Knudsen*) μέσα στο οποίο πραγματοποιούνται κρούσεις μεταξύ των ατόμων του στόχου.

Η θερμότητα, που αναπτύσσεται στην επιφάνεια του υλικού προκαλεί διαδοχικά συνθήκες θέρμανσης, τήξης και εκρηκτικής αποδόμησης. Ο ρυθμός θέρμανσης του στόχου από την ακτίνα του *laser* θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικός για την διατήρηση της σύστασης του στόχου στο αποδομηθέν μέρος του στόχου και για την παραγωγή στοιχειομετρικών υμενίων. Εξάλλου είναι γνωστό ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία *laser* χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή πυκνότητα ροής, πολύ μικρή διάρκεια παλμών και ρυθμούς θέρμανσης που φθάνουν μέχρι και τα 10^{10} K/s. Το γεγονός αυτό συντελεί στην εξάχνωση όλων των στοιχείων του στόχου και την εναπόθεσή τους στο υπόστρωμα με την ίδια στοιχειομετρία με αυτή που επικρατεί στο στόχο.

Οι παλμοί του *laser* απορροφούνται από το στόχο σε βάθος ίσο με $1/a$ όπου a είναι ο συντελεστής απορρόφησης στο δεδομένο μήκος κύματος της ακτινοβολίας του *laser* που προσπίπτει στο στόχο. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται *laser* με βραχύτερους παλμούς, η θερμική διάχυση είναι μικρότερη κατά τη διάρκεια της δράσης του παλμού ($l_T = 2\sqrt{D\tau}$, όπου D είναι ο συντελεστής θερμικής διάχυσης και τ είναι η διάρκεια του παλμού) με μήκος που είναι μικρότερο ή ίσο του βάθους του φωτοαποδομημένου υλικού ανά παλμό. Το αποτέλεσμα είναι:

1. Η ενέργεια να συσσωρεύεται με μεγάλο ρυθμό και
2. Η αλληλεπίδραση με το πλάσμα, του οποίου ο χρόνος σχηματισμού είναι τυπικά της τάξης κάποιων *nanosec* – *microsec*, να είναι μικρή

Αποφλοιωτικός θρυμματισμός

Ο αποφλοιωτικός θρυμματισμός του στόχου προκαλείται από τα επαναλαμβανόμενα θερμικά σοκ, όταν οι παλμοί του *laser* θερμαίνουν το στόχο αλλά η θερμοκρασία της επιφάνειάς του δεν πλησιάζει το σημείο τήξης. Δεδομένου ότι οι θερμικές πιέσεις δεν μπορούν να μετριάσουν με την τήξη, ο θερμικός κύκλος οδηγεί τελικά στο ράγισμα του στόχου και στην εκτίναξη λεπτών φολιδών από το υλικό του στόχου. Οι στόχοι που αποτελούνται από υλικά τα οποία έχουν υψηλό συντελεστή θερμικής επέκτασης, υψηλό μέτρο *Young* ή/και υψηλό σημείο τήξης είναι συνήθως ευαίσθητοι στον αποφλοιωτικό θρυμματισμό. Μερικά παραδείγματα αυτών των υλικών είναι τα πυρίμαχα μέταλλα, όπως το βολφράμιο και τα οξειδία όπως το Al_2O_3 .

Υδροδυναμικός θρυμματισμός

Οι διαδικασίες που οδηγούν στην τήξη της επιφάνειας του στόχου και κατά συνέπεια στην εκτίναξη λειωμένων σταγονιδίων καλούνται υδροδυναμικός θρυμματισμός. Αυτός ο μηχανισμός είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των διαδικασιών, που χρησιμοποιούν φωτόνια για το βομβαρδισμό του στόχου. Ο υδροδυναμικός θρυμματισμός δεν λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που ως προσπίπτουσα δέσμη για τον βομβαρδισμό του στόχου χρησιμοποιείται δέσμη ηλεκτρονίων ή ιόντων.

Θρυμματισμός λόγω συγκρούσεων

Ο θρυμματισμός λόγω συγκρούσεων σχετίζεται άμεσα με τη μεταφορά ορμής: τα σωματίδια που χτυπούν τον στόχο χάνουν μέρος της ορμής τους και συντελούν στην αποδόμηση σωματιδίων από το υλικό του στόχου. Η ορμή των φωτονίων είναι σχετικά μικρή συγκριτικά με την ορμή σωματιδίων που έχουν κάποια μάζα, όπως είναι τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα της ίδιας ενέργειας. Για αυτό το λόγο η επίδραση του θρυμματισμού λόγω συγκρούσεων στην *PLD* θεωρείται αμελητέα. Παρόλα αυτά είναι δυνατή η εμφάνιση έμμεσου θρυμματισμού λόγω συγκρούσεων δηλαδή μέρος των εκπεμπόμενων ιόντων δύναται να επιστρέψει στον στόχο και να προκαλέσει την εκπομπή νέων σωματιδίων.

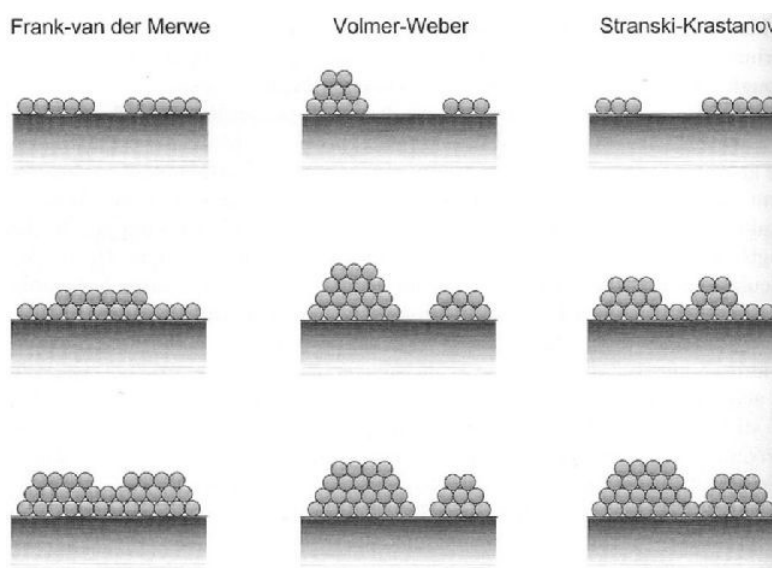
Αλληλεπίδραση Laser – Πλάσματος

Σαν αποτέλεσμα της αποδόμησης που προκαλείται στο υλικό – στόχο, δημιουργούνται μικρά κομμάτια υλικού, τα οποία λόγω της μεγάλης θερμοκρασίας ατμοποιούνται και ιονίζονται. Ακόμη, το νέφος των σωματιδίων απορροφά ενέργεια από την δέσμη *laser* και γίνεται ακόμα περισσότερο ιονισμένο. Τελικά, δημιουργείται ένα πλήρως ιονισμένο νέφος πλάσματος πολύ κοντά στον στόχο ($\sim 50 \mu m$). Το νέφος του πλάσματος επεκτείνεται σε κάθετη διεύθυνση από τον στόχο και ονομάζεται λοφίο αποδόμησης (*ablation plume*).

Σχηματισμός Λεπού Υμενίου

Ο σχηματισμός του τελικού υμενίου θα μπορούσε να οριστεί σαν την απορρόφηση των σωματιδίων του υλικού στόχου, που έχουν αποδοθεί στον θάλαμο, από το υπόστρωμα και την πυρηνοποίηση τους. Η τελική μορφολογία της δομή του υμενίου εξαρτάται από τον τρόπο πυρηνοποίησης των παραπάνω σωματιδίων. Στη συνέχεια θα αναλυθούν τρεις βασικοί τύποι ανάπτυξης υμενίων. Αυτοί είναι:

- Η μέθοδος *Volmer – Weber* ή τρισδιάστατη ανάπτυξη σε νησίδες
- Η μέθοδος *Frank – Van der Merwe* ή δυσδιάστατη μονοστρωματική ανάπτυξη
- Η μέθοδος *Stranski – Krastinov*



Σχήμα 57: Τομές υμενίων για τις τρεις βασικές μεθόδους εναπόθεσης

Μέθοδος *Volmer – Weber*

Το Σχήμα 57 παρουσιάζει το πλήθος των διαφορετικών διαδικασιών που μπορούν να συμβούν όταν ένα άτομο φτάσει στο υπόστρωμα εναπόθεσης. Ο ρυθμός άφιξης των σωματιδίων εξαρτάται από τις συνθήκες της εναπόθεσης και τα σωματίδια εναποτίθενται είτε σε «γυμνές» περιοχές του υποστρώματος, είτε σε δημιουργημένα συσσωματώματα (*clusters*) σωματιδίων. Εν συνεχεία αυτά τα σωματίδια μπορεί να ενωθούν με κάποιο συσσωμάτωμα, να επιστρέψουν στον θάλαμο σαν ατμός κ.ά..

Ένας σημαντικός παράγοντας της ανάπτυξης *Volmer – Weber* είναι ο ρυθμός πυρηνοποίησης. Στόχος της μεθόδου είναι η αύξηση αυτού του ρυθμού, που μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση του ρυθμού εναπόθεσης ή την μείωση της θερμοκρασίας του υποστρώματος.

Μέθοδος *Frank – Van der Merwe*

Σύμφωνα με την μέθοδο *Frank – Van der Merwe*, η πυρηνοποίηση και η ανάπτυξη νησίδων γίνεται μονοστρωματικά και η ανάπτυξη του επόμενου επιπέδου γίνεται όταν ολοκληρωθεί ένα επίπεδο. Η χαμηλή ενέργεια του υμενίου σε συνδυασμό με την υψηλή ενέργεια του υποστρώματος

ευνοεί την συγκεκριμένη ανάπτυξη.

Μέθοδος Stranski – Krastinov

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου *Stranski – Krastinov* είναι ο συνδυασμός των δυο προηγούμενων μορφών ανάπτυξη. Συγκεκριμένα, στα πρώτα επίπεδα παρατηρείται μονοστρωματική ανάπτυξη, η οποία αλλάζει σε ανάπτυξη νησίδων. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στην αύξηση της τάσης που εμφανίζεται στο κρυσταλλικό πλέγμα των μονοστρωματικών επιπέδων.

Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Η μέθοδος *PLD* είναι μια απλή διαδικασία, κατά την διάρκεια της οποίας ελάχιστοι παράμετροι, όπως πυκνότητα της ενέργειας του *laser*, ο ρυθμός επανάληψης ή η διάρκεια των παλμών, χρειάζεται να ελέγχονται. Οι στόχοι – υλικά που χρησιμοποιούνται είναι μικροί σε μέγεθος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές *sputtering*. Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της τεχνικής είναι η διατήρηση της στοιχειομετρίας στο παραγόμενο λεπτό υμένιο. Η διατήρηση οφείλεται στον υψηλά μεγάλο ρυθμό μεταφοράς θερμοκρασίας (10^8 K/s) στην επιφάνεια του στόχου, λόγω της ακτινοβολίας του παλμικού *laser*.

Επιπλέον, η ύπαρξη της πηγής ενέργειας (*laser*) εξωτερικά του θαλάμου, καθώς είναι δυνατή η ανάπτυξη διαφορετικών υλικών με την ίδια πειραματική διάταξη και είναι διαθέσιμη προς επιλογή μια μεγάλη περιοχή μηκών κύματος. Τέλος, το πλάσμα διακρίνεται από υψηλή ενέργεια, που έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη.

Σε αντιδιαστολή, οι τεχνικές *PLD* έχουν αρκετά μειονεκτήματα στην εφαρμογή τους. Το κυριότερο είναι η δημιουργία, λόγω αποδόμησης, σωματιδίων αρκετών μm . Οι διασπάσεις αυτές οφείλονται στον αποφλοιωτικό και υδροδυναμικό θρυμματισμό του στόχου. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να προκαλέσουν ατέλειες στην δομή του τελικού υμενίου, που θα έχουν αντίκτυπο στην ηλεκτρικές ιδιότητές του. Ειδικότερα, θα αυξηθεί η αντίσταση του υμενίου και θα ελαττωθεί η κινητικότητα των φορέων.

Ακόμα, η μέθοδος *PLD* δεν έχει καταφέρει να παράξει υμένια με ομοιόμορφο πάχος, λόγω της ανομοιογενούς κατανομής του υλικού εντός του πλάσματος. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της διαδικασίας περιορίζουν την χρησιμότητα της μεθόδου στην μαζική παραγωγή ομοιόμορφων λεπτών υμενίων. Για την επίλυση των προβλημάτων έχουν γίνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα, όπως η περιστροφή τόσο του στόχου, όσο και του υποστρώματος για την βελτίωση της ομοιογένειας και η παρουσία πλέγματος για τον περιορισμό των μεγάλων σωματιδίων.

4.4 *Scribbling*

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των λεπτών υμενίων είναι η αξιοπιστία και η παραγωγικότητα, λόγω της σύνδεσης των κελιών. Κατά την μετάβαση από κελί σε πλαίσιο, οι συνδέσεις παρουσιάζουν μικρές αντιστάσεις και ελάχιστη αχρησιμοποίητη περιοχή. Η πρώτη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν η κοπή με μηχανικά μέσα, μέθοδος που προκαλούσε αξιοσημείωτες φθορές γύρω από το αυλάκι. Η κοπή με χρήση *laser* παρουσιάζει κοπές πολύ καλής ποιότητας στα περισσότερα υλικά, συμπεριλαμβανομένων και των λεπτών υμενίων και θεωρείται ανώτερη.

Τα συστήματα κοπής με *laser* έχουν την ικανότητα δημιουργίας πολύ στενών αυλακώσεων με επιλεκτικό, ακριβή και οικονομικό τρόπο. Σε αντίθεση με άκρη του κοπτικού ενός μηχανικού

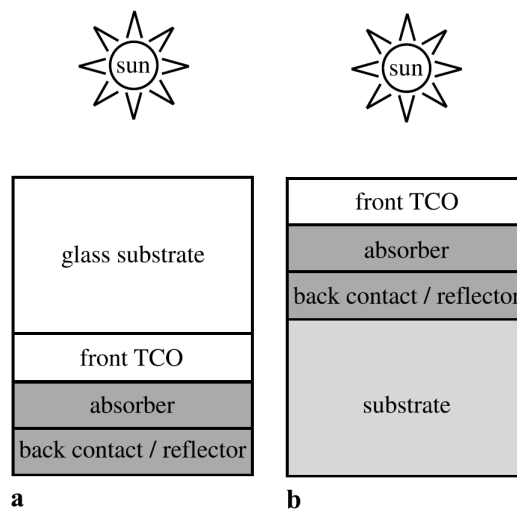
συστήματος που εμφανίζει φθορά, το *laser* μπορεί να λειτουργεί πάνω από 10000 συνεχόμενες ώρες.

Κατά τη διαδικασία της εγχάραξης, χρησιμοποιείται *laser* με εστιασμένη δέσμη για την δημιουργία καναλιών πάχους 40 – 60 μm . Η κοπή γίνεται μετά από την εναπόθεση κάθε επιπέδου με τεχνικές που αναλύθηκαν παραπάνω. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της μορφής εγχάραξης είναι ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί παράλληλα με την διαδικασία της εναπόθεσης και όχι μετά, όπως στην παραγωγή στοιχείων πυρίτιου.

4.4.1 Διασύνδεση και εγχάραξη λεπτών υμενίων

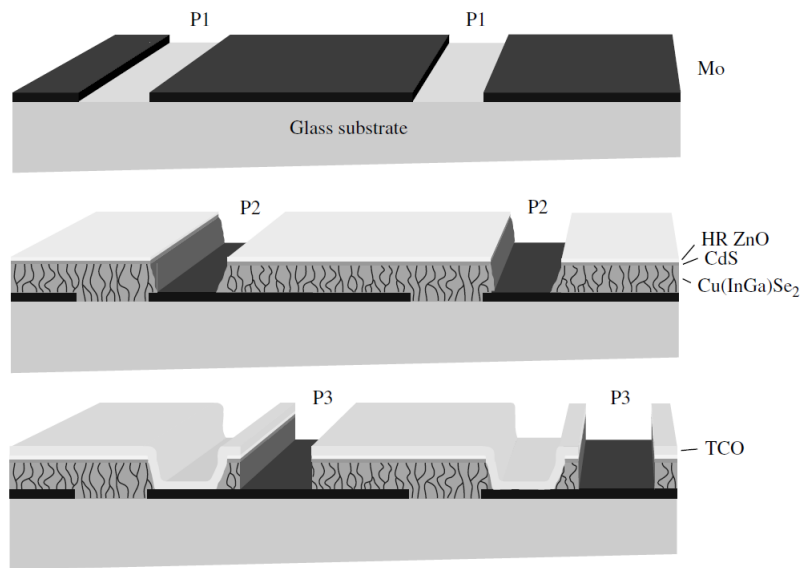
Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων η εγχάραξη των καναλιών γίνεται μετά την διαδικασία της εναπόθεσης, σε τρία βήματα:

- P1: Αφαίρεση αυλακώσεων από το υπόστρωμα του επιπέδου *TCO* (οπίσθιο ηλεκτρόδιο)
- P2: Αφαίρεση αυλακώσεων του απορροφητή
- P3: Αφαίρεση αυλακώσεων του εμπρόσθιου ηλεκτροδίου



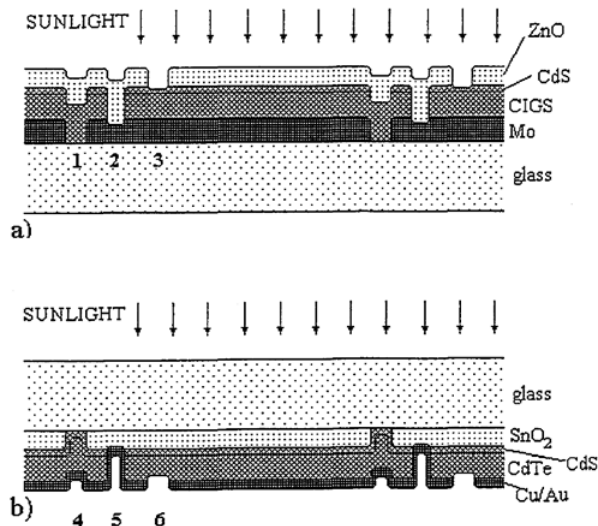
Σχήμα 58: Τυπική δομή (α) υπερστρωματικής (*superstrate*) και (β) υποστρωματικής (*substrate*) διαμόρφωσης λεπτών υμενίων

Ειδικότερα, η σειριακή μονολιθική διασύνδεση, κατά την διάρκεια της παραγωγής, επιτυγχάνεται ακολουθώντας τα τρία βήματα που αναφέρθηκαν επιγραμματικά παραπάνω. Σε μια τυπική υπερστρωματική (*superstrate*) διαμόρφωση, το αρχικό υπόστρωμα είναι διαφανές (γυαλί) και αντικρίζει την ηλιακή ακτινοβολία. Το πρώτο στρώμα που θα τοποθετηθεί είναι το *TCO* ακολουθούμενο από το επίπεδο του απορροφητή και της οπίσθιας επαφής. Κατά τη διαδικασία P1, μετά την εναπόθεση του *TCO*, γίνεται κοπή των καναλιών από υπέρυθη ή υπεριώδη ακτινοβολία *laser*.



Σχήμα 59: Σχηματική περιγραφή των βημάτων της παραγωγικής διαδικασίας για την δημιουργία μονολιθικών συνδέσεων σε λεπτά υμένα χαλκοπυρίτη.

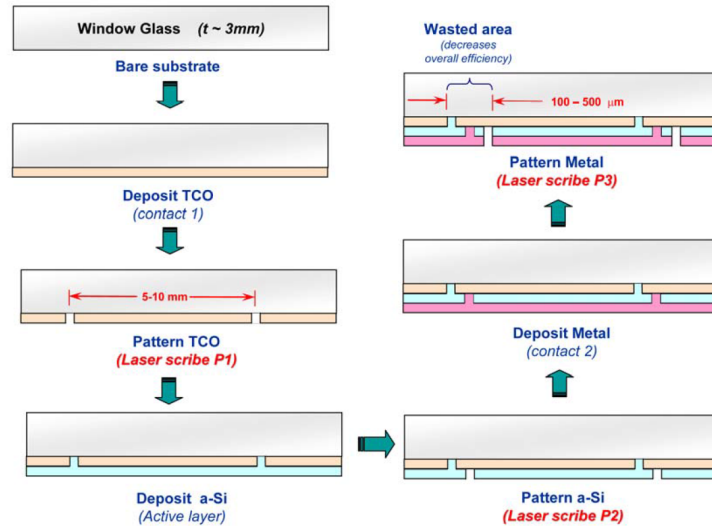
Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εναπόθεση του απορροφητή (*absorber*) είτε είναι ετερο – επαφή *CdS/CIGS*, είτε είναι επαφή *p – n* άμορφου πυριτίου. Στη διαδικασία *P2* απομακρύνεται το υλικό του απορροφητή, αφήνοντας ανέπαφο το επίπεδο *TCO*. Τέλος, γίνεται η τελική εναπόθεση του εμπρόσθιου ηλεκτροδίου (συνήθως *Al* ή *Mo*) και η κοπή των αυλακώσεων του επιπέδου. Η διαδικασία παραγωγής της κυψέλης ολοκληρώνεται με την προσθήκη μπαρών (*busbars*) και της γυάλινης εξωτερικής επιφάνειας.



Σχήμα 60: Τυπικό σχεδιάγραμμα συνδέσεων (α) για λεπτά υμένα *CIGS* και (β) για λεπτά υμένα *CdTe*

Σε υποστρωματική (*substrate*) διαμόρφωση η διαδικασία της εγχάραξης έχει αντίστροφη φορά σε σχέση με την υπερστρωματική. Η διάταξη αυτή επιλέγεται για την παραγωγή ηλιακών κελιών *CIGS* ή για λεπτά υμένα με αδιαφανή υποστρώματα. Σε περιπτώσεις αγωγίμων υποστρωμάτων,

αρχικά θα πρέπει να γίνει εναπόθεση μονωτικού επιπέδου. Σε περιπτώσεις με υπόστρωμα *Mo*, η διαδικασία *P1* γίνεται και με μηχανική εγχάραξη, η οποία όμως με τον καιρό δεν προτιμάται. Για την αποφυγή σφαλμάτων κατά την εγχάραξη του *Mo* χρησιμοποιούνται υπερβραχείοι (*ultrashort*) παλμοί (*ps* ή *fs*).



Σχήμα 61: Διαδικασία παραγωγής λεπτών υμενίων

5 Χαρακτηρισμός λεπτών υμενίων

5.1 Εισαγωγή

Για την εκτέλεση των λειτουργιών που είναι σχεδιασμένα, τα λεπτά υμένια πρέπει να έχουν διαθέτουν τις κατάλληλες προδιαγραφές. Προδιαγραφές όπως το κατάλληλο πάχος, η τραχύτητα της επιφάνειας, η σύνθεση των υλικών κ.ά.. αυτά τα χαρακτηριστικά πρέπει να ελέγχονται, τόσο κατά την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, όσο και μετά από αυτή. Οι δυο κύριες κατηγορίες μέτρησης των λεπτών υμενίων βασίζονται σε οπτικές τεχνικές (*optical*) ή τεχνικές με τη χρήση βελόνας (*Stylus*) ή διαφορετικά χωρίς ή με επαφή στο δείγμα (*contact* ή *non – contact*).

Οι τεχνικές *Stylus* προσδιορίζουν την τραχύτητα και το πάχος της επιφάνειας παρακολουθώντας τις αποκλίσεις της βελόνας, όταν διέρχεται από την επιφάνεια. Τα όργανα μέτρησης των συγκεκριμένων τεχνικών είναι συνήθως αργά και με περιορισμένη ακρίβεια, για αυτό το λόγο επιλέγονται για μετρήσεις σε αδιαφανείς επιφάνειες, όπως τα μέταλλα. Οι οπτικές μέθοδοι μπορούν να προσδιορίσουν τα χαρακτηριστικά των λεπτών υμενίων βάση της αλληλεπίδρασης που έχουν με το φως. Η λειτουργία του στηρίζεται στις οπτικές σταθερές και στον τρόπο που διαρρέουν και αντανακλώνται από το υλικό. Τα χαρακτηριστικά που μπορούν να μετρήσουν είναι πάχος, σύνθεση, δομή, ενεργειακό διάκενο κ.ά..

5.2 Περίθλαση Ακτινών – X (XRD)

Η περίθλαση ακτινών X ($X - RAY$ Diffraction ή XRD) είναι μια πολύ σημαντική και κατάλληλη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό της μικροδομής των λεπτών υμενίων. Η μέθοδος αυτή είναι μη καταστρεπτική και δεν απαιτείται επαφή, κάτι που την καθιστά ιδανική μέθοδο για “*in situ*” έρευνες.

Η τεχνική XRD προσφέρει τη δυνατότητα να γίνει χαρακτηρισμός των κρυσταλλικών υλικών, όπως μετάλλων, κεραμικών, ορυκτών, πολυμερών, πλαστικών, ανόργανων ή οργανικών ενώσεων. Παρέχει χρήσιμες πληροφορίες, τόσο για την κρυσταλλική δομή του υλικού, όσο και για τις δομικές ιδιότητες του, όπως το μέγεθος των κόκκων, την τάση παραμόρφωσης, την σύνθεση των φάσεων, το προσανατολισμό καθώς και πιθανές ατέλειες.

5.2.1 Αρχές Λειτουργίας XRD

Η περίθλαση, περιγράφεται στη φυσική, ως το φαινόμενο της διάχυσης των κυμάτων προς όλες τις κατευθύνσεις όταν αυτά προσπίπτουν σε ένα φράγμα ή οπή με διαστάσεις παραπλήσιες του μήκους κύματος. Το φράγμα αποτελείται από παράλληλες σχισμές ίσου πλάτους d , και θα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $d \leq \lambda$.

Οι ακτίνες X έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0,1 - 10Å, επομένως είναι αδύνατο να κατασκευαστεί μηχανικό φράγμα για την περίθλαση, αφού με την υπάρχουσα τεχνολογία το d μπορεί να φτάσει τα 1000Å. Ο *Max von Laue* το 1912 πρότεινε τη χρήση φυσικών κρυστάλλων σαν φράγματα περίθλασης, αφού η διάταξη των ατόμων μπορεί να θεωρηθεί σαν μια σειρά από παράλληλα δικτυωτά επίπεδα, τα οποία απέχουν μεταξύ τους αποστάσεις της τάξης του 1Å και είναι ίσες μεταξύ τους. Έτσι γνωρίζοντας το d μπορεί να υπολογιστεί το λ και ο κρύσταλλος να χρησιμοποιηθεί σαν φράγμα περίθλασης.

Χρησιμοποιώντας μια ακτίνα – X , συγκεκριμένου μήκους κύματος λ , σε ένα κρύσταλλο μπορεί

να προσδιοριστεί το d . Έχοντας προσδιορίσει το d , μπορούμε να ταυτοποιήσουμε την δομή του κρυστάλλου. Η μελέτη της δομής, απαιτεί την εφαρμογή του νόμου της σκέδασης ή συνθήκη του *Bragg*, που συνδέει το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας, τη γωνία περίθλασης θ , την πλεγματική απόσταση (*interplanar distance*) d μεταξύ των ατόμων σε ένα κρύσταλλο και τα παράλληλα κρυσταλλικά επίπεδα n ($n=0,1,2,3,4$). Η μαθηματική σχέση είναι:

$$n * \lambda = 2 * d * \sin \theta \quad (11)$$

5.2.2 Πειραματική Διάταξη *XRD*

Τα κύρια μέρη που αποτελούν μια τυπική πειραματική διάταξη *XRD* είναι:

- Η πηγή παραγωγής ακτίνων – X
- Δύο κινούμενα φράγματα, που χρησιμεύουν σαν σχισμές στόχευσης και ευθυγράμμισης (κάτοπτρο *Goebel*)
- Το σύστημα στήριξης του δείγματος
- Το γωνιόμετρο
- Το σύστημα ανίχνευσης ακτίνων – X και το σύστημα συλλογής δεδομένων

Κατά την πειραματική διαδικασία, παράγονται από την πηγή ακτίνες – X , οι οποίες διέρχονται από το κάτοπτρο *Goebel* και σύμφωνα με την εξίσωση *Bragg* προς το δείγμα συνεχίζει εκεί που την επαληθεύει. Η μονοχρωματική ακτινοβολία προσπίπτει στο δείγμα και με βάση τη δομή και τη σύσταση του, οι ακτίνες θα υποστούν περίθλαση υπό συγκεκριμένες γωνίες περίθλασης. Τελικά, οι ακτίνες θα απορροφηθούν από το σύστημα ανίχνευσης, το οποίο θα υπολογίσει την ένταση της ακτινοβολίας τους και θα συλλέξει τα δεδομένα.

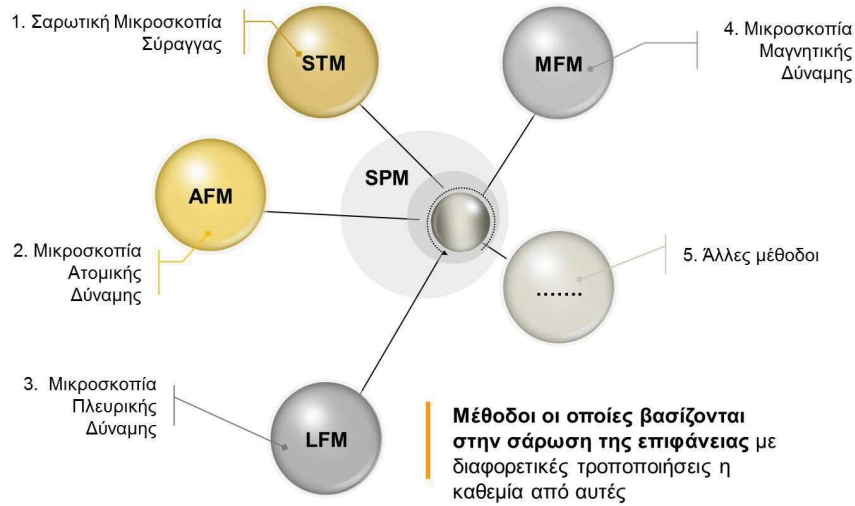
Η απόσταση από το σημείο εστίασης των ακτίνων X μέχρι το δείγμα είναι η ίδια με αυτή από το δείγμα μέχρι τον ανιχνευτή. Το γωνιόμετρο είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε ενώ η λυχνία ακτίνων X είναι στάσιμη, περιστροφή του δείγματος κατά γωνία θ να συνδυάζεται με περιστροφή του ανιχνευτή κατά γωνία 2θ . Με τον τρόπο αυτό η ανακλώμενη (περιθλώμενη) δέσμη θα παραμένει εστιασμένη σε σταθερή ακτίνα κύκλου πάνω στην σχισμή εισόδου του ανιχνευτή.

Ο προσδιορισμός της κρυσταλλικής δομής βασίζεται στο γεγονός ότι οι γωνίες των ανακλάσεων εξαρτώνται από τον τύπο της δομής και οι εντάσεις τους από το είδος των ατόμων που βρίσκονται σε κάθε θέση. Το διάγραμμα περίθλασης παρέχει πληροφορίες που σχετίζονται με τις σταθερές της κυψελίδας του κρυστάλλου, καθώς προσδιορίζονται από τις γωνίες ανάκλασης ενώ από την ένταση των κορυφών είναι δυνατό να υπολογιστεί η κρυσταλλική δομή που παράγει το συγκεκριμένο διάγραμμα περίθλασης. Έτσι ταυτοποιείται το υλικό και οι διάφορες φάσεις κρυστάλλωσής τους μέσω των κρυσταλλογικών δεδομένων του *ICDD* (*International Center Diffraction Data*).

5.3 Μικροσκόπιο Ατομικής Δύναμης (*AFM*)

Το 1981 ο *Gerd Binnig* και οι συνεργάτες κατάφεραν να κατασκευάσουν ένα μικροσκόπιο που θα απεικόνιζε τρισδιάστατα συμπαγές επιφάνειες σε ατομική κλίμακα. Το μικροσκόπιο αυτό ήταν το *STM* (*Scanning Tunneling Microscope*) και απέφερε στους *Binnig* και *Rohrer* το βραβείο Νόμπελ φυσικής το 1986. Επειδή, το *STM* μπορούσε να απεικονίσει μόνο ηλεκτρικά αγωγίμες επιφάνειες, ο *Binnig* κατάφερε να αναπτύξει το *AFM* (*Atomic Force Microscopy*) για να μπορέσει να μετρήσει τις επιφάνειες όλων των ειδών βάσει της δύναμης αλληλεπίδρασης.

Το *AFM* και το *STM* ανήκουν στην κατηγορία των *SPM* (*Scanning Probe Microscope*), ενώ τα *AFM* που μπορούν να πραγματοποιήσουν μετρήσεις δύναμης ανήκουν και στην κατηγορία των *SFM* (*Scanning Force Microscopy*). Το *AFM* είναι το πιο διαδεδομένο μηχάνημα δημιουργίας προφίλ επιφανειών τόσο για τοπογραφικές μετρήσεις, όσο και για μέτρηση δυνάμεων στην μίκρο και νάνο κλίμακα.

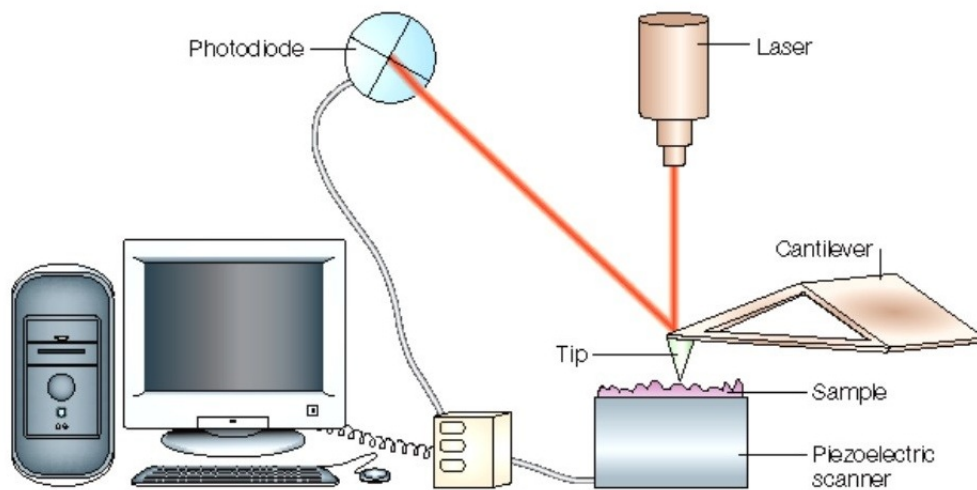


Σχήμα 62: Ευρύτερη οικογένεια των *SPM* (*Scanning Probe Microscope*)

5.3.1 Αρχές Λειτουργίας *AFM*

Η αρχή λειτουργίας του μοιάζει με αυτή ενός φωνογράφου. Μια αιχμηρή ακίδα στερεωμένη στην άκρη ενός μικρού προβόλου, τόσο λεπτού και εύκαμπτου ώστε να προσομοιάζει ελατήριο, σαρώνει το δείγμα, το οποίο βρίσκεται από κάτω της. Η σχετική κίνηση του δείγματος ως προς την ακίδα, στο επίπεδο $x - y$ αλλά και στον κατακόρυφο άξονα, ελέγχεται μέσω ενός σαρωτή – πιεζοκρυστάλλου. Η συγκράτηση της ακίδας στην επιφάνεια κατά τη σάρωση εξασφαλίζεται μέσω των δυνάμεων, οι οποίες αναπτύσσονται όπως ηλεκτροστατικών, μαγνητικών, *van der Waals* ή άλλων, ανάλογα με τις ιδιότητες του υλικού και τον τρόπο σάρωσης, ο οποίος έχει επιλεγεί. Για τον έλεγχο της σάρωσης, μια δέσημης λέιζερ (μέγιστης ισχύος $5mW$, μήκος κύματος $670nm$), η οποία προσπίπτει κατακόρυφα και ανακλάται από την πίσω πλευρά του προβόλου, οδηγείται μέσω ενός κατόπτρου σε ένα διαιρεμένο σε τεταρτημόρια φωτο-αισθητήρα.

Στη θέση ηρεμίας ο πρόβολος είναι άκαμπτος και η ανακλώμενη δέσημης προσπίπτει στο κέντρο του φωτο-αισθητήρα. Καθώς όμως, η ακίδα σαρώνει την επιφάνεια ακολουθώντας την τοπογραφία της, αναγκάζεται να κάμπτεται. Η κάμψη αυτή παρακολουθείται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα, το οποίο υπολογίζει τη διαφορά του σήματος στα αντίθετα τεταρτημόρια του φωτο-αισθητήρα και ενεργοποιεί μια διαδικασία ανάδρασης, ώστε να επαναφέρει το σήμα στην αρχική θέση και κατά συνέπεια τον πρόβολο στην κατάσταση ισορροπίας του. Κατάληξη της ανάδρασης είναι μια ηλεκτρική διέγερση προς τον πιεζοκρυστάλλο, η οποία ρυθμίζει το ύψος του και ανάλογα απομακρύνει ή προσεγγίζει το δείγμα από την ακίδα.

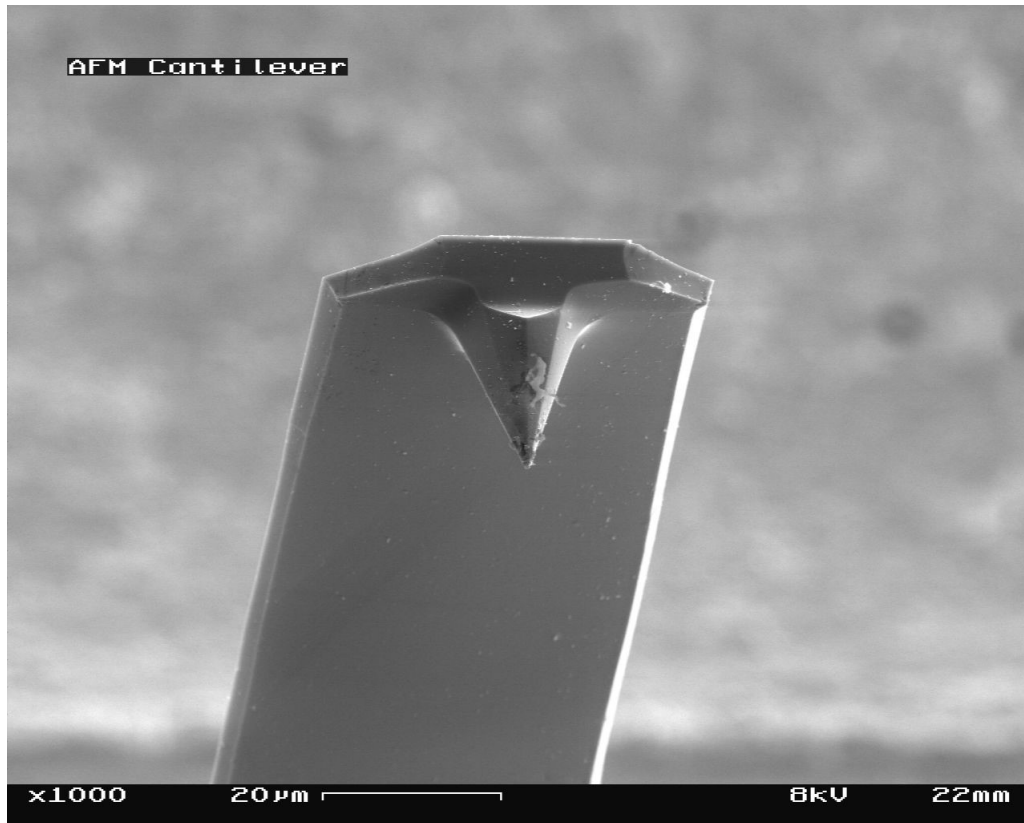


Σχήμα 63: Απεικόνιση διάταξης *AFM*

Μια τυπική διάταξη *AFM* περιλαμβάνει τα εξής κομμάτια:

- Ακίδα

Οι ακίδες του *AFM* έχουν μορφή τετράεδρης ή πεντάεδρης πυραμίδας. Οι ακίδες όπως και οι πρόβολοι, στους οποίους στηρίζονται, κατασκευάζονται από πυρίτιο (Si) ή νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται. Αυτές, οι οποίες χρησιμοποιούνται με την τεχνική της επαφής στον αέρα ή με οποιαδήποτε τεχνική σε υγρό, στηρίζονται σε τριγωνικό πρόβολο και κατασκευάζονται από Si_3N_4 . Όσες προορίζονται για χρήση με την τεχνική της ταλαντευόμενης ακίδας στον αέρα στηρίζονται σε ένα μικρό ορθογώνιο πρόβολο και κατασκευάζονται από Si . Οι ακίδες, αν και αποτελούν το μικρότερον διαστάσεων στοιχείο ενός *AFM*, είναι το σημαντικότερο, αφού καθορίζουν την ανάλυση των εικόνων, οι οποίες λαμβάνονται. Σε αντίθεση με την κλασική οπτική μικροσκοπία, στην οποία η μέγιστη δυνατή ανάλυση περιορίζεται από τα φαινόμενα διάθλασης του φωτός, η ανάλυση στο *AFM* καθορίζεται από τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και της ακίδας. Το ενδιαφέρον για την αύξηση της ανάλυσης του *AFM* εστιάζεται στην κατασκευή όσο το δυνατό πιο αιχμηρών ακίδων.



Σχήμα 64: Εικόνα ακίδας ΑΦΜ από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο

- Σαρωτής – Scanner

Ο σαρωτής αποτελεί το κεντρικό στοιχείο του *AFM* καθώς είναι αυτός, ο οποίος δημιουργεί την ελεγχόμενη επίπεδη κίνηση για τη σάρωση του δείγματος από την ακίδα. Η επίπεδη αυτή κίνηση είναι η σύνθεση μιας παλινδρομικής κίνησης στον άξονα ξ , ο οποίος χαρακτηρίζεται ως “γρήγορος άξονας” με μια ευθύγραμμη μετατόπιση στον άξονα ψ , ο οποίος χαρακτηρίζεται ως “αργός άξονας”. Ο σαρωτής παράλληλα διορθώνει τη σχετική απόσταση ακίδας – επιφάνειας στον κατακόρυφο άξονα ανάλογα με το σήμα, το οποίο λαμβάνει από το σύστημα ανάδρασης. Για να είναι εφικτός ο έλεγχος της μετατόπισης και στις τρεις διαστάσεις, ο σαρωτής κατασκευάζεται από τρεις ομάδες πιεζοχρυστάλλων, κάθε μία από τις οποίες ελέγχει τη μετατόπιση σε έναν από τους άξονες x, y, z . Όταν στις άκρες ενός πιεζοχρυστάλλου εφαρμοστεί μια διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, η χρυσταλλική του δομή επιμηκύνεται στη μία διεύθυνση και συστέλλεται στις άλλες. Το σύμπλεγμα των πιεζοχρυστάλλων είναι συναρμολογημένο στον κύλινδρο του σαρωτή, ο οποίος συνήθως αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία τοποθετείται το δείγμα.

- Κύκλωμα ανάδρασης

Το κύκλωμα ανάδρασης είναι αυτό, το οποίο διατηρεί την ακίδα κατά τη σάρωση σε τέτοια απόσταση από το δείγμα, ώστε να εξασφαλίζεται η επαφή τους χωρίς όμως να κινδυνεύει να καταστραφεί η ακίδα, ενώ παράλληλα παράγει το σήμα, το οποίο χρησιμοποιείται για την ψηφιακή αναπαραγωγή της τοπογραφίας της εξεταζόμενης επιφάνειας. Αποτελείται από το φωτοαισθητήρα, στον οποίο προσπίπτει η ανακλώμενη από τον καμπτόμενο πρόβολο της ακίδας δέσμη λέιζερ και ένα σύστημα ελέγχου (*controller*), του οποίου τις παραμέτρους λειτουργίας ρυθμίζει ο χειριστής του μικροσκοπίου μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Ο φωτοαισθητήρας καταγράφει κατά τη σάρωση την κάμψη της ακίδας και στέλνει το πρωτογενές αυτό σήμα (σε *Volts*) στο σύστημα ελέγχου. Εκεί το πρωτογενές σήμα συγκρίνεται με μία τιμή

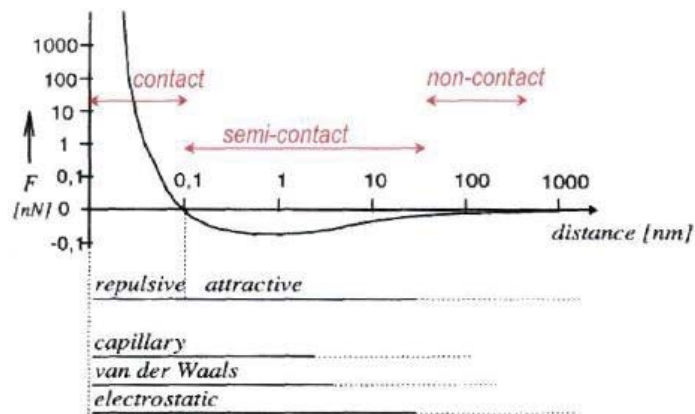
αναφοράς, η οποία έχει προκαθοριστεί ως το σήμα του φωτοαισθητήρα για την ελάχιστη επαφή της ακίδας με την επιφάνεια (*set point*). Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ένα σήμα απόκλισης (*error signal*), το οποίο μετασχηματίζεται από το σύστημα ελέγχου σε σήμα διόρθωσης, που προσαρμόζει ανάλογα τη σχετική απόσταση δείγματος – ακίδας. Το σήμα διόρθωσης σε σχέση με το σήμα απόκλισης ρυθμίζεται από το χειριστή μέσω δύο παραμέτρων, της αναλογικής ενίσχυσης (*proportional gain*) και της ενίσχυσης ολοκλήρωσης (*integral gain*). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών ορίζουν το μέγεθος της ενίσχυσης του σήματος απόκλισης και την ταχύτητα, με την οποία αυτό θα μετασχηματιστεί σε σήμα διόρθωσης. Έχουν ιδιαίτερη σημασία, αν αναλογιστεί κανείς ότι το σήμα διόρθωσης είναι αυτό, που ορίζει την κατακόρυφη παραμόρφωση του σαρωτή, προκειμένου να διατηρηθεί η ακίδα σε επαφή με την επιφάνεια, όταν η τελευταία παρουσιάζει βυθίσματα ή να μην προσκρούσει σε αυτή, αν έχει προεξοχές. Επιπλέον το σήμα διόρθωσης, εκφρασμένο ως υψομετρική διαφορά, αποτελεί το μέγεθος εκείνο το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της τοπογραφίας της επιφάνειας.

- Χειρισμός – έλεγχος από το χρήστη

Ο χειρισμός του *AFM* γίνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, στον οποίο λειτουργεί ένα λογισμικό επικοινωνίας με το σύστημα ελέγχου του μικροσκοπίου. Το λογισμικό αυτό παρέχεται από την εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρεία, καθώς είναι σε μεγάλο βαθμό εξειδικευμένο για κάθε τύπο *AFM* και επιτρέπει τον ορισμό των παραμέτρων λειτουργίας του μικροσκοπίου. Κατ'αρχάς, ο χειριστής πρέπει να προσδιορίσει στο πρόγραμμα το είδος του σαρωτή, τον οποίο χρησιμοποιεί αφού οι διαστάσεις και η ευαισθησία του τελευταίου καθορίζουν το πραγματικό μέγεθος της σάρωσης και τις διαστάσεις των τοπογραφικών χαρακτηριστικών, τα οποία εμφανίζονται στις εικόνες. Για να αρχίσει η σάρωση του δείγματος και η λήψη της εικόνας, πρέπει η ακίδα να έρθει σε επαφή με την επιφάνεια. Συνεπώς, η διαδικασία “εμπλοκής” ακίδας – επιφάνειας στο *AFM* προϋποθέτει τον ορισμό από το χειριστή μιας τιμής κατωφλίου για την ασκούμενη από την επιφάνεια στην ακίδα δύναμη (*set point*). Καθώς το σύστημα ελέγχου διεγείρει τον πιεζοκρύσταλλο του σαρωτή, ώστε να αρχίσει να διαστέλλεται στον *z* άξονα, και ακίδα προσεγγίζει την επιφάνεια, η αλληλεπίδρασή τους ελέγχεται μέσω του φωτο-αισθητήρα και όταν αυτή φτάσει την προκαθορισμένη τιμή, λέγεται ότι επιτεύχθηκε εμπλοκή (*engagement*), οπότε αρχίζει η σάρωση.

5.3.2 Τρόποι λειτουργίας *AFM*

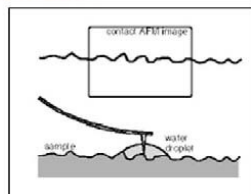
Οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ της ακίδας του *AFM* και της επιφάνειας του υλικού συνοψίζονται στο παρακάτω διάγραμμα, μαζί με τους διαφορετικούς τρόπους σάρωσης που υποστηρίζει η μικροσκοπία ατομικών δυνάμεων. Σε μεγάλες αποστάσεις της τάξεως 10-100nm από την επιφάνεια, υπεισέρχονται οι ελκτικές δυνάμεις, υπό την επίδραση των οποίων η ακίδα έλκεται από την επιφάνεια. Σε αυτή την περιοχή το *AFM* λειτουργεί σε ‘*non – contact mode*’ και επομένως η λειτουργία του στηρίζεται στην ανίχνευση και καταγραφή ελκτικών δυνάμεων.



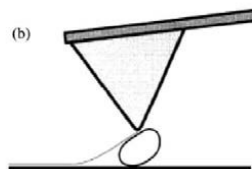
Σχήμα 65: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης μεταξύ ακίδας – επιφάνειας συναρτήσει της μεταξύ τους απόστασης και περιοχές λειτουργίας του *AFM*

Στις πολύ κοντινές αποστάσεις, της τάξεως μερικών \AA , υπεισέρχονται οι μικρής εμβέλειας απωστικές δυνάμεις οι οποίες τείνουν να απομακρύνουν την ακίδα από την επιφάνεια. Είναι εμφανές ότι η κλίση της καμπύλης σε αυτήν την περιοχή είναι πολύ μεγάλη, επομένως και η δύναμη πολύ ισχυρή. Αυτή είναι η περιοχή λειτουργίας του ‘*contact mode*’, η οποία στηρίζεται στην ανίχνευση και καταγραφή των απωστικών δυνάμεων πάνω στην ακίδα. Τέλος, στις ενδιάμεσες αποστάσεις είναι η περιοχή λειτουργίας του ‘*semi contact mode*’. Η ακίδα ταλαντώνεται μεταξύ της περιοχής που υπερσχύουν οι ελκτικές δυνάμεις (περιοχή *non contact*, όταν η ακίδα βρίσκεται στα ανώτερα σημεία της ταλάντωσής του) και της περιοχής που υπερσχύουν οι απωστικές δυνάμεις (περιοχή *contact mode*, όταν η ακίδα βρίσκεται στα κατώτερα σημεία της ταλάντωσής του η ακόμη και σε επαφή με την επιφάνεια).

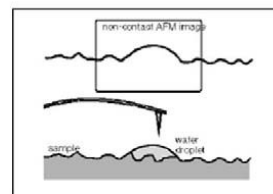
**Τρόπος Λειτουργίας με επαφή
Contact mode**



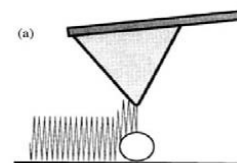
Η ακίδα έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια κατά την διάρκεια της σάρωσης



**Τρόπος Λειτουργίας χωρίς επαφή
Non Contact mode**



Η ακίδα ταλαντεύεται επάνω στην επιφάνεια χωρίς να την αγγίζει

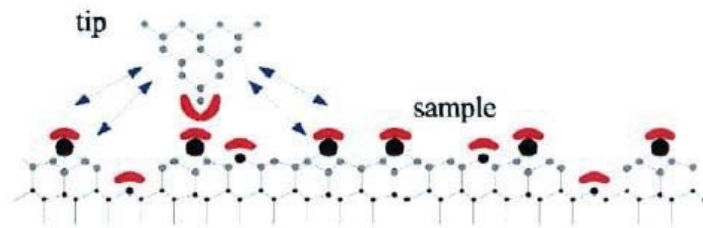


Σχήμα 66: Τρόποι λειτουργίας *AFM*

5.3.3 Αλληλεπίδραση με την επιφάνεια

Οι δυνάμεις που υπεισέρχονται στις μετρήσεις στην μικροσκοπία ατομικών δυνάμεων μπορούν να καταταχθούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την εμβέλεια και την ισχύ τους:

- Μικρής εμβέλειας (*short range forces*), οι δυνάμεις που υφίστανται όταν τα κέντρα των μορίων βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 3\AA .
- Μεγάλης εμβέλειας (*long range forces*), οι δυνάμεις που υπερισχύουν σε μεγαλύτερες διαμοριακές αποστάσεις.



Σχήμα 67: Ακίδα *AFM* κοντά στην επιφάνεια ενός δείγματος. Οι δυνάμεις μικρής εμβέλειας απεικονίζονται με κόκκινο σημάδι ως η επικάλυψη των ηλεκτρονικών νεφών και οι δυνάμεις μακράς εμβέλειας απεικονίζονται με βέλη

Αν τα μόρια δεν έχουν την τάση να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους χημικά, τότε οι δυνάμεις μικρής εμβέλειας είναι απωστικές και προέρχονται από τις αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρονιακών νεφών. Αντίθετα, για μόρια που σχηματίζουν χημικούς δεσμούς οι δυνάμεις μικρής εμβέλειας είναι ελκτικές. Στην περίπτωση του *AFM*, οι δυνάμεις μικρής εμβέλειας αφορούν τα μόρια της ακίδας και τα μόρια της επιφάνειας, οπότε δεν έχει νόημα ο χημικός δεσμός, συνεπώς οι δυνάμεις αυτές είναι πάντα απωστικές. Οι δυνάμεις μακράς εμβέλειας, είναι ουσιαστικά οι δυνάμεις *van der Waals*, οι οποίες είναι πάντα ελκτικές και είναι υπεύθυνες για πολλά μακροσκοπικά φαινόμενα όπως τριβή, η πρόσφυση, η επιφανειακή τάση, το ιξώδες, κλπ.

5.3.4 Αναγνώριση και αποφυγή σφαλμάτων *AFM*

Οι εικόνες που λαμβάνουμε μέσω του *AFM* προέρχονται από τις φυσικές αλληλεπιδράσεις είναι διαφορετικές από αυτές που λαμβάνουμε από εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ή του συμβατικού φωτός. Οι διαφορές αυτές οφείλονται σε σφάλματα (*artifacts*), που προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως η ακίδα του ανιχνευτή, ο σαρωτής, το σύστημα ανάδρασης, το λογισμικό επεξεργασίας ή οι κραδασμοί του συστήματος.

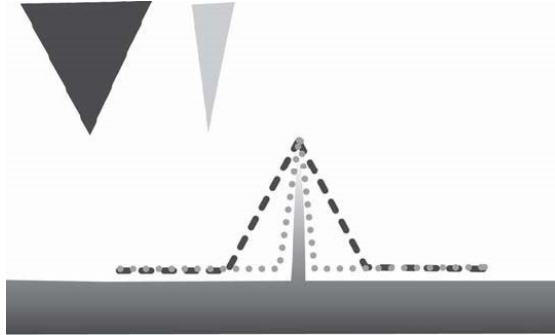
Σφάλματα ακίδας σαρωτή

Το γεωμετρικό σχήμα της ακίδας που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα σφαλμάτων. Όσο πιο αιχμηρό είναι το άκρο, τόσο πιο αληθείς είναι οι μετρήσεις που λαμβάνουμε. Επίσης, η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από τη γεωμετρία του χαρακτηριστικού που εξετάζεται, κυρίως από την γωνία του πλευρικού τοιχώματος, που συναντά η ακίδα. Για την αποφυγή σφαλμάτων από την ακίδα αρχικά μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την βέλτιστη επιλογή για κάθε περίπτωση. Ένας άτυπος κανόνας είναι η χρήση αιχμηρότερης ακίδας για μικρότερα δείγματα.

Μερικές περιπτώσεις σφαλμάτων λόγω ανωμαλιών στην επιφάνεια, που αδυνατεί να αναπαραστήσει πλήρως η ακίδα είναι:

- Όταν το αντικείμενο εμφανίζεται μεγαλύτερο από τις εκτιμήσεις

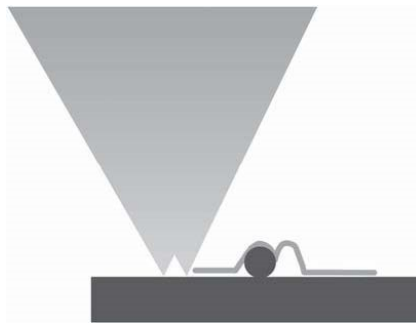
Επιφάνειες που εμφανίζονται μεγαλύτερες οδηγούν σε λανθασμένες ενδείξεις, λόγω της λάθος επιλογής ακίδας όπως φαίνεται στο Σχήμα 68.



Σχήμα 68: Λάθος ίχνη εμφανίζονται από μια αμβλεία ή απότομη ακμή. Σε τέτοια σφάλματα, το αποτέλεσμα εμφανίζεται μεγαλύτερο από το πραγματικό.

- Επαναλαμβανόμενες ασυνέχειες

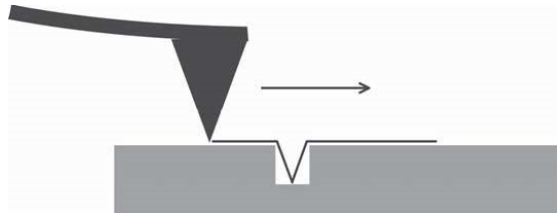
Όταν κάποιο αντικείμενο στην επιφάνεια που εξετάζεται είναι κατά πολύ μικρότερο της ακίδας μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση επαναλαμβανόμενων μοτίβων. Μικρά σφαιρικά αντικείμενα, όπως νανοσωματίδια ή μικρές πρωτεΐνες εμφανίζονται ανά δυάδες (διπλή εικόνα), όταν η ακίδα παρουσιάζει κάποια ανωμαλία στην επιφάνεια της, π.χ. φθορά (Σχήμα 69).



Σχήμα 69: Μια διπλή ακίδα εμφανίζει σκιάδης ή διπλές ενδείξεις κατά την κατεύθυνση σάρωσης.

- Εσοχές και κοιλότητες που εμφανίζονται μικρότερες και βαθύτερες στην απεικόνιση

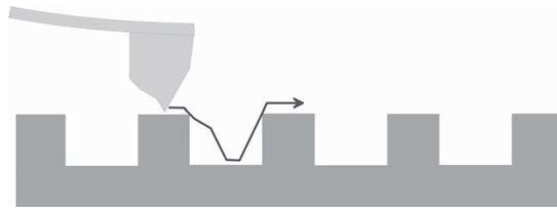
Η ανάγνωση εσοχών και κοιλότητων εξαρτάται κυρίως από το βάθος και το πλευρικό μήκος. Όταν η ακίδα είναι στενότερη της εσοχής, τότε δεν απεικονίζεται το πραγματικό βάθος, όπως και το πραγματικό σχήμα της οπής (Σχήμα 70).



Σχήμα 70: Λόγω του μεγέθους της ακίδας, η οπή δεν θα αναπαρασταθεί ακριβώς.

- Ακίδες με αστοχίες

Όταν παρουσιάζονται ανωμαλίες στην επιφάνεια του άκρου του ανιχνευτή λόγω φθοράς ή ακαθαρσιών που έχουν επικολληθεί σε αυτή, τότε η εικόνα που παράγεται εμφανίζεται αλλοιωμένη.

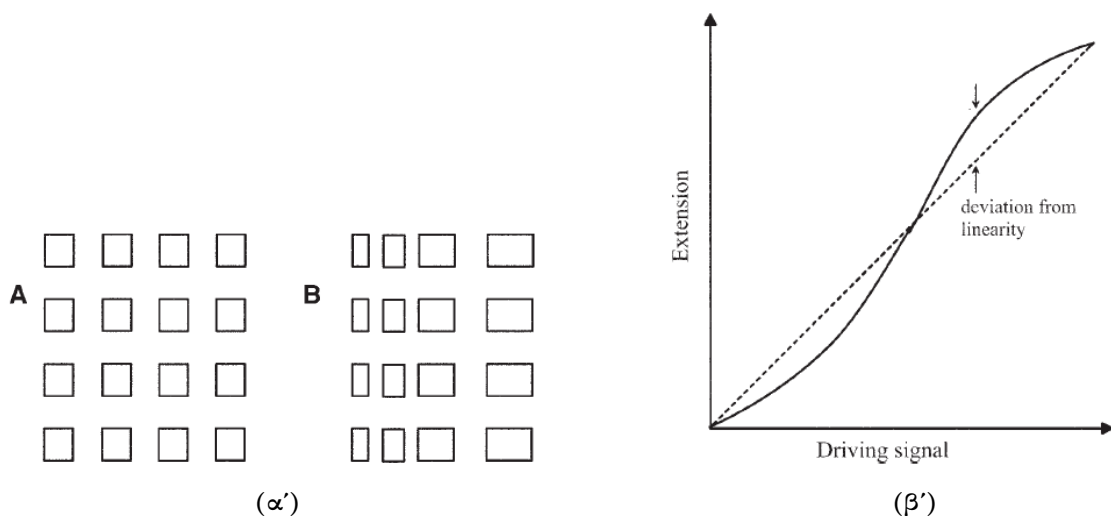


Σχήμα 71: Μια αλλοιωμένη ακίδα λόγω φθοράς, δημιουργεί σφάλματα, ενώ σαρώνει μοτίβα.

Σφάλματα σαρωτή

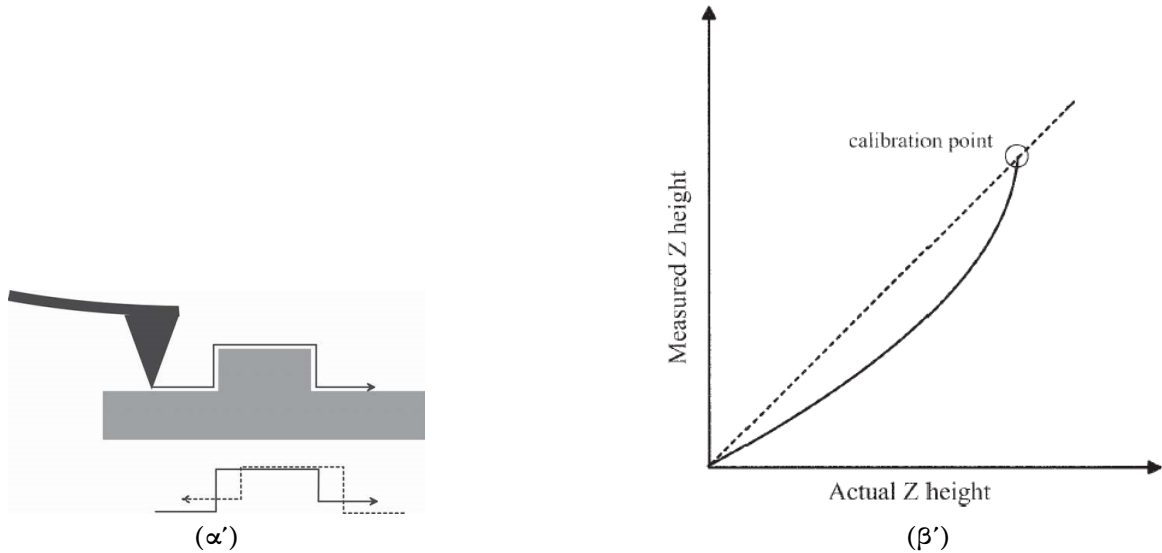
Η χρήση πιεζοηλεκτρικών χρυστάλλων στον σαρωτή είναι ο λόγος πολλών σφαλμάτων που παρουσιάζονται στις απεικονίσεις. Τέτοια σφάλματα είναι η μη γραμμικότητα της κίνησης του σαρωτή, η υστέρηση, ο ερπυσμός κ.ά..

Η πραγματική κίνηση του σαρωτή διαφέρει από τα σήματα ελέγχου, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 72, οι αποκλίσεις που εμφανίζονται συνήθως κυμαίνονται κυρίως σε εύρος 2~25% και εξαρτώνται από τις τεχνικές προδιαγραφές του σαρωτή που χρησιμοποιείται.



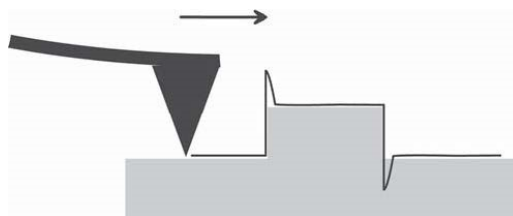
Σχήμα 72: (α) Σφάλματα κατά την σάρωση ενός δοκιμαστικού μοτίβου λόγω της μη γραμμικότητας του σαρωτή. (β) Διάγραμμα κίνησης ανά σήμα οδήγησης. Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση από έναν αντίστοιχο γραμμικό σαρωτή.

Το φαινόμενο της υστέρησης παρουσιάζεται όταν ο σαρωτής κινείται επαναλαμβανόμενα μπροστά και πίσω στο ίδιο σημείο που εξετάζεται. Τα ίχνη που απεικονίζονται έχουν εμφανή απόκλιση τόσο μεταξύ τους, όσο και με τα σήματα ελέγχου.



Σχήμα 73: (α') Το φαινόμενο της υστέρησης κατά την σάρωση ανά βήμα.(β') Το διάγραμμα εμφανίζει την απόκλιση από την πραγματική τιμή των μετρήσεων κατά των z άξονα, από το σημείο βαθμονόμησης.

Τέλος, όταν η τάση οδήγησης του σαρωτή εμφανίζει μεγάλη διακύμανση σε μια κίνηση, τότε η αλλαγή θέσης πραγματοποιείται σε δυο βήματα. Το πρώτο βήμα εκτελείται σε κλίμακα ms , ενώ στο δεύτερο απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος. Ερπυσμός ονομάζεται το δεύτερο αργό βήμα και εμφανίζεται σαν υπερύψωση σε κάθετες επιφάνειες.



Σχήμα 74: Το φαινόμενο ερπυσμού στην κάθετη διεύθυνση: υπερύψωση στις ακμές κάθε βήματος.

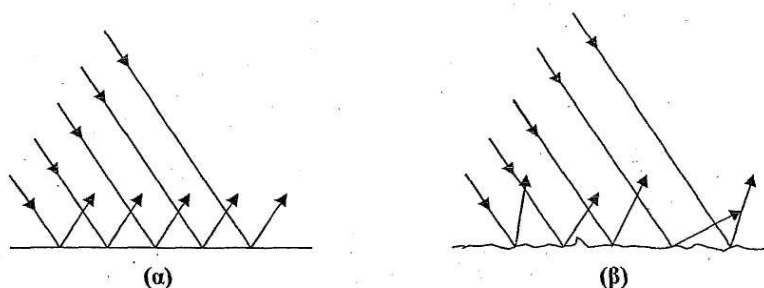
5.4 Υπολογισμός Πάχους Λεπτών Υμενίων

Σήμερα θεωρούμε ότι το φως έχει διττή υπόσταση, δηλαδή ότι μερικές φορές συμπεριφέρεται ως κύμα, ενώ άλλες ως σωματίδιο. Η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία ερμηνεύει τη διάδοση, τη συμβολή και την περίθλαση του, ενώ η σωματιδιακή θεωρία ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, καθώς και άλλα πειραματικά δεδομένα που σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις του φωτός με την ύλη.

5.4.1 Ανάκλαση του φωτός

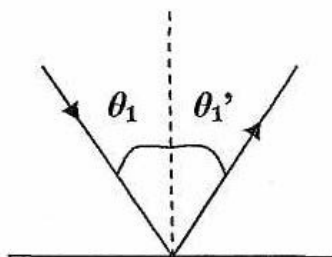
Όταν μια φωτεινή ακτίνα που διαδίδεται σε ένα μέσο συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο αρχικό μέσο διάδοσης με ένα άλλο, τότε ένα μέρος της αρχικής ακτίνας ανακλάται πίσω στο αρχικό μέσο διάδοσης. Στο Σχήμα 75.α βλέπουμε να ανακλώνται οι ακτίνες φωτός που προσπίπτουν πάνω σε μια λεία και στιλπνή επιφάνεια, η οποία μοιάζει με κάτοπτρο. Οι ανακλώμενες ακτίνες εξακολουθούν να είναι παράλληλες μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό η ανάκλαση αυτή ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση.

Εάν όμως η επιφάνεια πάνω στην οποία προσπίπτουν οι ακτίνες είναι τραχιά και ανώμαλη, τότε οι ακτίνες ανακλώνται προς διαφορετικές κατευθύνσεις και διασκορπίζονται στο γύρω χώρο (Σχήμα 75.β). Η ανάκλαση αυτή, κατά την οποία οι ακτίνες κατευθύνονται ακανόνιστα προς όλες τις κατευθύνσεις, ονομάζεται διάχυση. Μια επιφάνεια θα παίξει το ρόλο του κατόπτρου μόνο όταν οι ατέλειες της είναι μικρές σε σύγκριση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός.



Σχήμα 75: Σχηματική παράσταση (α) κατοπτρικής ανάκλασης, όπου όλες οι ανακλώμενες ακτίνες είναι παράλληλες και (β) της διάχυτης ανάκλασης (διάχυσης), όπου οι ανακλώμενες ακτίνες κατευθύνονται σε τυχαίες διευθύνσεις

Έστω ότι μία φωτεινή ακτίνα διαδίδεται στον αέρα και προσπίπτει υπό γωνία πάνω σε μια λεία επιφάνεια, όπως στην Εικόνα 76. Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν γωνίες θ_1 και θ_1' , αντίστοιχα, με την κάθετο προς την ανακλώσα επιφάνεια στο σημείο ανάκλασης. Γνωρίζουμε από πειράματα ότι η γωνία ανάκλασης ισούται με τη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή $\theta_1 = \theta_1'$.



Σχήμα 76: Σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης, $\theta_1 = \theta_1'$

5.4.1.1 Διάθλαση του φωτός

Όταν μια ακτίνα φωτός που διαδίδεται σε ένα μέσον συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο μέσο αυτό με ένα άλλο διαφανές μέσο, ένα μέρος της αρχικής ακτίνας ανακλάται, αλλά ένα

μέρος της διαθλάται μέσα στο δεύτερο μέσο. Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα κινούνται όλες στο ίδιο επίπεδο.

Η διαθλώμενη ακτίνα δε συνεχίζει την πορεία της προσπίπτουσας ακτίνας, αλλά σχηματίζει γωνία θ_2 με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων. Η γωνία θ_2 λέγεται γωνία διάθλασης (Εικόνα 77) και εξαρτάται από τις οπτικές ιδιότητες των δύο μέσων και από τη γωνία πρόσπτωσης (θ_1) της αρχικής ακτίνας, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{u_2}{u_1} = \text{const} \quad (12)$$

Όπου, u_1 είναι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός μέσα στο μέσο 1 και u_2 στο μέσο 2.

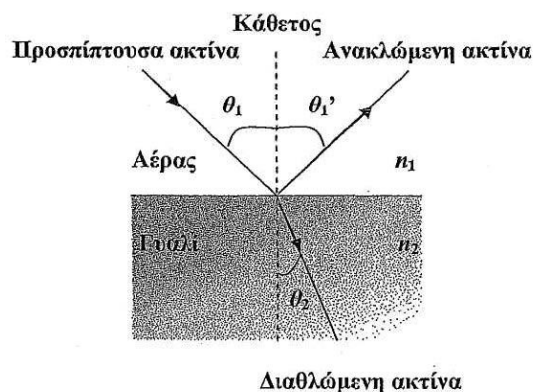
Η εξίσωση 12 ονομάζεται νόμος του *Snell*, προς τιμήν του *Willebrord Snell*, ο οποίος πρώτος την διατύπωσε. Από πειράματα γνωρίζουμε ότι η διαδρομή μιας φωτεινής ακτίνας, η οποία προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια και διαθλάται είναι αντιστρέψιμη.

Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο στο οποίο η ταχύτητα του φωτός είναι μεγαλύτερη, σε ένα μέσο στο οποίο η ταχύτητα του φωτός είναι μικρότερη, τότε η γωνία διάθλασης θ_2 είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης θ_1 . Εάν όμως η ταχύτητα του φωτός στο δεύτερο μέσο είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα στο πρώτο, τότε απομακρύνεται από την κάθετο, διότι η γωνία διάθλασης θ_2 είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης θ_1 .

Ο λόγος για τον οποίο το φως διαθλάται καθώς διέρχεται από ένα μέσο σε ένα άλλο είναι ότι η ταχύτητα του είναι διαφορετική στα δύο μέσα. Γνωρίζουμε ότι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός έχει τη μέγιστη τιμή του όταν το φως διαδίδεται στο κενό. Για διευκόλυνση μας ορίζουμε ένα συντελεστή, το δείκτη διάθλασης, n , ενός μέσου μέσω της σχέσης:

$$n = \frac{c}{u} \quad (13)$$

όπου c είναι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός στο κενό και u το μέτρο της ταχύτητας του φωτός στο μέσο.



Σχήμα 77: Ακτίνα προσπίπτει πλάγια στο επίπεδο που χωρίζει τον αέρα από το γυαλί. Η διαθλώμενη (στο γυαλί) ακτίνα πλησιάζει την κάθετο διότι $n_2 > n_1$ και $u_2 < u_1$

Από τον ορισμό βλέπουμε ότι ο δείκτης διάθλασης του μέσου είναι ένας καθαρός αριθμός και πάντοτε μεγαλύτερος από τη μονάδα, αφού η u είναι πάντοτε μικρότερη από τη c . Είναι προφανές ότι στο κενό $n = 1$.

Καθώς το φως διαδίδεται από ένα υλικό σε άλλο, η συχνότητά του δε μεταβάλλεται. Επειδή όμως η σχέση $u = f\lambda$, πρέπει να ισχύει και στα δύο μέσα, έπεται ότι:

$$u_1 = f\lambda_1 \qquad (14) \qquad u_2 = f\lambda_2 \qquad (15)$$

Εάν διαιρέσουμε τις δύο τελευταίες εξισώσεις και χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό του δείκτη διάθλασης, βρίσκουμε:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} \Leftrightarrow n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2 \qquad (16)$$

Εάν το μέσο 1 είναι το κενό ή -ισοδύναμα- για τις πιο πολλές πρακτικές εφαρμογές ο αέρας, τότε $n_1 = 1$. Έπεται λοιπόν ο δείκτης διάθλασης οποιουδήποτε υλικού ισούται με:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} \qquad (17)$$

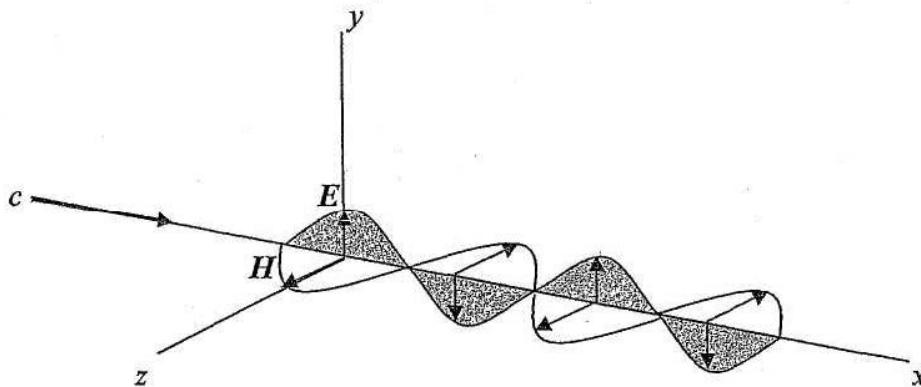
όπου λ_0 είναι το μήκος κύματος του φωτός στο κενό και λ_n είναι το μήκος κύματος του φωτός στο μέσο που έχει δείκτη διάθλασης n . Τώρα μπορούμε να ξαναγράψουμε το νόμο του *Snell* σε διαφορετική μορφή. Θέτουμε την εξίσωση 13 στην εξίσωση 12 και βρίσκουμε:

$$n_1 \sin \vartheta_1 = n_2 \sin \vartheta_2 \qquad (18)$$

Αυτή είναι η γενικά γνωστή και πιο διαδεδομένη μορφή του νόμου του *Snell*.

5.4.1.2 Πόλωση του φωτός

Μια συνήθης δέσμη φωτός αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κυμάτων, τα οποία έχουν εκπεμφθεί από τα άτομα ή τα μόρια της φωτεινής πηγής. Το καθένα άτομο παράγει ένα κύμα με τη δική του διεύθυνση E , η οποία οφείλεται στη διεύθυνση της ατομικής ταλάντωσης (Εικόνα 78).



Σχήμα 78: Διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατευθυνόμενου κατά τον άξονα x . Το διάνυσμα E του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται στο πεδίο xy , ενώ το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου H ταλαντώνεται στο επίπεδο xz .

Ορίζουμε ότι η διεύθυνση της πόλωσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος συμπίπτει με τη διεύθυνση στην οποία ταλαντώνεται το ηλεκτρικό πεδίο E . Ωστόσο, αφού όλες οι διευθύνσεις ταλάντωσης είναι δυνατές, το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι υπέρθεση των κυμάτων που εκπέμπουν τα άτομα. Το αποτέλεσμα είναι ένα μη πολωμένο κύμα φως, όπως αυτό που περιγράφεται από την Εικόνα 79.α. Η διεύθυνση της διάδοσης του κύματος σχήματος είναι κάθετη στο επίπεδο της σελίδας.

Όλες οι δυνατές διευθύνσεις του ηλεκτρικού πεδίου είναι το ίδιο πιθανές, αλλά όλες κείνται στο πεδίο που είναι κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Σε μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή και σε ένα οποιοδήποτε σημείο υπάρχει μόνο ένα συνιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο. Λέμε ότι ένα κύμα είναι γραμμικά πολωμένο εάν το διάνυσμα E ταλαντώνεται στο ίδιο σημείο πάντοτε κατά την ίδια διεύθυνση, όπως στην Εικόνα 79.β.



Σχήμα 79: (α) Μη πολωμένη δέσμη φως που κατευθύνεται κάθετα προς τη σελίδα. Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να ταλαντώνεται με την ίδια πιθανότητα προς κάθε κατεύθυνση, (β) Γραμμικά (ή επίπεδα) πολωμένη δέσμη φως της οποίας το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται στην κατεύθυνση του βέλους

5.4.2 Υπολογιστικά μοντέλα προσδιορισμού πάχους λεπτών υμενίων

5.4.2.1 Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός στην επιφάνεια ενός διαφανούς μέσου

Για ένα ισότροπο μέσο οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού εκφράζονται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$\operatorname{div} D = \varepsilon * \operatorname{div} E = 4\pi\rho \quad (19)$$

$$\operatorname{div} B = \mu * \operatorname{div} H = 0 \quad (20)$$

$$\operatorname{curl} E = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (21)$$

$$\operatorname{curl} H = \frac{4\pi\sigma E}{c} + \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (22)$$

όπου τα σύμβολα χρησιμοποιούνται με τη συνηθισμένη τους σημασία. Για ένα μέσο στο οποίο δεν υπάρχει φορτίο στο χώρο, οι παραπάνω σχέσεις οδηγούν απευθείας στις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες περιγράφουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα σε αυτό το μέσο.

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla^2 E \quad (23)$$

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla^2 H \quad (24)$$

Για διάδοση του φωτός σε ένα μη αγώγιμο μέσο ($\sigma = 0$), καταλήγουμε στις παρακάτω σχέσεις:

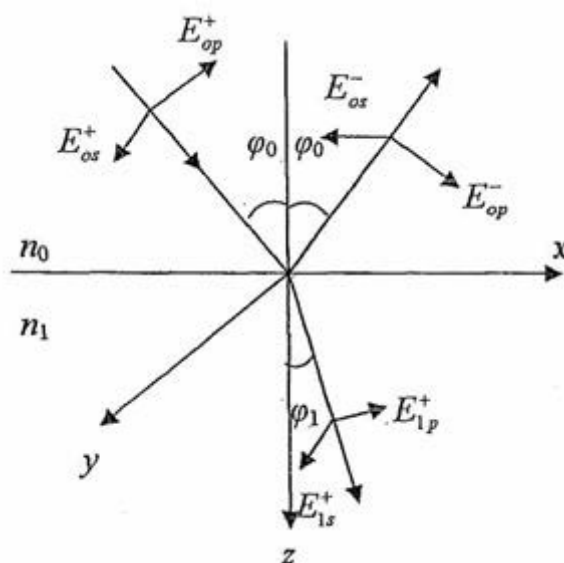
$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \nabla^2 E \quad (25)$$

$$\frac{\varepsilon\mu}{c^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \nabla^2 H \quad (26)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι τα κύματα μεταδίδονται με ταχύτητα $c\sqrt{\mu\varepsilon}$. Καθώς στις οπτικές συχνότητες η τιμή του μ για όλα τα υλικά είναι ελάχιστα διαφορετική από τη μονάδα, η ταχύτητα διάδοσης είναι $c\sqrt{\varepsilon}$, όπου ε είναι η διηλεκτρική σταθερά στη συχνότητα του φωτεινού κύματος. Από τον ορισμό του δείκτη διάθλασης, προκύπτει η σχέση $n = \sqrt{\varepsilon}$.

Το πρόβλημα καθορισμού της ανάκλασης και διάθλασης του φωτός σε μία επιφάνεια που χωρίζει δύο μέσα, αντιμετωπίζεται με εφαρμογή των οριακών συνθηκών στις λύσεις των εξισώσεων του Maxwell.

Θεωρούμε ένα επίπεδο κύμα, το οποίο προσπίπτει στην επιφάνεια $z = 0$. Το επίπεδο πρόσπτωσης είναι το xOz , η γωνία πρόσπτωσης είναι φ_0 και η γωνία ανάκλασης φ_1 . Το σύστημα των συντεταγμένων φαίνεται στην Εικόνα 80. Τα μέτρα των ηλεκτρικών διανυσμάτων του κύματος που πλησιάζει την επιφάνεια συμβολίζονται ως E_{0p}^+ και E_{0s}^+ για τις δύο συνιστώσες. Για το ανακλώμενο κύμα χρησιμοποιείται ο συμβολισμός E_{0p}^- , E_{0s}^- , ενώ για το διαθλώμενο κύμα ο συμβολισμός E_{1p}^+ και E_{1s}^+ .



Σχήμα 80: Το σύστημα συντεταγμένων κατά την πρόσπτωση ενός επίπεδου κύματος στο επίπεδο xOz για $z=0$.

Οι παράγοντες φάσης για το προσπίπτον, το ανακλώμενο και το διαθλώμενο κύμα είναι αντίστοιχα της μορφής:

$$\exp i(\omega t - \frac{2\pi n_0 x \sin \varphi_0}{\lambda} - \frac{2\pi n_0 z \sin \varphi_0}{\lambda}) \text{ (προσπίπτον κύμα)} \quad (27)$$

$$\exp i(\omega t - \frac{2\pi n_0 x \sin \varphi_0}{\lambda} - \frac{2\pi n_0 z \sin \varphi_0}{\lambda}) \text{ (ανακλώμενο κύμα)} \quad (28)$$

$$\exp i(\omega t - \frac{2\pi n_1 x \sin \varphi_0}{\lambda} - \frac{2\pi n_0 z \sin \varphi_0}{\lambda}) \text{ (διαθλώμενο κύμα)} \quad (29)$$

Στο σημείο $z = 0$, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τις συνιστώσες των ηλεκτρικών και μαγνητικών διανυσμάτων στις διευθύνσεις x και y :

$$\begin{cases} E_{0x} = (E_{0p}^+ + E_{0p}^-) \cos \phi_0 \\ E_{0y} = E_{0s}^+ + E_{0s}^- \\ H_{0x} = n_0 (-E_{0s}^+ + E_{0s}^-) \cos \phi_0 \\ H_{0y} = n_0 (E_{0p}^+ + E_{0p}^-) \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} E_{1x} = E_{1p}^+ \cos \phi_1 \\ E_{1y} = E_{1s}^+ \\ H_{1x} = -n_1 E_{1s}^+ \cos \phi_1 \\ H_{1y} = n_1 (E_{1p}^+) \end{cases} \quad (31)$$

Με εφαρμογή των οριακών συνθηκών, προκύπτουν εξισώσεις, οι οποίες συνδέουν τα μέτρα των διαθλώμενων και ανακλώμενων διανυσμάτων με εκείνα των προσπίπτόντων διανυσμάτων.

$$\frac{E_{0p}^-}{E_{0p}^+} = \frac{n_0 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_0} = r_{1p} \quad (32)$$

$$\frac{E_{1p}^+}{E_{0p}^+} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_0} = t_{1p} \quad (33)$$

$$\frac{E_{0s}^-}{E_{0s}^+} = \frac{n_0 \cos \phi_0 - n_1 \cos \phi_1}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} = r_{1s} \quad (34)$$

$$\frac{E_{1s}^+}{E_{0s}^+} = \frac{2n_0 \cos \phi_0}{n_0 \cos \phi_0 + n_1 \cos \phi_1} = t_{1s} \quad (35)$$

Τα r_{1p} και r_{1s} ονομάζονται συντελεστές ανάκλασης *Fresnel*, ενώ τα t_{1p} και t_{1s} , ονομάζονται συντελεστές διάθλασης *Fresnel*.

Η ανακλαστικότητα (η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ενέργεια) για κάθε συνιστώσα p και s δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} R_p = \frac{(E_{0p}^-)^2}{(E_{0p}^+)^2} = r_{1p}^2 \\ R_s = \frac{(E_{0s}^-)^2}{(E_{0s}^+)^2} = r_{1s}^2 \end{cases} \quad (36)$$

Η διαπερατότητα δίνεται αντίστοιχα από τις εξισώσεις:

$$\begin{cases} R_p = \frac{n_1 (E_{0p}^-)^2}{n_0 (E_{0p}^+)^2} = \frac{n_1}{n_0} t_{1p}^2 \\ R_s = \frac{n_1 (E_{0s}^-)^2}{n_0 (E_{0s}^+)^2} = \frac{n_1}{n_0} t_{1s}^2 \end{cases} \quad (37)$$

Για κάθετη πρόσπτωση σε ένα ισότροπο μέσο, οι συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης, εκφράζονται μέσω των δεικτών διάθλασης, λαμβάνουν τη μορφή:

$$R_p = R_s = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2 \quad (38)$$

$$T_p = T_s = \frac{4n_0n_1}{(n_0 + n_1)^2} \quad (39)$$

Με βάση το νόμο του *Snell* οι συντελεστές *Fresnel* γράφονται ως εξής:

$$r_{1p} = \frac{\tan(\phi_1 - \phi_0)}{\tan(\phi_1 + \phi_0)} \quad (40)$$

$$t_{1p} = \frac{2 \sin \phi_1 \cos \phi_0}{\sin(\phi_1 + \phi_0) \cos(\phi_1 - \phi_0)} \quad (41)$$

$$r_{1s} = \frac{\sin(\phi_1 - \phi_0)}{\sin(\phi_1 + \phi_0)} \quad (42)$$

$$t_{1s} = \frac{2 \sin \phi_1 \cos \phi_0}{\sin(\phi_1 + \phi_0)} \quad (43)$$

5.4.2.2 Μέθοδος των πινάκων χρησιμοποιώντας τους συντελεστές *Fresnel*

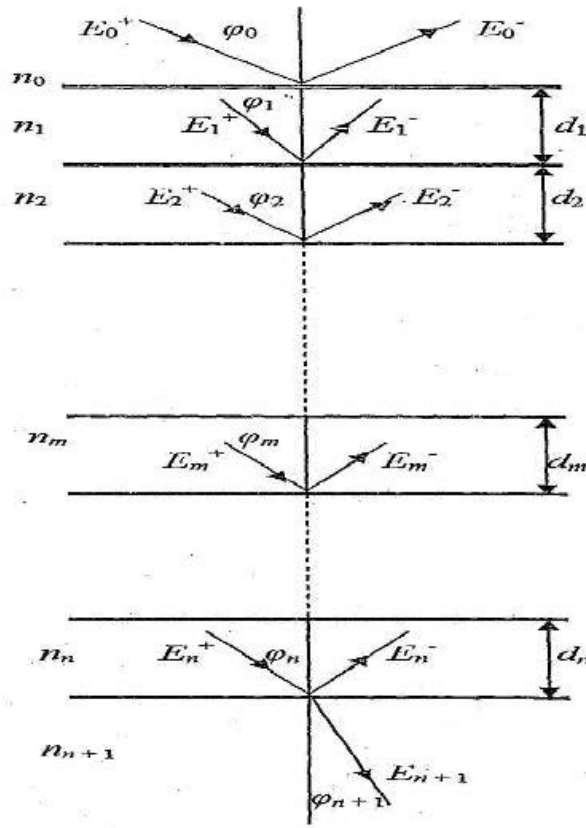
Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα n υμενίων (Εικόνα 81). Μπορούμε να εκφράσουμε τις σχέσεις μεταξύ των ηλεκτρικών διανυσμάτων σε διαδοχικά υμένια μέσω των συντελεστών *Fresnel*.

Για το m υμένιο μπορούμε να γράψουμε τις παρακάτω σχέσεις για τις x και y συνιστώσες των μεγεθών E και H :

$$\begin{cases} E_{mx} = (E_{mp}^+ e^{-ik_m z} + E_{mp}^- e^{+ik_m z}) \cos \phi_m \\ E_{my} = (E_{ms}^+ e^{-ik_m z} + E_{ms}^- e^{+ik_m z}) \\ H_{mx} = (-E_{mp}^+ e^{-ik_m z} + E_{mp}^- e^{+ik_m z}) \cos \phi_m \\ H_{my} = (E_{mp}^+ e^{-ik_m z} - E_{mp}^- e^{+ik_m z}) n_m \end{cases} \quad (44)$$

Όπου,

$$k_m = \frac{2\pi n_m \cos \phi_k}{\lambda} \quad (45)$$



Σχήμα 81: Σύστημα n υμενίων

Όταν ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει στην επιφάνεια ενός υμενίου, τα μέτρα των ηλεκτρικών διανυσμάτων του, συμβολίζονται ως : $E_0^+, E_1^+, \dots, E_m^+, \dots, E_n^+$, ενώ για το ανακλώμενο κύμα είναι αντίστοιχα: $E_0^-, E_1^-, \dots, E_m^-, \dots, E_n^-$. Η διάταξη παρουσιάστηκε στην παραπάνω εικόνα.

Ορίζοντας το μέγεθος $C_m = \sum_{i=1}^{m-1} d_i$ και χρησιμοποιώντας τους συντελεστές *Fresnel*, μπορούμε να γράψουμε τις παρακάτω σχέσεις για τη m επιφάνεια:

$$E_{m-1}^+ e^{-ik_{m-1}c_m} = \frac{(E_m^+ e^{-ik_m c_m} + r_m E_m^- e^{+ik_m c_m})}{t_m} \quad (46)$$

$$E_{m-1}^- e^{+ik_{m-1}c_m} = \frac{(r_m E_m^+ e^{-ik_m c_m} + E_m^- e^{+ik_m c_m})}{t_m} \quad (47)$$

Ορίζοντας $\delta_m = \kappa_m c_m$ και γράφοντας τις παρακάτω σχέσεις σε μορφή πίνακα, καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\begin{pmatrix} E_{m-1}^+ \\ E_{m-1}^- \end{pmatrix} = \frac{1}{t_m} \begin{pmatrix} e^{i\delta_{m-1}} & r_m e^{i\delta_{m-1}} \\ r_m e^{i\delta_{m-1}} & e^{i\delta_{m-1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_m^+ \\ E_m^- \end{pmatrix} \quad (48)$$

Για ένα σύστημα n υμενίων (Εικόνα 81) χρειάζεται να είναι γνωστή η σχέση μεταξύ των E_{n+1}^+ και E_0^+ , προκειμένου να μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής διάθλασης. Επιπλέον, για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης απαιτείται η σχέση μεταξύ των E_0^+ και E_0^- . Από την εξίσωση 47 προκύπτει:

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{C_1 C_2 \dots C_{n+1}}{t_1 t_2 \dots t_{n+1}} \begin{pmatrix} E_{n+1}^+ \\ E_{n+1}^- \end{pmatrix} \quad (49)$$

$$C_m = \begin{pmatrix} e^{i\delta_{m-1}} & r_m e^{i\delta_{m-1}} \\ r_m e^{-i\delta_{m-1}} & e^{-i\delta_{m-1}} \end{pmatrix} \quad (50)$$

Καθώς δεν υπάρχει κύμα στο μέσο $(n+1)$ το οποίο να ταξιδεύει προς την αρνητική κατεύθυνση $E_{n+1}^- = 0$. Αν γράψουμε το γινόμενο των πινάκων με την μορφή:

$$C_1 C_2 \dots C_{n+1} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \quad (51)$$

Από την εξίσωση 48 προκύπτει:

$$R = \frac{E_0^-}{E_0^+} = \frac{c}{a} \quad T = \frac{E_{n+1}^+}{E_0^+} = \frac{t_1 t_2 \dots t_{n+1}}{a}$$

Για την περίπτωση που έχουμε ένα μόνο υμένιο προκύπτει:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & r_1 \\ r_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\delta_1} & r_2 e^{i\delta_1} \\ r_2 e^{-i\delta_1} & e^{-i\delta_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{i\delta_1} + r_1 r_2 e^{-i\delta_1} & r_2 e^{i\delta_1} + r_1 e^{-i\delta_1} \\ r_1 r_2 e^{i\delta_1} + r_2 e^{-i\delta_1} & r_1 r_2 e^{-i\delta_1} + e^{-i\delta_1} \end{pmatrix} \quad (52)$$

οπότε από την εξίσωση 51 οδηγούμαστε τελικά στις σχέσεις:

$$R = \frac{r_1 e^{i\delta_1} + r_2 e^{-i\delta_1}}{e^{i\delta_1} + r_1 r_2 e^{-i\delta_1}} \quad (53)$$

$$T = \frac{t_1 t_2}{e^{i\delta_1} + r_1 r_2 e^{-i\delta_1}} \quad (54)$$

5.4.2.3 Εφαρμογή της μεθόδου των πινάκων για τον υπολογισμό της ανακλαστικότητας και της διαπερατότητας

Καταρχήν θα θεωρήσουμε ότι έχουμε κάθετη πρόσπτωση στην επιφάνεια. Στη συνέχεια θα συμβολίσουμε τα στοιχεία των πινάκων με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατό να προκύψουν εύκολα υπολογιζόμενες σχέσεις για οποιοδήποτε αριθμό υμενίων. Για τους συντελεστές στην m διεπιφάνεια γράφουμε $r_m = g_m + ih_m$ και $t_m = 1 + g_m + ih_m$. Αν απορροφούν, τόσο το $(m-1)$ όσο και το m μέσο, με $n_{m-1} = n_m - ik_1$ και $n_m = n_m - ik_m$, τότε για την περίπτωση της κάθετης πρόσπτωσης έχουμε:

$$g_m = \frac{n_{m-1}^2 + k_{m-1}^2 - n_m^2 - k_m^2}{(n_{m-1} + n_m)^2 + (k_{m-1} + k_m)^2} \quad (55)$$

$$h_m = \frac{2(n_{m-1} + k_m - n_m - k_{m-1})}{(n_{m-1} + n_m)^2 + (k_{m-1} + k_m)^2} \quad (56)$$

Αν το πάχος του $(m - 1)$ υμενίου είναι d_{m-1} , τότε ο όρος της φάσης στον m πίνακα γράφεται:

$$\exp i\delta_{m-1} = \exp \frac{i2\pi}{\lambda} (n_{m-1} - ik_{m-1})d_{m-1} = \exp \alpha_{m-1} \exp i\gamma_{m-1} \quad (57)$$

Όπου:

$$\alpha_{m-1} = \frac{2\pi}{\lambda} k_{m-1} d_{m-1} \quad \gamma_{m-1} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{m-1} d_{m-1} \quad (58)$$

Όλα τα στοιχεία των πινάκων είναι μιγαδικοί αριθμοί. Ο m πίνακας γράφεται:

$$C_m = \begin{pmatrix} p_m + iq_m & r_m + is_m \\ t_m + iu_m & u_m + iw_m \end{pmatrix} \quad (59)$$

Τα στοιχεία του πίνακα υπολογίζονται από τις εξισώσεις 49, 54 και 56.

$$C_m = \begin{pmatrix} e^{i\delta_{m-1}} & r_m e^{i\delta_{m-1}} \\ r_m e^{-i\delta_{m-1}} & e^{-i\delta_{m-1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_m + iq_m & r_m + is_m \\ t_m + iu_m & u_m + iw_m \end{pmatrix} \quad (60)$$

$$p_m = e^{\alpha_{m-1}} \cos \gamma_{m-1} \quad (61)$$

$$q_m = e^{\alpha_{m-1}} \sin \gamma_{m-1} \quad (62)$$

$$r_m = e^{\alpha_{m-1}} (g_m \cos \gamma_{m-1} - h_m \sin \gamma_{m-1}) \quad (63)$$

$$s_m = e^{\alpha_{m-1}} (h_m \cos \gamma_{m-1} + g_m \sin \gamma_{m-1}) \quad (64)$$

$$t_m = e^{-\alpha_{m-1}} (g_m \cos \gamma_{m-1} + h_m \sin \gamma_{m-1}) \quad (65)$$

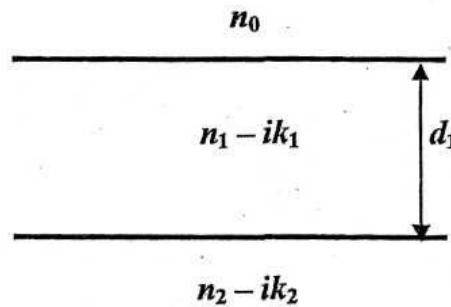
$$u_m = e^{-\alpha_{m-1}} (h_m \cos \gamma_{m-1} - g_m \sin \gamma_{m-1}) \quad (66)$$

$$v_m = e^{-\alpha_{m-1}} \cos \gamma_{m-1} \quad (67)$$

$$w_m = -e^{-\alpha_{m-1}} \sin \gamma_{m-1} \quad (68)$$

- Περίπτωση υμενίου που απορροφά πάνω σε υπόστρωμα που απορροφά

Στην περίπτωση αυτή γίνονται ορισμένες απλοποιήσεις καθώς ο πρώτος πίνακας είναι $\begin{pmatrix} 1 & g_1 + ih_1 \\ g_1 + ih_1 & 1 \end{pmatrix}$ απλούστερης μορφής από το γενικό όρο.



Σχήμα 82: Υμένιο που απορροφά πάνω σε υπόστρωμα που απορροφά

Όπου:

n_0 : ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος χώρου (συνήθως αέρας)

$n_1 = n_1 - ik_1$: ο μιγαδικός δείκτης διάθλασης του υμενίου

$n_2 = n_2 - ik_2$: ο μιγαδικός δείκτης του υποστρώματος

Οι μιγαδικοί δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 που εμφανίζονται στις παρακάτω σχέσεις, είναι συναρτήσεις των συντελεστών διάθλασης του υμενίου n_1 και του υποστρώματος n_2 , καθώς και των συντελεστών απορρόφησης k_1 και k_2 , του υμενίου και του υποστρώματος αντίστοιχα.

Για ένα υμένιο με δείκτη διάθλασης $n_1 = n_1 - ik_1$ και πάχος d_1 , πάνω σε ένα υπόστρωμα με δείκτη διάθλασης $n_2 = n_2 - ik_2$, η ανακλαστικότητα σε ένα μήκος κύματος λ μπορεί να βρεθεί από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$g_1 = \frac{n_0^2 - n_1^2 - k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2} \quad h_1 = \frac{2n_0k_1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2} \quad (69)$$

$$g_2 = \frac{n_1^2 - n_2^2 - k_1^2 - k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2} \quad h_2 = \frac{2(n_1k_2 - n_2k_1)}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2} \quad (70)$$

$$p_2 = e^{\alpha_1} \cos \gamma_1 \quad q_2 = e_1^\alpha \sin \gamma_1 \quad (71)$$

$$t_2 = e_1^{-\alpha} (g_2 \cos \gamma_1 + h_2 \sin \gamma_1) \quad (72)$$

$$u_2 = e_1^{-\alpha} (h_2 \cos \gamma_1 + g_2 \sin \gamma_1) \quad (73)$$

Όπου,

$$\alpha_1 = \frac{2\pi k_1 d_1}{\lambda} \quad \gamma_1 = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (74)$$

$$p_{12} = p_2 + g_1 t_2 - h_1 u_2 \quad (75)$$

$$q_{12} = q_2 + h_1 t_2 - g_1 u_2 \quad (76)$$

$$t_{12} = t_2 + g_1 p_2 - h_1 q_2 \quad (77)$$

$$u_{12} = u_2 + h_1 p_2 - g_1 q_2 \quad (78)$$

Τότε προκύπτει η σχέση:

$$R_1 = \frac{t_{12}^2 + u_{12}^2}{p_{12}^2 + q_{12}^2} \quad (79)$$

Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την περίπτωση που έχουμε περισσότερα υμένια. Στην περίπτωση που έχουμε ένα μόνο υμένιο, μπορούν να γίνουν επιπρόσθετες απλοποιήσεις και η έκφραση για την ανακλαστικότητα μπορεί να δοθεί στην ακόλουθη μορφή:

$$R_1 = \frac{(g_1^2 + h_1^2)e^{2\alpha_1} + (g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + A \cos 2\gamma_1 + B \sin 2\gamma_1}{e_1^{2\alpha} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + C \cos 2\gamma_1 + D \sin 2\gamma_1} \quad (80)$$

Όπου,

$$A = 2(g_1 g_2 + h_1 h_2) \quad (81)$$

$$B = 2(g_1 h_2 - g_2 h_1) \quad (82)$$

$$C = 2(g_1 g_2 - h_1 h_2) \quad (83)$$

$$D = 2(g_1 h_2 + g_2 h_1) \quad (84)$$

Από τις αναλυτικές εκφράσεις των παραπάνω παραμέτρων, είναι φανερό ότι η παράμετρος του πάχους του υμενίου επηρεάζει μόνο τις παραμέτρους α_1 και γ_1 , ενώ οι παράμετροι g_1 , g_2 , h_1 , h_2 , A , B , C και D εξαρτώνται μόνο από τις οπτικές σταθερές n_1 , n_2 , k_1 και k_2 .

- Περίπτωση υμενίου που απορροφά πάνω σε διαφανές υπόστρωμα
Στην περίπτωση που το υπόστρωμα είναι διαφανές, $k_2 = 0$ εφόσον δεν απορροφά και οι τιμές των g_2 και h_2 μπορούν να απλοποιηθούν.

Για ένα τέτοιο υμένιο, η διαπερατότητα μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Επιπρόσθετα, ο υπολογισμός της διαπερατότητας επιτρέπει τον έλεγχο της αριθμητικής, καθώς το άθροισμα $R + T$ δεν μπορεί να υπερβαίνει τη μονάδα. Η διαπερατότητα δίνεται από τη σχέση:

$$T_1 = \frac{n_2}{n_0} \frac{[(1 + g_1)^2 + h_1^2] [(1 + g_2^2) + h_2^2]}{e^{2\alpha_1} + (g_1^2 + h_1^2)(g_2^2 + h_2^2)e^{-2\alpha_1} + C \cos 2\gamma_1 + D \sin 2\gamma_1} \quad (85)$$

Η ανακλαστικότητα του φιλμ είναι γενικά διαφορετική στις δύο πλευρές του υμενίου, όταν τα μέσα στα οποία περιέχεται έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Η διαπερατότητα είναι ίδια και για τις δύο διευθύνσεις διάδοσης του φωτός.

- Περίπτωση διαφανούς υμενίου πάνω σε διαφανές υπόστρωμα
Στην περίπτωση αυτή γίνονται σημαντικές απλοποιήσεις. Ισχύουν τα εξής: $h_1 = h_2 = 0$, $\alpha_1 = 0$, $A = C = 2g_1 g_2$ και $B = D = 0$. Εδώ $K_1 = K_2 = 0$, εφόσον το υμένιο και το υπόστρωμα είναι διαφανή. Οι εκφράσεις για τα R και T τροποποιούνται ως εξής:

$$R_1 = \frac{g_1^2 + g_2^2 + 2g_1 g_2 \cos 2\gamma_1}{1 + g_1^2 g_2^2 + 2g_1 g_2 \cos 2\gamma_1} \quad (86)$$

$$T_1 = \frac{n_2}{n_0} \frac{(1 + g_2)^2 (1 + g_1)^2}{1 + g_1^2 g_2^2 + 2g_1 g_2 \cos 2\gamma_1} \quad (87)$$

5.4.3 Μέθοδος υπολογισμού πάχους λεπτών υμενίων με την βοήθεια της μεθόδου *Manifacier*

Μία απλή, αλλά αρκετά δημοφιλής μέθοδος προσδιορισμού του πάχους υμενίων που παρουσιάζουν απορρόφηση είναι εκείνη του *J.C. Manifacier*. Οι *Manifacier*, *Gasiot* και *Fillard* πρότειναν μία μέθοδο προσδιορισμού του πάχους των εναποτιθέμενων υμενίων, με βάση τα μήκη κύματος και τους δείκτες διαθλάσεως δύο μεγίστων ή ελαχίστων στα φάσματα ανακλαστικότητας ή διαπερατότητας των υμενίων.

Η σχέση που δίνει το πάχος είναι η ακόλουθη:

$$d_1 = \frac{M * \lambda_1 * \lambda_2}{2[n(\lambda_1) * \lambda_2 - n(\lambda_2) * \lambda_1]} \quad (88)$$

όπου:

λ_1 και λ_2 : τα μήκη κύματος των δύο ακροτάτων,

$n(\lambda_1), n(\lambda_2)$: οι αντίστοιχοι δείκτες διάθλασης και

M : ο αριθμός των ταλαντώσεων μεταξύ των δύο επιλεγθέντων ακροτάτων.

Για την περίπτωση δύο διαδοχικών ελαχίστων ή μεγίστων, είναι $M=1$ και η σχέση υπολογισμού του πάχους παίρνει τη μορφή:

$$d_1 = \frac{\lambda_1 * \lambda_2}{2[n(\lambda_1) * \lambda_2 - n(\lambda_2) * \lambda_1]} \quad (89)$$

Ο δείκτης διάθλασης $n(\lambda)$, υπολογίζεται με την βοήθεια τύπων από την βιβλιογραφία:

$$n^2 = 1 + \frac{A * \lambda^2}{\lambda^2 - B^2} \quad (90)$$

όπου μετασχηματίζεται σε:

$$n = \sqrt{1 + \frac{A * \lambda^2}{\lambda^2 - B^2}} \quad (91)$$

όπου για υμένιο ZnO – οξειδίου του ψευδαργύρου τα A, B βρέθηκαν να παίρνουν τις εξής τιμές:

- $A=1.881$ και
- $B=0.0538 \mu m$

Η παραπάνω μέθοδος είναι εύχρηστη για υμένια σχετικά μεγάλου πάχους, τα οποία παρουσιάζουν διακυμάνσεις – ακρότατα στα διαγράμματα του φάσματος της διαπερατότητάς τους.

5.4.4 Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού πάχους πολύ λεπτών υμενίων

Η προσεγγιστική αυτή μέθοδος, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό του πάχους πολύ λεπτών υμενίων, τα οποία δεν παρουσιάζουν ακρότατα (στα φάσματα ανακλαστικότητας και διαπερατότητας), προκειμένου να υπολογιστεί το πάχος τους με την μέθοδο του *Manifacier*. Αυτό ισχύει στην περίπτωση των οξειδίων του ψευδαργύρου, για υμένια με πάχος μικρότερο των $150nm$ περίπου.

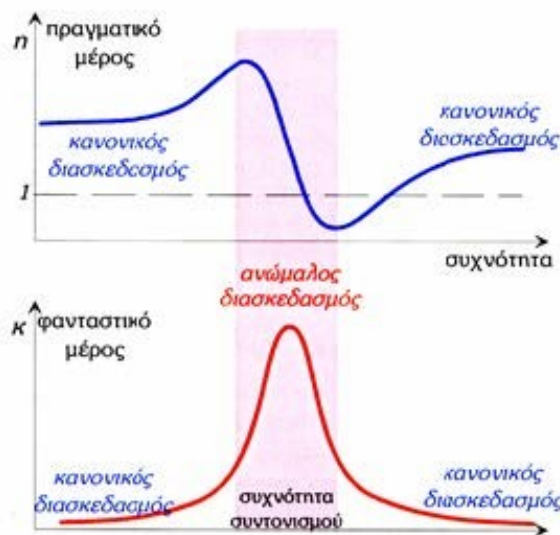
Μια πρώτη προσπάθεια, μπορεί να γίνει προγραμματίζοντας γνωστά προγράμματα, όπως *Microsoft Excel*, *Mathematica* ή *Matlab*. Εκεί εισάγονται οι σχέσεις 85–87, ανάλογα με την περίπτωση του υμενίου και του υποστρώματος που έχουμε κάθε φορά και οι οποίες περιγράφουν την Διαπερατότητα ($T\%$) και την Ανακλαστικότητα ($R\%$) του συστήματος “αέρας – υμένιο–υπόστρωμα” και οι οποίες υπολογίζονται επακριβώς. Η πρώτη ρυθμιζόμενη μεταβλητή που χρησιμοποιείται είναι το πάχος του υμενίου d_1 . Η εξάρτηση των οπτικών σταθερών n και k του υμενίου, δίδονται με καλή προσέγγιση από τις σχέσεις 91 και 92 αντίστοιχα. Η εξάρτηση των οπτικών σταθερών από το μήκος κύματος λ , γίνεται κατανοητή με βάση την Εικόνα 83, λαμβάνοντας υπ’ όψη την απορρόφηση του ZnO στην

περιοχή $\lambda < 375 \text{ nm}$. Συνολικά, το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει 5 μεταβλητές οι οποίες με τεχνικές των ελαχίστων τετραγώνων μπορούν να βρεθούν.

Σε κοινή γραφική παράσταση των θεωρητικών καμπυλών Διαπερατότητας- Μήκους κύματος ή Ανακλαστικότητας-Μήκους κύματος με τις αντίστοιχες πειραματικές, μεταβάλλοντας το πάχος των υμενίων και των υπολοίπων σταθερών, προσεγγίζονται όσο το δυνατόν καλύτερα οι πειραματικές και οι θεωρητικές καμπύλες.

Είναι κατανοητό ότι η εκ των προτέρων γνώση του πάχους των υμενίων βοηθά ιδιαίτερα στη βελτίωση της πειραματικής διαδικασίας, καθότι θα υπάρχει η δυνατότητα να καθορίζονται ακριβέστερα οι συνθήκες της εναπόθεσης για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.

$$K(\lambda) = \alpha + \frac{b}{\lambda^2} \quad (92)$$



Σχήμα 83: Πραγματικό και φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης $n(\lambda)$ υλικού γύρω από μία συχνότητα συντονισμού

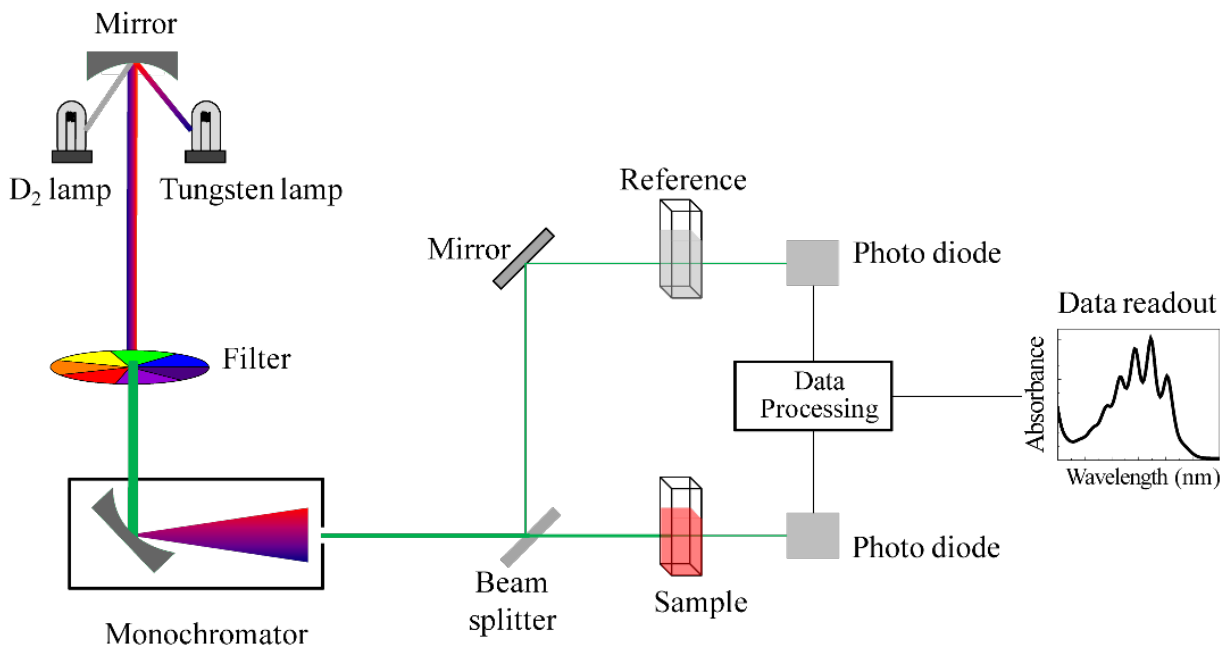
5.5 Φασματοφωτόμετρο (*Spectrophotometer*)

Στην χημεία, η φασματομετρία (*Spectrophotometry*) είναι η ποσοτική μέτρηση της ιδιότητας της ανάκλασης ή της απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα υλικό. Η φασματομετρία ως κύριο εργαλείο χρησιμοποιεί το φασματοφωτόμετρο (*Spectrophotometer*), το οποίο έχει την ικανότητα μέτρηση της διαπερατότητας ή της ανάκλασης που παρουσιάζουν διαφανή ή αδιαφανή υλικά. Ιστορικά, τα φασματοφωτόμετρα χρησιμοποιούν μονοχρωμάτορες με φράγμα περίθλασης για να παράξουν το φάσμα, όμως στις σύγχρονες εφαρμογές χρησιμοποιούνται τεχνικές *Fourier* για την δημιουργία του φάσματος.

Η φασματομετρία υπεριώδους – ορατού φωτός (*UV/Vis Spectrophotometer*) αναφέρεται στην απορρόφηση ή εκπομπή φωτός από την περιοχή του υπεριώδους ή του ορατού φωτός και αποτελεί μια μη καταστροφική διαδικασία ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται μήκη κύματος

φωτός από την περιοχή του ορατού (380 – 780nm) και τις κοντινές γειτονικές περιοχές τους (200 – 380nm).

Κατά την μελέτη ενός υλικού, αρχικά το δείγμα βρίσκεται σε διάλυμα και στην συνέχεια τοποθετείται σε κυψελίδα, η οποία εισάγεται στο φασματοφωτόμετρο. Φως συγκεκριμένου μήκους κύματος εκπέμπεται προς το δείγμα και γίνεται μέτρηση της ποσότητας του φωτός που διαπέρασε από το δείγμα. Επειδή τα δείγματα και το διάλυμα μπορεί να απορροφούν τα ίδια μήκη κύματος, το σύστημα διαθέτει μια κυψελίδα που περιέχει μόνο το διάλυμα και χρησιμεύει σαν σημείο αναφοράς στις μετρήσεις.



Σχήμα 84: Σχηματική απεικόνιση UV/Vis Spectrophotometer

Η ποσότητα του φωτός που θα διαπεράσει το δείγμα και το διάλυμα ορίζεται ως διαπερατότητα T (*Transmittance*). Διαπερατότητα ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του φωτός που εκπέμπεται στο δείγμα και του φωτός που διέρχεται μέσω του δείγματος. Η μαθηματική σχέση που διέπει τα παραπάνω είναι:

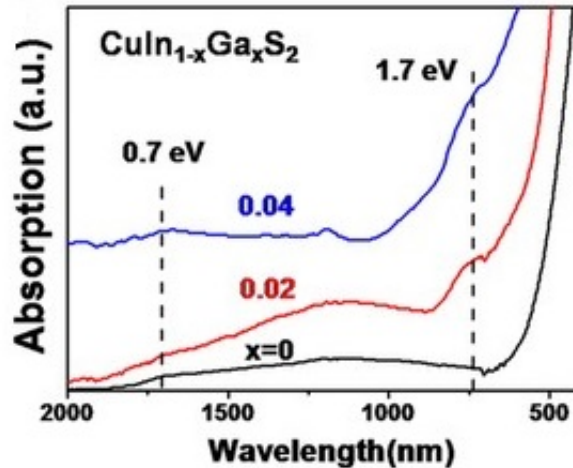
$$T = \frac{I}{I_0} \quad (93)$$

Όπου, I_0 : είναι η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται στο δείγμα I : είναι η ένταση της ακτινοβολίας που διαπερνά το δείγμα

Απορροφητικότητα ορίζεται η ποσότητα φωτός που θα απορροφηθεί από το δείγμα και μαθηματικά εκφράζεται από τον αρνητικό λογάριθμο της διαπερατότητας και η σχέση που διέπει τα δυο μεγέθη είναι:

$$A = -\log T = -\log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (94)$$

Μέσω της λάμπας πυρακτώσεως (*tungsten lamp*) και την λάμπα δευτερίου (*D2 lamp*) παράγονται αρχικά τα μήκη κύματος του ορατού και του υπεριώδους φωτός αντίστοιχα. Μέσω του μονοχρωμάτορα επιτυγχάνουμε να δώσουμε στην ακτίνα φωτός το επιθυμητό μήκος κύματος και στην συνέχεια την οδηγούμε στο δείγμα και το διάλυμα αναφοράς. Τέλος, μέσω φωτοδιόδων συλλέγουμε τις τελικές ακτίνες και αυτές αποθηκεύονται και αναλύονται από κατάλληλο λογισμικό.



Σχήμα 85: Τυπικά αποτελέσματα φασματομετρίας σε χαλκοπυρίτη

5.6 Μέθοδος *Tauc*

Η μέθοδος *Tauc Plot* χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ενεργειακού διακένου των λεπτών υμενίων που είναι ημιαγωγοί άμεσου διακένου. Αν το ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής αγνοείται, τότε η μορφή του συντελεστή απορρόφησης α είναι συνάρτηση της ενέργειας του φωτονίου $h\nu$. Ο κύριος τύπος που χρησιμοποιείται για την σχεδίαση του διαγράμματος *Tauc* είναι:

$$\alpha(\nu)n_0h\nu \approx (h\nu - E_g)^n \quad (95)$$

Όπου,

α : είναι ο συντελεστής απορρόφησης

h : η σταθερά *Planck*

ν : η συχνότητα της ακτινοβολίας

E_g : το ενεργειακό διάκενο n_0 : ο δείκτης διάθλασης που υποθέτουμε ότι παραμένει σταθερός κατά την διάρκεια της ακτινοβολίας

Ο εκθέτης n εξαρτάται από την φύση του υλικού που χρησιμοποιείται. Για υλικά, όπως η χαλκοπυρίτες η τιμή που παίρνει είναι το $\frac{1}{2}$. Επομένως, η σχέση τροποποιείται ως:

$$\alpha(\nu)n_0h\nu \approx (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (96)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης α υπολογίζεται από το φάσμα της διαπερατότητας του δείγματος από την εξίσωση:

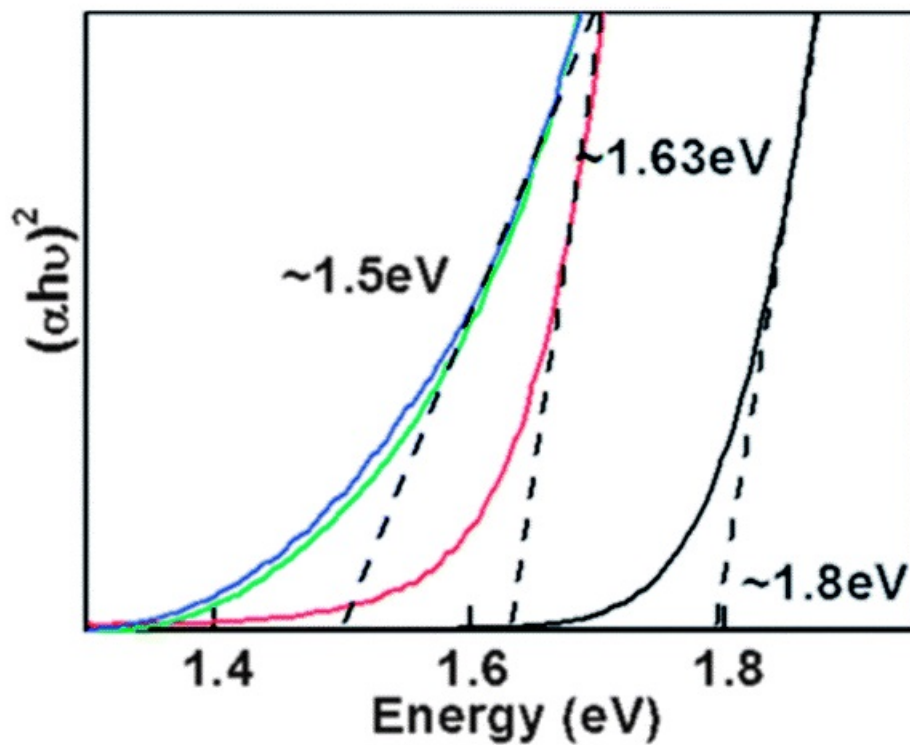
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (97)$$

Όπου,

T : η διαπερατότητα του υμενίου

d : το πάχος του υμενίου

Για τον υπολογισμό του ενεργειακού διακένου του υμενίου, σχεδιάζεται το διάγραμμα T_{auc} , όπου στον άξονα x έχουμε την ενέργεια του φωτονίου ($h\nu$) και στον άξονα y το όρο $(\alpha h\nu)^2$. Στην συνέχεια, φέρεται η εφαπτομένη στην καμπύλη του διαγράμματος (86). Η τομή της εφαπτομένης με τον άξονα x , όπου η απορρόφηση είναι μηδενική, μας δίνει την τιμή του ενεργειακού διακένου του υμενίου. Όσο μικρότερο είναι το ενεργειακό διάκενο του υμενίου, τόσο μεγαλύτερο είναι το φάσμα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας.

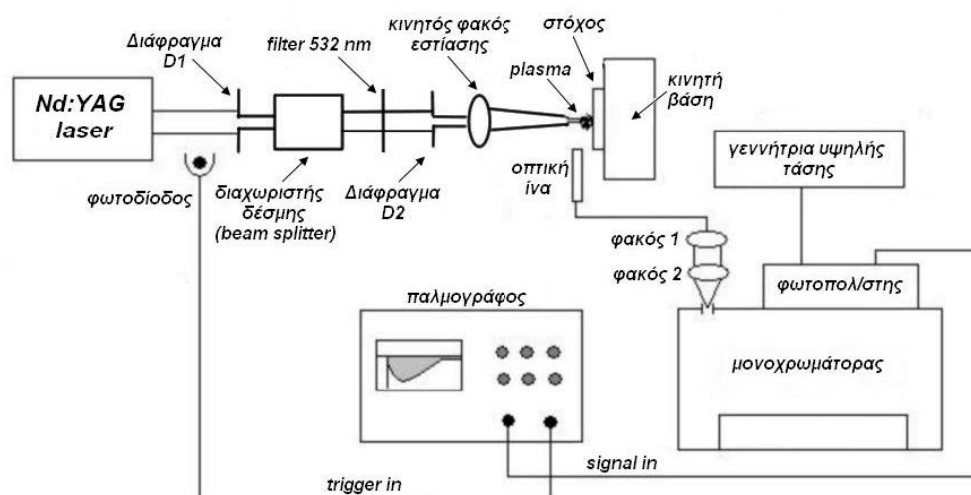


Σχήμα 86: Παράδειγμα υπολογισμού ενεργειακού διακένου με την μέθοδο T_{auc}

6 Πειραματική διάταξη

6.1 Περιγραφή της διάταξης *Scribing*

Στην παράγραφο αυτή γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης για την εγχάραξη με *laser* λεπτών υμενίων για φωτοβολταϊκά στοιχεία δεύτερης γενιάς. Για την εγχάραξη των υμενίων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη η οποία φαίνεται στην Εικόνα 87.



Σχήμα 87: Διαγραμματική αναπαράσταση της διάταξης εγχάραξης

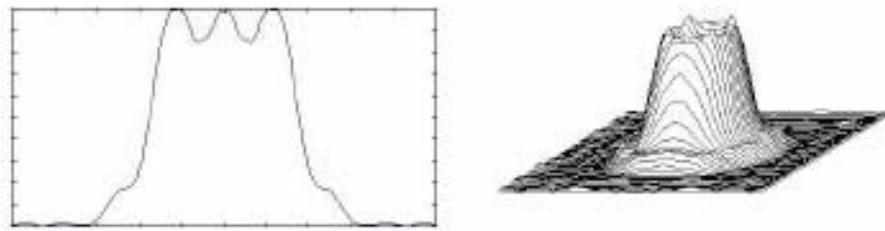
Η παραπάνω διάταξη μπορεί να χωριστεί σε δύο υποσυστήματα:

1. Υποσύστημα [1]: Περιλαμβάνει το *Nd : YAG laser* και οπτικά εξαρτήματα όπως διαφράγματα, διαχωριστή δέσμης, φίλτρα, φακούς εστίασης, τα οποία διαμορφώνουν την δέσμη του *laser* μέχρι αυτή να φτάσει στον στόχο.
2. Υποσύστημα [2]: Περιλαμβάνει οπτική ίνα, φωτοδίοδο, μονοχρωμάτορα, παλμογράφο και φωτοπολλαπλασιαστή, τα οποία είναι διαγνωστικά και βοηθούν να βρούμε την εστία του τελικού φακού, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του πλάσματος σύμφωνα με την ένδειξη του παλμογράφου.

6.1.1 Υποσύστημα [1]

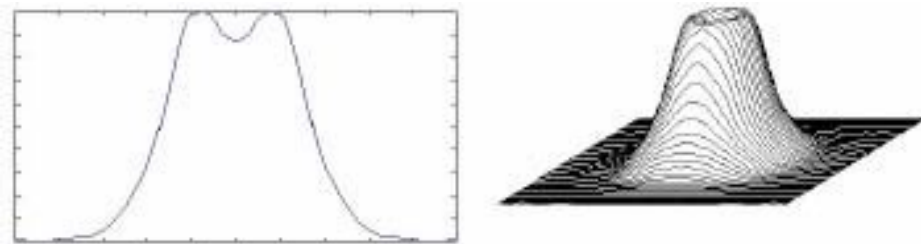
6.1.1.1 Οπτικά εξαρτήματα

Η δέσμη όταν εξέρχεται από το *laser* δεν είναι ομοιόμορφη. Παρουσιάζει σημεία στα οποία η ενέργεια είναι μεγαλύτερη, “*hot spots*”, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 88. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αποδόμηση του υλικού να μην γίνεται ομοιόμορφα, αλλά να σχηματίζονται κρατήρες.



Σχήμα 88: Το προφίλ της δέσμης όταν εξέρχεται από το *Nd:YAG laser*

Με στόχο να διαμορφώσουμε το προφίλ της δέσμης και να ομαλοποιήσουμε τις ανομοιομορφίες που παρουσιάζει, χρησιμοποιήσαμε μία διάταξη αποτελούμενη από διαφράγματα, φακούς και φίλτρα έτσι ώστε τελικά να έχουμε ένα προφίλ κοντά σε αυτό της Εικόνας 89.



Σχήμα 89: Το ομογενοποιημένο προφίλ της δέσμης

Η διάταξη που αναπτύξαμε για το σκοπό αυτό φαίνεται στην Εικόνα 6.14 και περιλαμβάνει δύο διαφράγματα, $D1$ και $D2$, ένα διαχωριστή δέσμης (*beam splitter*), ένα φίλτρο του μήκους κύματος 532 nm (532 nm filter) και ένα κινητό φακό εστίασης της δέσμης *laser*.

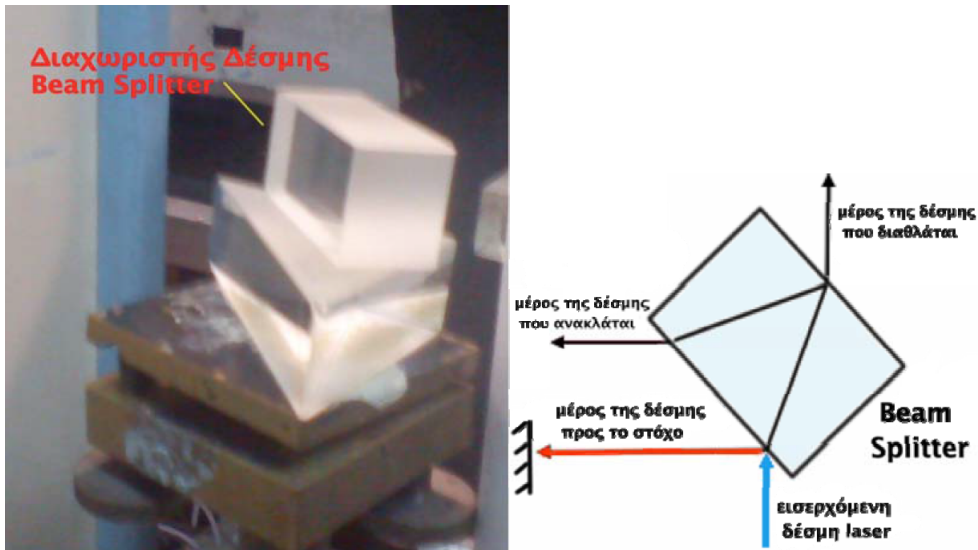
Η δέσμη του *laser* διέρχεται αρχικά από το διάφραγμα $D1$, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 90. Με τη χρήση αυτού του διαφράγματος αποκόπτουμε τις περιφερειακές περιοχές της δέσμης, των οποίων η ενέργεια είναι αρκετά χαμηλότερη και απομονώνουμε αυτές που η ενέργεια είναι μέγιστη. Ακόμα, διαμορφώνουμε τη διάμετρο της δέσμης στην διάμετρο που επιθυμούμε κάθε φορά, συνήθως στα 6 mm .



Σχήμα 90: Το διάφραγμα $D1$ της πειραματικής διάταξης

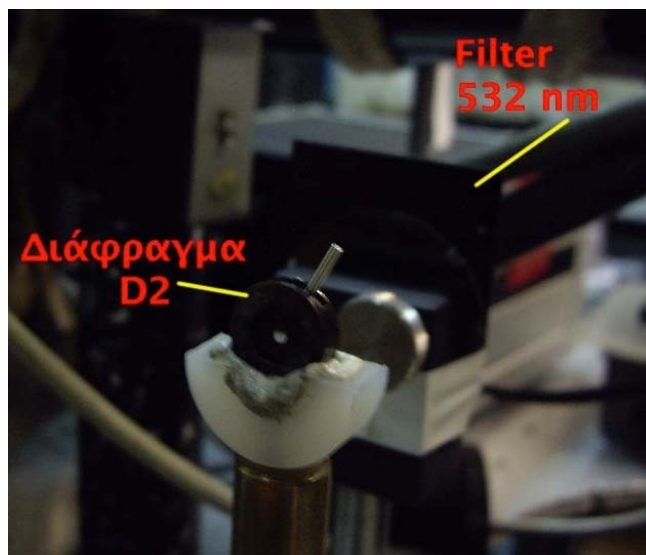
Στη συνέχεια, η δέσμη του *laser* διέρχεται από το διαχωριστή δέσμης (*beam splitter*). Ο λόγος που χρησιμοποιήσαμε τον διαχωριστή δέσμης (Εικόνα 91) είναι ο εξής: Με σκοπό την επίτευξη σταθερής ενέργειας δέσμης, εργαστήκαμε σε μεγάλες για τα δεδομένα του *scribing* ενέργειες *laser*. Η ιδιότητα του διαχωριστή δέσμης είναι ότι ανακλά μέρος της εισερχόμενης σε αυτό δέσμης. Με αυτό τον τρόπο, μειώνουμε αισθητά την ενέργεια της δέσμης του *laser* στα επιθυμητά επίπεδα, χωρίς να αλλοιώνουμε τη μορφή της.

Στο πείραμά μας, με τη χρήση του διαχωριστή δέσμης, εκμεταλλευτήκαμε μόλις το 10% της ενέργειας της αρχικής δέσμης *laser*, για να πραγματοποιήσουμε την εγχάραξη των λεπτών υμενίων. Ο διαχωριστής δέσμης που χρησιμοποιήσαμε και η αρχή λειτουργίας του φαίνονται στην Εικόνα 91.β.



Σχήμα 91: (α) Ο διαχωριστής δέσμης της πειραματικής διάταξης, (β) Η λειτουργία του διαχωριστή δέσμης

Τοποθετήσαμε ένα διαχωριστή αρκετά παχύ, ώστε να χρησιμοποιήσουμε για την εγχάραξη το μέρος της αρχική δέσμης με τη μικρότερη ενέργεια, το οποίο ανακλάται προς τη διεύθυνση του στόχου, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (κόκκινο βέλος). Τα μέρη της αρχικής δέσμης με τις μεγαλύτερες ενέργειες χρησιμοποιήθηκαν για άλλους σκοπούς του εργαστηρίου (π.χ. εναπόθεση λεπτών υμενίων με τη μέθοδο της *PLD*). Με αυτό τον τρόπο, μπορούσαμε ταυτόχρονα να διεξάγουμε συνδυασμό πειραμάτων, χωρίς να χρειάζεται να αλλάζουμε κάθε φορά τη διάταξη. Έπειτα, η δέσμη διέρχεται από ένα φίλτρο (*filter 532 nm*) με το οποίο αποκόπτουμε τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας κοντά στα 532 nm και από το διάφραγμα *D2* (Εικόνα 92), το οποίο χρησιμεύει για μειώσουμε και άλλο την διάμετρο της δέσμης, φτάνοντάς την περίπου στα 2 mm .

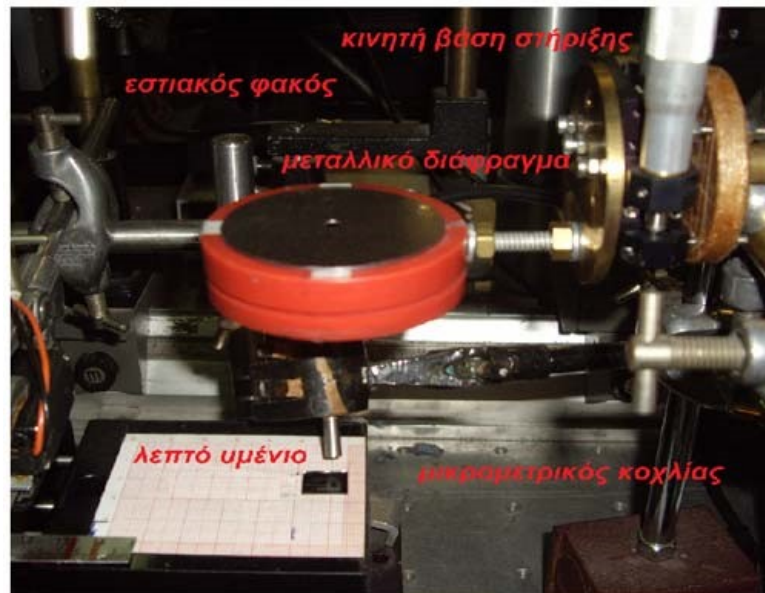


Σχήμα 92: Διάφραγμα *D2* και *filter 532 nm* της πειραματικής διάταξης

Στη συνέχεια, η δέσμη διέρχεται από τον φακό εστίασης, ο οποίος έχει τοποθετηθεί πάνω σε

κινητή βάση με μικρομετρικό κοχλίας (Εικόνα 93). Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να κινούμε το φακό κάθετα προς τον άξονα που βρίσκεται τοποθετημένος ο στόχος.

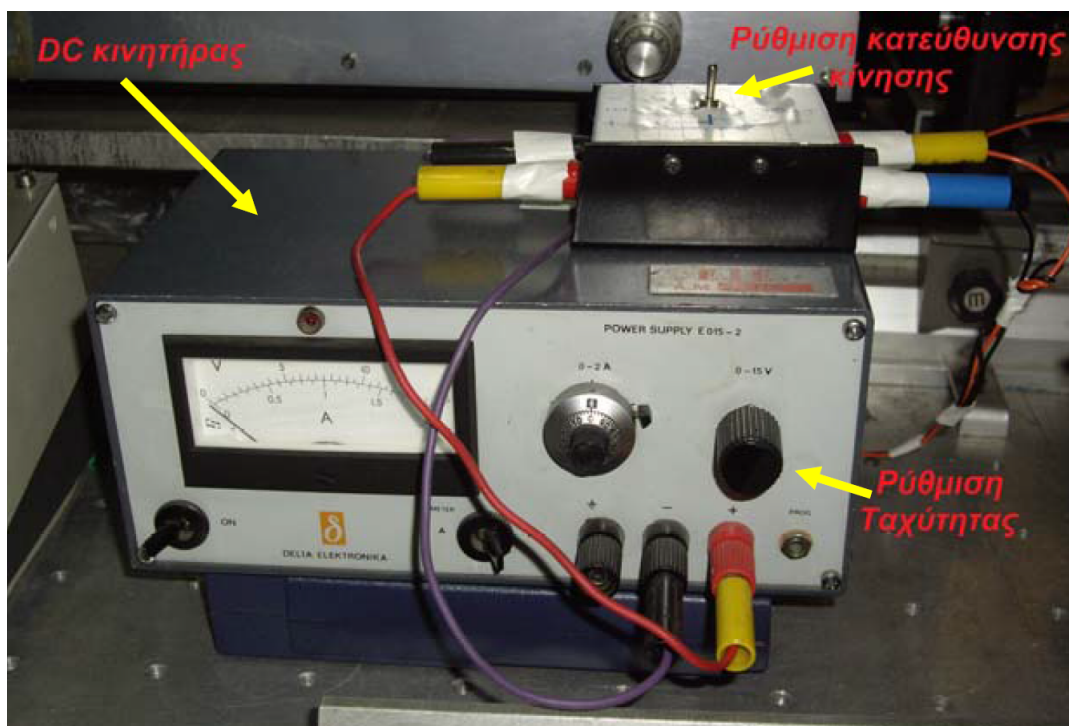
Κάθε φορά που μεταβάλλεται η ενέργεια του *laser* ή το πάχος του στόχου, μεταβάλλεται αντίστοιχα και η εστιακή απόσταση του φακού. Τοποθετώντας τον φακό εστίασης στην κινητή βάση με τον μικρομετρικό κοχλίας, επιτυγχάνουμε εύκολα και με ακρίβεια την επανατοποθέτησή του στην κατάλληλη κάθε φορά θέση, ώστε να δουλεύει αποδοτικά η διάταξη.



Σχήμα 93: Φακός εστίασης, μικρομετρικός κοχλίας κίνησης της βάσης στήριξης του φακού και μεταλλικό διάφραγμα

Πάνω στον φακό εστίασης τοποθετήσαμε ένα μεταλλικό διάφραγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 93. Σκοπός αυτού του διαφράγματος είναι να αποκόψει τυχόν ανακλάσεις τις δέσμης του *laser* να εισέλθουν στον φακό και να δημιουργήσουν ανομοιομορφίες κατά την εγχάραξη.

Τέλος, η δέσμη καταλήγει στην επιφάνεια του στόχου, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω σε μία κινητή βάση. Η κίνηση της βάσης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός *DC* κινητήρα που φαίνεται στην Εικόνα 94.



Σχήμα 94: DC κινητήρας της πειραματικής διάταξης για κίνηση της βάσης τοποθέτησης του στόχου

Ο κινητήρας περιστρέφει τροχό, ο οποίος μέσω ενός υμάντα είναι συνδεδεμένος με μικρομετρικό κοχλία που κινεί τη βάση. Η βάση έχει τη δυνατότητα να κινείται αριστερά ή δεξιά, μέσω του διακόπτη που φαίνεται στην Εικόνα 94. Ο διακόπτης αλλάζει την πολικότητα του ρεύματος και κινεί δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα αντίστοιχα τον υμάντα, οπότε και ρυθμίζει τη διεύθυνση της κίνησης. Η ρύθμιση της ταχύτητας της βάσης γίνεται αυξομειώνοντας την τάση του κινητήρα, μέσω του ρυθμιστή τάσης.

6.1.2 Υποσύστημα [2]

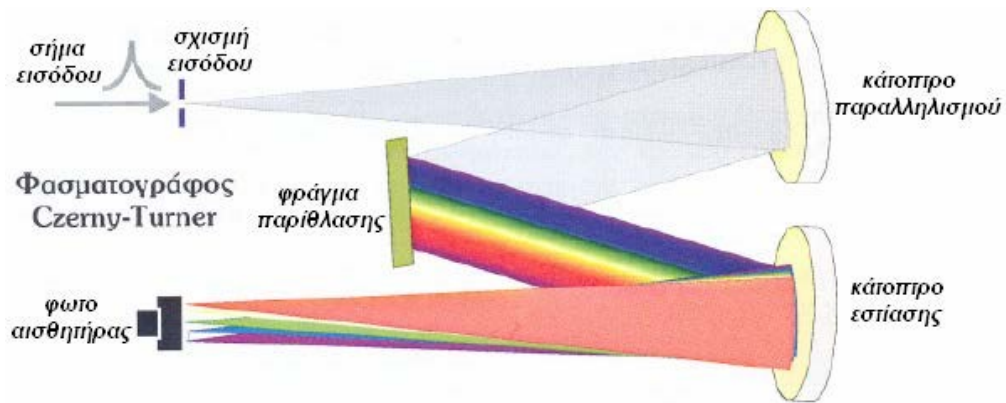
6.1.2.1 Φασματόμετρο ή Μονοχρωμάτορας

Το πιο σημαντικό όργανο είναι ο μονοχρωμάτορας ή φασματόμετρο τύπου *Czerny – Turner*, με φράγμα περίθλασης (*grating*). Είναι της εταιρείας *Jobin – Yvon* με εστιακή απόσταση $f = 600 \text{ mm}$. Το όργανο αυτό είναι σχεδιασμένο για να αναλύει την ακτινοβολία στα επιμέρους μήκη κύματος από τα οποία αποτελείται. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ανακλαστικό φράγμα περίθλασης που αποτελεί και το κεντρικό στοιχείο της διάταξης.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 95 τα μέρη ενός μονοχρωμάτορα είναι:

- Μια σχισμή εισόδου της δέσμης του φωτός
- Ένα πρώτο κοίλο κάτοπτρο, κάτοπτρο παραλληλισμού, που διαμορφώνει κατάλληλα τη δέσμη του φωτός
- Ένα φράγμα περίθλασης που αναλύει το φως στα επιμέρους μήκη κύματος από τα οποία αποτελείται
- Ένα δεύτερο κοίλο κάτοπτρο, συγκεντρωτικός ανακλαστήρας, που διαμορφώνει κατάλληλα τη

- δέσμη, έτσι ώστε να μπορεί να εξέλθει από τη σχισμή εξόδου μόνο το επιθυμητό μήκος κύματος.
- Μία σχισμή εξόδου



Σχήμα 95: Αρχή λειτουργίας φράγματος περίθλασης τύπου Czerny – Turner

Το φως εισέρχεται στη διάταξη από μία σχισμή εισόδου ελεγχόμενου πλάτους (*entrance slit*). Το αποκλίνον φως με χαρακτηριστική γωνία που καθορίζεται από τη γεωμετρία εισόδου, παραλληλίζεται είτε από έναν παραλληλιστή φακό, είτε από ένα κάτοπτρο παραλληλισμού (*collimator optics*), και η παράλληλη δέσμη απ' όλες τις χρωματικές συνιστώσες προσπίπτει πάνω στο φράγμα περίθλασης. Εκεί αναλύεται στις επιμέρους δέσμες, ανάλογα τα μήκη κύματος από τα οποία αποτελείται. Τέλος, οι δέσμες αυτές εστιάζονται κατάλληλα πάνω σε κάποια διάταξη παρατήρησης μέσω του κατόπτρου εστίασης.

Το φράγμα περίθλασης είναι μία πλάκα, συνήθως επικαλυμμένη με κατάλληλο υλικό, που έχει ανακλαστικές ιδιότητες και είναι χαραγμένη με ειδικό τρόπο. Στηρίζεται πάνω σε μία περιστροφικά κινούμενη βάση. Υπάρχουν κάποια κατασκευαστικά δεδομένα για κάθε φράγμα, τα οποία καθορίζουν τη διασπορά και τη διαχωριστική ικανότητά του βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$m * \lambda = d * (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (98)$$

Όπου:

m : είναι ένας ακέραιος αριθμός μήκων κύματος, η τάξη ακτινοβολίας

d : η απόσταση μεταξύ δύο χαραγών

α : η γωνία πρόσπτωσης

β : η γωνία ανάκλασης (ενίσχυση ακτινοβολίας)

και

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = N * m \quad (99)$$

Όπου,

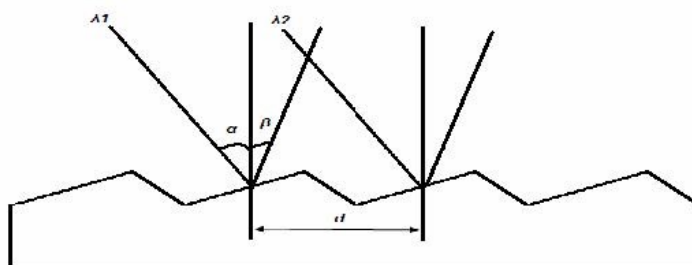
R : η διαχωριστική ικανότητα του φράγματος

N : ο συνολικός αριθμός των χαραγών

λ : ο μέσος όρος των μηκών κύματος των δύο γειτονικών φασματικών γραμμών

$\delta\lambda$: η διαφορά μήκους κύματος των δύο γειτονικών φασματικών γραμμών

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 96, η ανάλυση της ακτινοβολίας οφείλεται στο φαινόμενο της περίθλασης. Θεωρώντας, για λόγους ευκολίας, ότι η εισερχόμενη δέσμη αποτελείται από μόνο δύο μήκη κύματος λ_1 και λ_2 , καθώς αυτή προσπίπτει στο φράγμα, η γωνιακή διασπορά των διαφορετικών μηκών κύματος γίνεται με περίθλαση.



Σχήμα 96: Διαγραμματική απεικόνιση του μηχανισμού περίθλασης σε φράγμα ανάκλασης

Κάθε μονοχρωμάτορας έχει καλύτερη ανάλυση σε μία συγκεκριμένη περιοχή μηκών κύματος, γι' αυτό συχνά αναφερόμαστε σε μονοχρωμάτορες υπέρυθρου, ορατού και υπεριώδους. Έτσι, ανάλογα με την περιοχή μηκών κύματος επιλέγονται και τα υλικά κατασκευής των διαφόρων εξαρτημάτων του.

Η εξερχόμενη δέσμη από το μονοχρωμάτορα περιέχει πάντα μικρές ποσότητες ακτινοβολίας σε μήκη κύματος διαφορετικά από το επιλεγμένο. Αυτό είναι αποτέλεσμα ανακλάσεων που συμβαίνουν σε διάφορα μέρη του μονοχρωμάτορα. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με τη χρήση διπλού φασματομέτρου, το οποίο αποτελείται από δύο απλά που είναι τοποθετημένα το ένα μπροστά από το άλλο και ενώνονται μέσω μίας κοινής σχισμής.

Ευθυγράμμιση Μονοχρωμάτορα

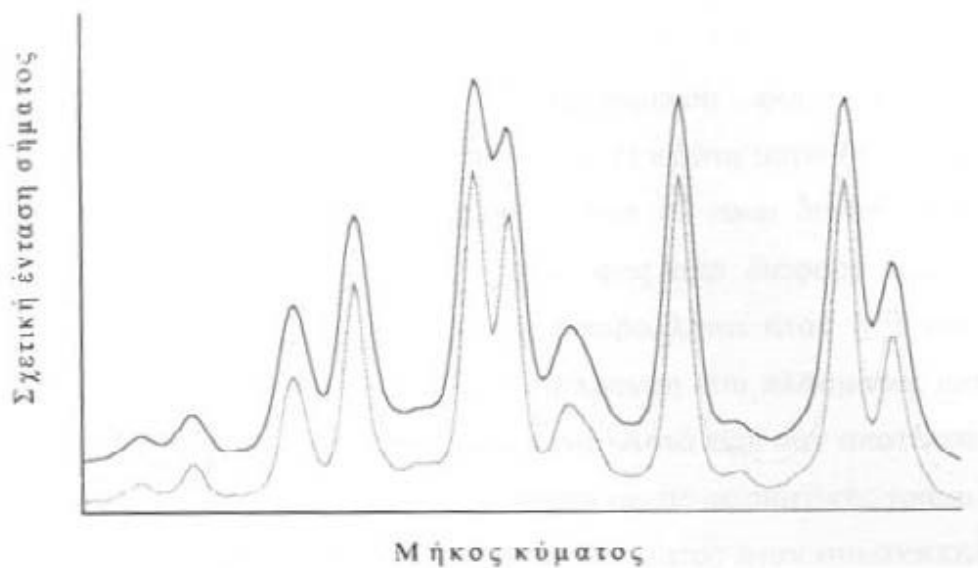
Τα κρίσιμα σημεία λειτουργίας ενός μονοχρωμάτορα είναι η απεικόνιση του φωτός στο φράγμα περίθλασης και το πλάτος της σχισμής εισόδου. Για να λειτουργεί ικανοποιητικά ένας φασματογράφος θα πρέπει η κάλυψη του εισερχόμενου, από την σχισμή εισόδου, φωτός πάνω στην επιφάνεια του φράγματος να είναι η μεγαλύτερη δυνατή. Από την απεικόνιση αυτή κρίνεται αν και πόσο είναι ικανό το σύστημα να διαχωρίσει δύο διπλανές φασματικές γραμμές (διακριτότητα μονοχρωμάτορα).

Η βασική ρύθμιση για την σωστή γεωμετρία της δέσμης φωτός μέσα στον μονοχρωμάτορα γίνεται με τη χρήση ενός *laser* ηλίου - νέου (*He-Ne*). Ο μονοχρωμάτορας ρυθμίζεται στα 633.5 nm , όπου είναι το μήκος κύματος που εκπέμπει ένα *laser He-Ne*, και οι σχισμές εισόδου και εξόδου ανοίγονται στα $500 \mu\text{m}$ ώστε να περνάει μεγάλη ποσότητα φωτός. Η ακτίνα του *laser He-Ne* περνάει από τη σχισμή εξόδου και χτυπάει στο κέντρο του συγκεντρωτικού κατόπτρου. Στη συνέχεια, κατευθύνεται στο κέντρο του φράγματος, από εκεί στο κέντρο του κατόπτρου ευθυγράμμισης και βγαίνει από την σχισμή εισόδου και η εξερχόμενη δέσμη τοποθετείται στην έξοδο της οπτικής ίνας.

Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι το κάτοπτρο ευθυγράμμισης να καλύπτεται πλήρως με φως (έχει διαστάσεις $10 \times 10 \text{ cm}$), ώστε στέλνοντάς το στο φράγμα να φωτίζει όσο γίνεται περισσότερες χαραγές (*grooves*) του. Όσο περισσότερες γραμμές φωτίζονται, τόσο αυξάνεται η διακριτική του ικανότητα, δηλαδή η ικανότητα να διαχωρίζει όλο και πιο κοντινές μεταξύ τους φασματικές γραμμές. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή της εστιακής απόστασης και της θέσης του φακού

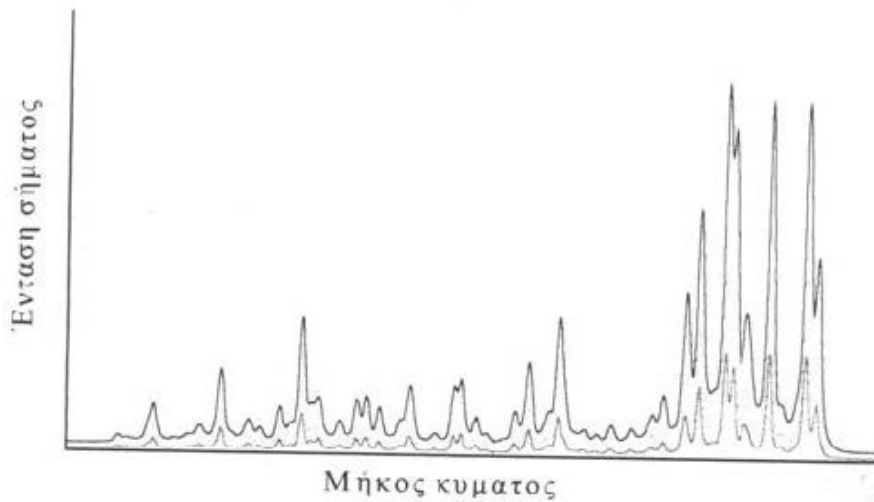
που μεταφέρει το φως από την έξοδο της οπτικής ίνας στην σχισμή εισόδου του φασματογράφου.

Ο ρόλος της σχισμής εισόδου είναι να ρυθμίσει κάθε φορά πόσο φως θα εισέρχεται στο φράγμα για ανάλυση. Όσο μικρότερη είναι η σχισμή εισόδου τόσο καλύτερα αναλύεται στα επιμέρους μήκη κύματος. Το πλάτος των φασματικών γραμμών μικραίνει, δηλαδή οι γραμμές γίνονται πιο λεπτές, με συνέπεια να ξεχωρίζουν καλύτερα τα όρια τους. Μειώνοντας όμως το πλάτος της σχισμής εισόδου η ένταση του σήματος μειώνεται με αποτέλεσμα κάποιες φασματικές γραμμές να εξασθενούν μέχρι εξαφάνισής τους. Μελετώντας το σήμα συναρτήσει του πλάτους της σχισμής εισόδου παρατηρείται μία περιοχή τιμών για την οποία και η ένταση του σήματος είναι αρκετή ώστε να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα και η διακριτική ικανότητα του φασματομέτρου είναι η καλύτερη δυνατή. Από ένα σημείο και μετά η μείωση του πλάτους έχει αντίθετα αποτελέσματα.



Σχήμα 97: Επίδραση του πλάτους της σχισμής εισόδου στην ευκρίνεια του φάσματος

Στην Εικόνα 97 και Εικόνα 98 που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση του πλάτους της σχισμής εισόδου στις δύο παραμέτρους. Στην Εικόνα 97, όσο μικραίνει η σχισμή εισόδου, τόσο λεπταίνουν οι φασματικές γραμμές και η μεταξύ τους επικάλυψη.

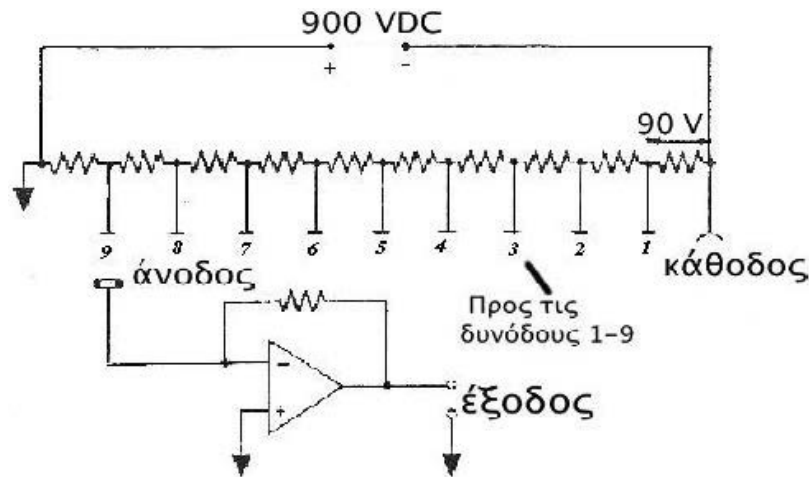


Σχήμα 98: Επίδραση του πλάτους της σχισμής εισόδου στην ένταση του φάσματος

6.1.2.2 Φωτοπολλαπλασιαστής

Πολύ συχνά τα οπτικά σήματα που καταγράφονται και επεξεργάζονται είναι ασθενή. Για να είναι δυνατή η καταγραφή και η επεξεργασία τους, χρησιμοποιούνται διάφοροι ανιχνευτές φωτονίων, οι οποίοι μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και ταυτόχρονα το ενισχύουν, έτσι ώστε να μπορεί να καταγραφεί και να γίνει αντικείμενο επεξεργασίας.

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένα όργανο πολύ σημαντικό στη φασματοσκοπία. Στην Εικόνα 99 φαίνονται τα βασικά μέρη ενός φωτοπολλαπλασιαστή.



Σχήμα 99: Διαγραμματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων ενός φωτοπολλαπλασιαστή

Η φωτοευαίσθητη κάθοδος του οργάνου έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ηλεκτρόνια κάθε φορά που πάνω της προσπίπτει ένα φωτόνιο. Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε ηλεκτρικό πεδίο τέτοιο, που οδηγούν σε διαδοχικά ηλεκτρόδια (δύνοδοι) και έχουν την ιδιότητα να εκπέμπουν αρκετά ηλεκτρόνια για κάθε ένα ηλεκτρόνιο που προσπίπτει σε αυτά. Η δύνοδος βρίσκεται σε

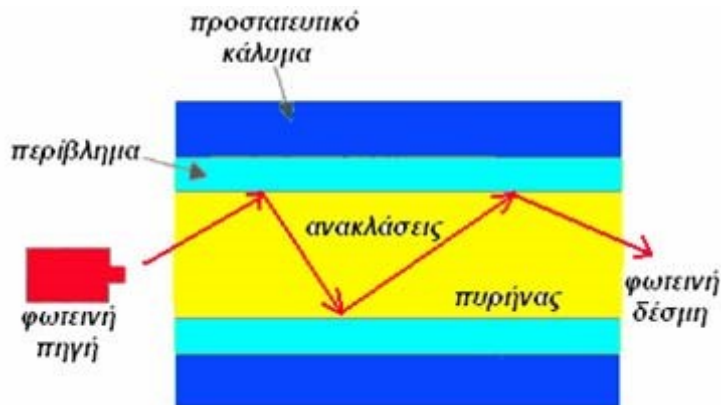
δυναμικό 90 Volts σε σχέση με την κάθοδο, η δύννοδος βρίσκεται σε δυναμικό 90 Volts σε σχέση με την δύννοδο κ.ο.κ. Με αυτόν τον τρόπο, τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο πολλαπλασιάζονται στην πρώτη δύννοδο. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την πρώτη δύννοδο πολλαπλασιάζονται από τη δεύτερη κ.ο.κ. Στο τέλος της διαδρομής των ηλεκτρονίων, για κάθε φωτόνιο που έφτασε στην κάθοδο του οργάνου παράγονται από 106 έως και 107 ηλεκτρόνια, τα οποία οδηγούνται στην άνοδο. Όπως είναι προφανές, το οπτικό σήμα έχει πια μετατραπεί σε ηλεκτρικό, που μπορεί να μετρηθεί και να ενισχυθεί περισσότερο, εάν υπάρχει ανάγκη.

Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι πολύ ευαίσθητοι στην υπεριώδη και την ορατή ακτινοβολία και έχουν πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης. Επειδή η έκθεση σε έντονο φως μπορεί να καταστρέψει το όργανο, είναι σκόπιμο να προφυλάσσονται με κατάλληλα καλύμματα.

6.1.2.3 Η οπτική ίνα

Η κατασκευή των οπτικών ινών βασίζεται στο φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Υπάρχουν πολλές γωνίες με τις οποίες το φως μπορεί να εισέλθει σε μία οπτική ίνα και να δημιουργήσει διαφορετικές γωνίες προσβολής της επικάλυψης, οι οποίες αναφέρονται ως ρυθμοί ή συχνότητες (*modes*) και αντιστοιχούν σε εγκάρσιους ρυθμούς ταλάντωσης. Οι ίνες που υποστηρίζουν πολλές συχνότητες διερχόμενου φωτός ονομάζονται πολύτροπες (*MMF*), ενώ εκείνες που μπορούν να μεταφέρουν μόνο μιας συχνότητας φως ονομάζονται *single – mode fibers (SMF)*.

Οι μονότροπες οπτικές ίνες έχουν συνήθως διάμετρο πυρήνα περίπου 8 – 10 μm , ενώ οι πολύτροπες 50 – 100 μm . Οι μονότροπες οπτικές ίνες, σε αντίθεση με τις πολύτροπες, δεν διαχέουν τη δέσμη φωτός αλλά απαιτούν συγκέντρωση φωτός μεγάλης έντασης σε πυρήνα μικρής διαμέτρου, γεγονός που απαιτεί τη χρήση *laser*. Δηλαδή, η διάμετρος του πυρήνα να είναι στο ίδιο επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου οπτικού σήματος. Η δομή των αγωγών φωτός που χρησιμοποιούνται ως οπτικές ίνες φαίνεται στην Εικόνα 100.



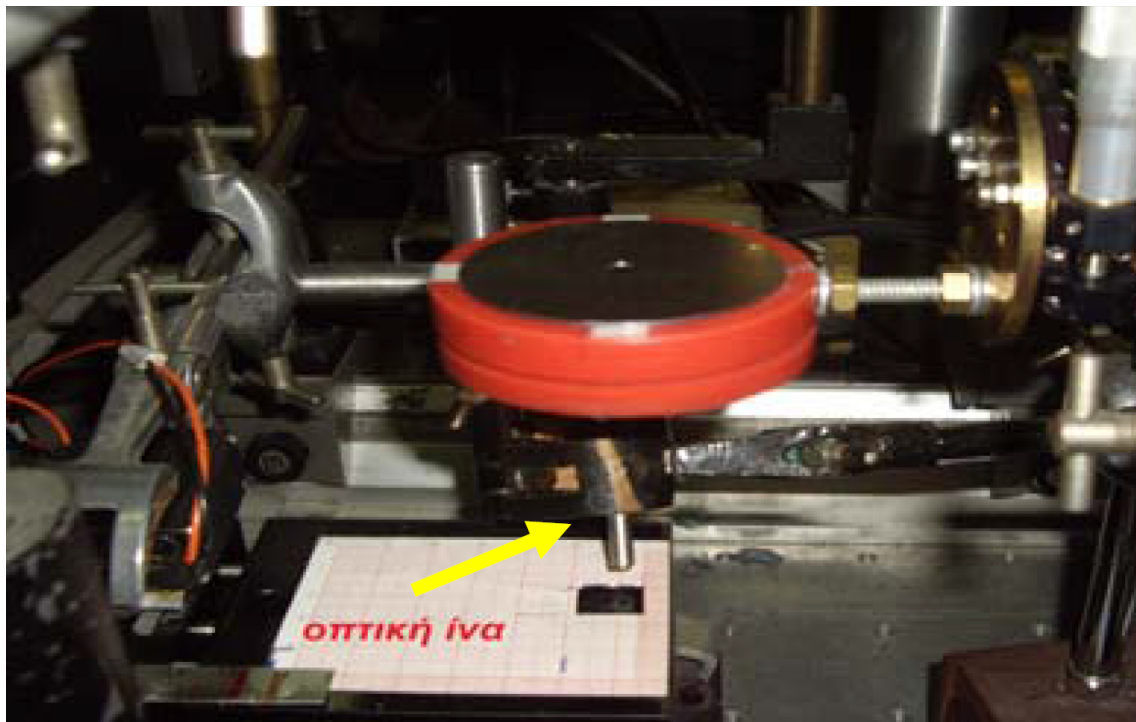
Σχήμα 100: Σχηματική αναπαράσταση της οπτικής ίνας

Ο εσωτερικός κυλινδρικός κεντρικός πυρήνας (*core*) κατασκευάζεται συνήθως από τηγμένο διοξείδιο του πυριτίου (σε καθαρή μορφή σχεδόν διαφανές γυαλί). Συγκεκριμένα, εάν το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι γυαλί, ο δείκτης διάθλασης του είναι περίπου 1.5. Ο περιορισμός μέσα στον πυρήνα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που διαδίδεται κατά τον άξονα (κυματοδότηση), επιτυγχάνεται κάνοντας το δείκτη διάθλασης του πυρήνα μόλις περί το 1% μεγαλύτερο από αυτόν του μανδύα, ώστε να επανέρχεται το φως προς τον πυρήνα και να αποτρέπεται η διαφυγή του προς τον

μανδύα.

Το περίβλημα ή μανδύας (*cladding*) περιβάλλει τον πυρήνα και αποτελείται από στρώμα γυαλιού πυριτίου ή πλαστικού υλικού με χαμηλό δείκτη διάθλασης. Το σύνολο προστατεύεται από πλαστικό στρώμα που αποτελείται από πολυαμίδια ή νήματα αρμιδίου και αυξάνει την αντοχή της ίνας.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε μονότροπη ίνα από χαλαζία (*quartz*), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 6.101. Η ίνα τοποθετείται κοντά στην βάση πάνω στην οποία τοποθετείται ο στόχος και κοιτάει απευθείας το πλάσμα με στόχο να συλλέξει τον εκπεμπόμενο φωθρισμό και να τον οδηγήσει στον μονοχρωμάτορα.



Σχήμα 101: Οπτική ίνα της πειραματικής διάταξης

6.1.3 Διαδικασία εγχάραξης των λεπτών υμενίων ZnO και $CuInGaSe_{(1-x)}Tex$

Η διαδικασία εγχάραξης του λεπτού υμενίου οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) το οποίο προμηθευτήκαμε από την εταιρεία *Heliosphera*, με χρήση *laser* (*laser scribing*) περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Αρχικά βάζουμε σε λειτουργία το *Nd : YAG laser* για να ζεσταθεί.
- Στη συνέχεια, ευθυγραμμίζουμε το μονοχρωμάτορα και ανοίγουμε την τάση της γεννήτριας τροφοδοσίας για τον φωτοπολλαπλασιαστή σε τάση $<700Volts$.
- Επιλέγουμε στο μονοχρωμάτορα το μήκος κύματος της δέσμης που θέλουμε να καταγράψουμε. Για το υμένιο του οξειδίου του ψευδαργύρου, ZnO , τον ρυθμίζουμε στα $636.23nm$, γιατί στην περιοχή αυτή εμφανίζεται δυνατή γραμμή ψευδαργύρου. Για τα υμένια του χαλκοπυρίτη, $CIGS$, τον ρυθμίζουμε στα $522nm$, γιατί στην περιοχή αυτή εμφανίζονται τρεις (3) δυνατές γραμμές χαλκού (Cu).
- Συγχρονίζουμε τον παλμογράφο με το *laser*, μέσω της φωτοδιόδου.

- Ρυθμίζουμε τη δέσμη του *laser* έτσι ώστε να πέφτει κάθετα πάνω στο στόχο και ελέγχουμε για τυχόν ανακλάσεις της δέσμης.
- Καταγράφουμε και ρυθμίζουμε την ενέργεια του *laser* με τη βοήθεια ενός ενεργόμετρου.
- Βελτιστοποιούμε τη θέση της οπτικής ίνας για να έχουμε καλύτερο σήμα στον παλμογράφο. (Για τη βελτιστοποίηση της θέσης της οπτικής ίνας χρησιμοποιούμε *bulk* στόχο *Cu*:
 - Τοποθετείται ο στόχος *Cu* πάνω στην κινούμενη βάση και η δέσμη του *laser* προσπίπτοντας στην επιφάνεια του *bulk Cu*, την αποδομεί παράγοντας πλάσμα. Ο φθορισμός συλλέγεται από την οπτική ίνα και απεικονίζεται στην σχισμή του μονοχρωμάτορα, μέσω δύο φακών εστίασης.
 - Στη συνέχεια, ευθυγραμμίζουμε το μονοχρωμάτορα και ανοίγουμε την τάση της γεννήτριας τροφοδοσίας για τον φωτοπολλαπλασιαστή σε τάση $<700\text{Volts}$.
 - Το οπτικό σήμα της εξερχόμενης από το μονοχρωμάτορα ακτινοβολίας, διέρχεται από τον φωτοπολλαπλασιαστή, όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, ενισχύεται και καταλήγει στον παλμογράφο).
- Κινώντας τον εστιακό φακό, μέσω του μικρομετρικού κοχλίου και παρατηρώντας το σήμα στον παλμογράφο, βρίσκουμε το σημείο εστίασης του φακού, το οποίο προκύπτει όταν μεγιστοποιείται η ένδειξη του παλμογράφου.
- Στην συνέχεια, τοποθετούμε το στόχο στον οποίο θέλουμε να πραγματοποιήσουμε εγχάραξη.
- Τέλος, ρυθμίζουμε την ταχύτητα κίνησης της βάσης και πραγματοποιούμε την εγχάραξη.

7 Αποτελέσματα

7.1 Πειραματικά δείγματα

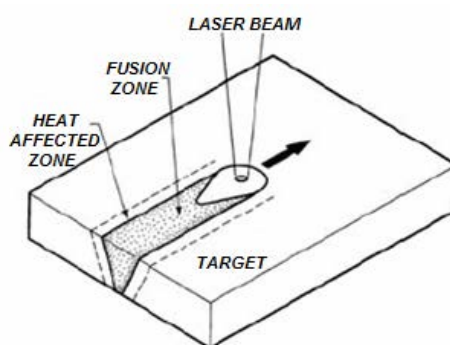
Τα πειραματικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν βιομηχανικά δείγματα λεπτών υμενίων οξειδίου του Ψευδαργύρου πάνω σε υπόστρωμα γυαλιού της ελληνικής εταιρείας παραγωγής φωτοβολταϊκών 2ης γενιάς *Heliosphera*, καθώς και λεπτά υμένια χαλκοπυρίτη $CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se_{(1-x)}Te_x$, που αναπτύχθηκαν με την μέθοδο *e-beam evaporation* για $x \in [0, 1]$ με βήμα 0,2.

7.2 Εγχάραξη δειγμάτων με χρήση *laser*

Σκοπός μας είναι το πλάτος του καναλιού να είναι $\sim 50\mu m$, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τις προδιαγραφές της βιομηχανίας. Επίσης, η επιφάνεια του παραγόμενου καναλιού θέλουμε να είναι καθαρή, χωρίς υπολείμματα υλικού, τα οποία θα δημιουργούσαν βραχυκύκλωμα κατά τη λειτουργία της φωτοβολταϊκής κυψέλης, ενώ τα «τοιχώματα» του καναλιού θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετα.

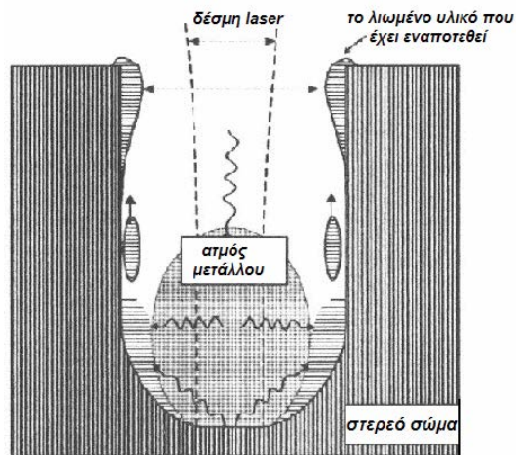
Επίσης, επιδιώκεται όσο το δυνατόν μείωση της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (*Heat Affected Zone H.A.Z.*) στα πλαϊνά του κάθε καναλιού (Εικόνα 102). Για να επιτευχθούν οι προαναφερόμενες προδιαγραφές, προσπαθήσαμε η διατομή της δέσμης του *laser* που χρησιμοποιήσαμε κατά την εγχάραξη, να είναι όσο το δυνατόν πιο ομογενής, κάτι το οποίο το επιτύχαμε με μια σειρά δύο κυκλικών διαφραγμάτων, τα οποία και περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 6^ο. Με την χρήση τους, προσπαθήσαμε να ομογενοποιήσουμε τη δέσμη του *laser* (ομοιόμορφη κατανομή της ενέργειας), αποκόπτοντας τα μέρη της δέσμης τα οποία είχαν χαμηλότερη ενέργεια σύμφωνα με το *Gaussian* προφίλ.

Τέλος, υπολογίσαμε την αλληλοεπικάλυψη των αποδομοούμενων περιοχών (*overlap*) να μην υπερβαίνει το 30%, ρυθμίζοντας την ταχύτητα κίνησης του δείγματος κατά την διάρκεια της εγχάραξης (*scribing*). Η μικρή αλληλοεπικάλυψη σε συνδυασμό με μικρές τιμές ενεργειών *laser*, βοηθά στην αντιμετώπιση του φαινομένου της *H.A.Z.*.



Σχήμα 102: Η θερμικά επηρεασμένη ζώνη (*Heat Affected Zone - H.A.Z.*)

Ένα άλλο στοιχείο που έχει παρατηρηθεί και θέλουμε να αποφύγουμε, είναι μία αποκόλληση – ανασήκωση του υμενίου στις άκρες της αποδομημένης περιοχής. Καθώς η δέσμη του *laser* προσπίπτει στο στερεό υλικό, δημιουργείται ατμός μετάλλου, ο οποίος ανεβαίνει προς τα πάνω, στερεοποιείται και επικάθεται στις άκρες. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί στην βιβλιογραφία και εξηγείται στην Εικόνα 103.



Σχήμα 103: Σχηματική αναπαράσταση της επικάλυψης των ατμών του μετάλλου στις άκρες της τομής

Τέλος, κατά την εγχάραξη (*scribing*) στόχος μας είναι να μην αποδομείται (“τρώμε”) το υλικό του υποστρώματος, στην περίπτωση μας του γυαλιού, αλλά σε μία ολοκληρωμένη ηλιακή κυψέλη που μετά το διαφανές παράθυρο του ZnO , ακολουθούν ο απορροφητής (*CIGS*) και το *Mo*, δεν επιθυμούμε να υπάρχουν υπολείμματα υλικού τα οποία θα δημιουργούν προβλήματα στην ροή του ρεύματος μεταξύ των ηλιακών κυψελών.

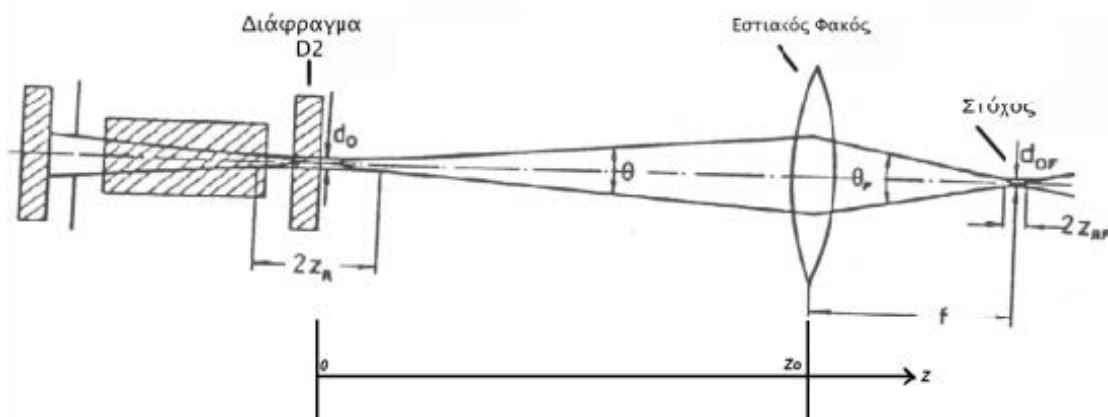
Κατά την διάρκεια των πειραμάτων μεταβάλαμε διάφορες παραμέτρους με στόχο να πετύχουμε το πιο στενό και “καθαρό” από υπολείμματα κανάλι (κανάλι πολύ μικρού πλάτους). Μία βασική παράμετρος είναι η ενέργεια του *laser*.

Εκτελέσαμε εγχαραζέες σε διαφορετικές ενέργειες, με στόχο να βρούμε τη βέλτιστη τιμή ώστε να έχουμε πλήρη αποδόμηση, χωρίς καψίματα και να μην εμφανίζεται σε μεγάλη έκταση η θερμικά επηρεασμένη ζώνη *H.A.Z.*. Εν συνεχεία, ρυθμίσαμε την ταχύτητα κίνησης της βάσης- τράπεζας, που φέρει το προς εγχάραξη δείγμα, ώστε να έχουμε επικάλυψη περί τα 30% και να μην εμφανίζονται υπολείμματα ZnO ή χαλκοπυρίτη στο κανάλι. Ακόμα, μεταβάλλαμε την διάμετρο των διαφραγμάτων *D1* και *D2*. Στόχος ήταν να μελετήσουμε την επιρροή της γεωμετρίας της δέσμης στη μορφολογία της αποδομημένης περιοχής, το πλάτος του καναλιού και την *H.A.Z.*.

Επίσης για σειρά εγχαραζέων μεταβάλλαμε τόσο την ενέργεια του *Laser*, όσο και την ταχύτητα προώσεως του *DC*-κινητήρα της βάσης. Ταυτόχρονα μεταβάλλαμε και την απόσταση του φακού εστίασης από τον στόχο, για να βρούμε τη βέλτιστη εστιακή απόσταση και να πετύχουμε μικρότερο κανάλι.

Στην πειραματική μας διάταξη μετά από το διάφραγμα *D1* και πριν από τον συγκεντρωτικό φακό εστίασης της δέσμης, για να οδηγηθεί στον προς αποδόμηση στόχο, παρεμβάλλουμε έναν Καθρέπτη ή Πρίσμα(*prisma*), κατά περίπτωση. Στόχος μας είναι με την παρεμβολή αυτών, η δέσμη του *laser* να οδηγείται κάθετα στο υμένιο και να μην έχουμε ανακλάσεις που θα αλλιώσουν την μορφολογία της αποδομημένης περιοχής.

Η πειραματική διάταξη με το διάφραγμα *D2*, τον εστιακό φακό και το στόχο φαίνεται στην Εικόνα 104 που ακολουθεί.



Σχήμα 104: Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης με το διάφραγμα $D2$ και τον εστιακό φακό

Η παραπάνω διάταξη, διέπεται από την σχέση:

$$d_{oF} = \frac{d_o f}{z_o} \quad (100)$$

όπου,

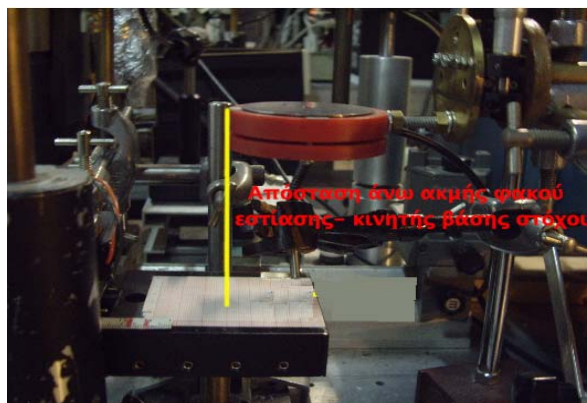
- d_{oF} : η διάμετρος της αποδομούμενης περιοχής
- d_o : η διάμετρος του διαφράγματος $D2$
- f : η εστιακή απόσταση του συγκεντρωτικού φακού
- z_o : η απόσταση από το διάφραγμα $D2$ μέχρι το φακό εστίασης.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι όσο πιο πολύ αυξάνουμε την απόσταση μεταξύ του διαφράγματος και εστιακού φακού, σε συνδυασμό με την μείωση της διαμέτρου του διαφράγματος, τόσο πιο μικρή θα γίνει η διάμετρος της αποδομούμενης περιοχής. Καθ' αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερη ομοιομορφία της δέσμης του *laser* που φτάνει τελικά στο στόχο, καθώς κρατάμε το μέρος της δέσμης με την μεγαλύτερη ενέργεια και αποκόπτουμε τις περιοχές με τις μικρότερες ενέργειες.

Στα πειράματα, κρατήσαμε σταθερή την απόσταση διαφράγματος ($D2$) – φακού εστίασης και μεταβάλλαμε την διάμετρο του διαφράγματος $D2$. Διαπιστώσαμε ότι όσο μειώναμε τη διάμετρο του $D2$, τόσο πιο πολύ μειωνόταν και η διάμετρος της αποδομούμενης περιοχής, όπως και το πλάτος του καναλιού μειώνεται .

Μεταβάλλαμε όμως την απόσταση μεταξύ φακού εστίασης – στόχου ($96mm$ και $88mm$). Όπως παρατηρήθηκε, όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η απόσταση, τόσο αυξάνεται η διάμετρος και η ανομοιομορφία της αποδομούμενης περιοχής.

Την απόσταση του φακού εστίασης από τον στόχο την μετρήσαμε από την άνω ακμή του φακού έως την κινητή βάση πάνω στην οποία τοποθετούμε τον στόχο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 105 που ακολουθεί.



Σχήμα 105: Απόσταση άνω ακμής φακού εστίασης – βάσης τοποθέτησης στόχου της πειραματικής διάταξης

Τα κανάλια που δημιουργήθηκαν από τις εγχάραξεις μελετήθηκαν αρχικά με οπτικό μικροσκόπιο για να ελεγχθούν ποιοτικά τα δημιουργηθέντα κανάλια ως προς την ομοιομορφία, τα καψίματα, τις αλληλοκαλύψεις (*overlap*) κ.λ.π., καθώς και για να μετρηθεί το πλάτος των καναλιών τους. Εν συνεχεία, στο ατομικό μικροσκόπιο δυνάμεων *AFM* μελετήσαμε την μορφολογία τους, εξάγοντας λεπτομερή εικόνα για την μορφολογία του καναλιού και για την πλήρη ή μερική αποδόμησή του. Το *AFM* μπορεί να σαρώνει περιοχή μέχρι και $50\mu m$. Για το λόγο αυτό, στις εικόνες που ακολουθούν δεν φαίνεται όλη η αποδομημένη περιοχή, αλλά μόνο ένα μέρος της, αφού μας ενδιέφερε κυρίως η δομή των «τοιχωμάτων» του καναλιού, το εσωτερικό του καναλιού και πως επηρεάζεται κάθε φορά η θερμικά επηρεασμένη ζώνη *H.A.Z.*.

7.2.1 Εγχάραξη δειγμάτων *ZnO* με χρήση *laser*

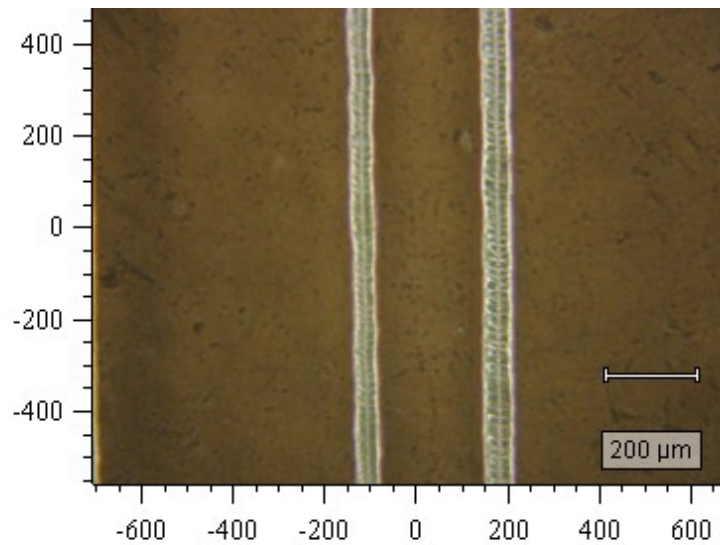
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο στόχος της εγχάραξης των υμενίων ήταν η δημιουργία καναλιών $50\mu m$, με πολύ καλή ποιότητα επιφάνειας του καναλιού και όσο το δυνατόν μικρότερη *HAZ*. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την εγχάραξη υμενίων είναι:

- Η πυκνότητα του *laser* [mJ/p]
- Τα διαφράγματα της διάταξης *D1* και *D2* [mm]
- Η ταχύτητα πρόωσης της βάσης [$Volts$]
- Η εστιακή απόσταση φακού – υμενίου [mm]
- Κατεύθυνση δέσμης *laser* προς τον στόχο [Καθρέφτης ή Πρίσμα]

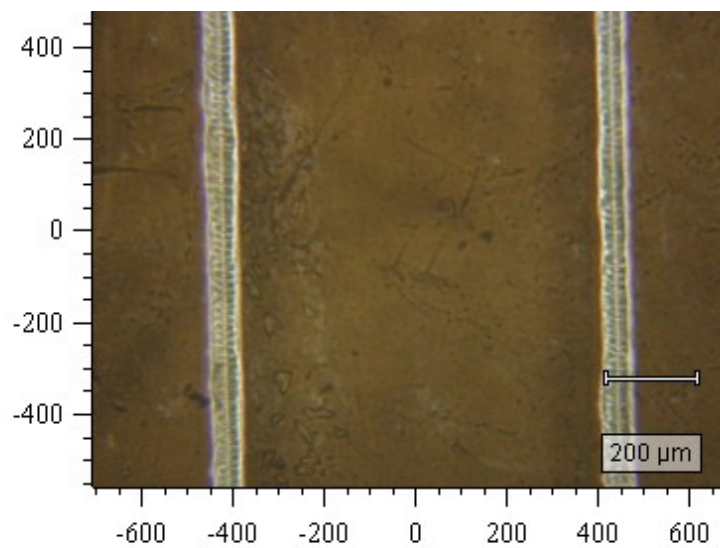
Για την εγχάραξη των βιομηχανικών δειγμάτων *ZnO* λήφθηκαν 4 διαφορετικές περιπτώσεις για τους παραπάνω παράγοντες, λαμβάνοντας σταθερό μόνο το άνοιγμα του διαφράγματος *D1* στα $6mm$. Μετά τις εγχάραξεις χρησιμοποιήθηκε το ατομικό μικροσκόπιο δυνάμεων (*AFM*) για τον προσδιορισμό της μορφολογίας των παραγόμενων καναλιών.

Κατά την 1η περίπτωση, κρατήθηκαν σταθεροί όλοι οι παράγοντες εκτός της ενέργειας του *laser*. Για τα διαφράγματα της πειραματικής διάταξης οι τιμές ήταν $D1 = 6mm$ και $D2 = 2mm$, ενώ

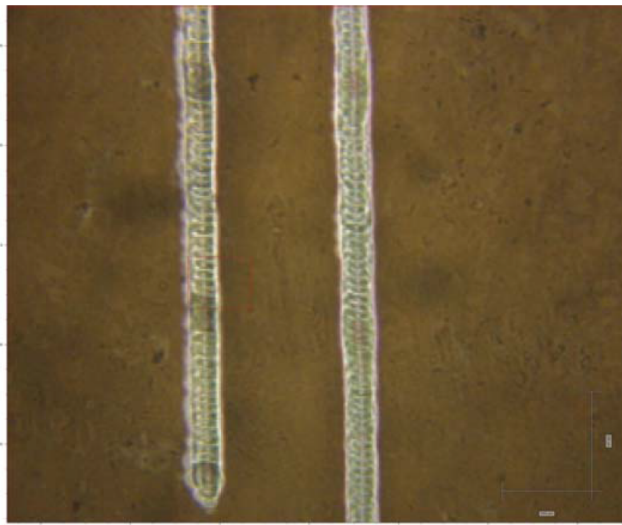
η ταχύτητα της κινητής τράπεζας ήταν 2Volts . Ακόμα, η εστιακή απόσταση φακού και υμενίου ήταν στα 88mm και για την κατεύθυνση του *laser* χρησιμοποιήθηκε καθρέφτης. Τέλος, για την μεταβλητή ενέργεια του *laser* επιλέχθηκαν 6 τιμές με εύρος από 0.7mJ/p έως 2.0mJ/p .



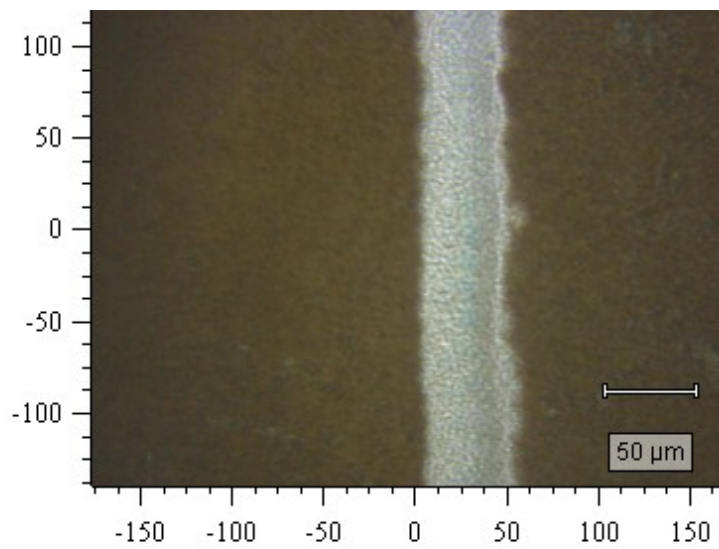
Σχήμα 106: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* 0.7mJ/p (αριστερά) και 1.0mJ/p (δεξιά)



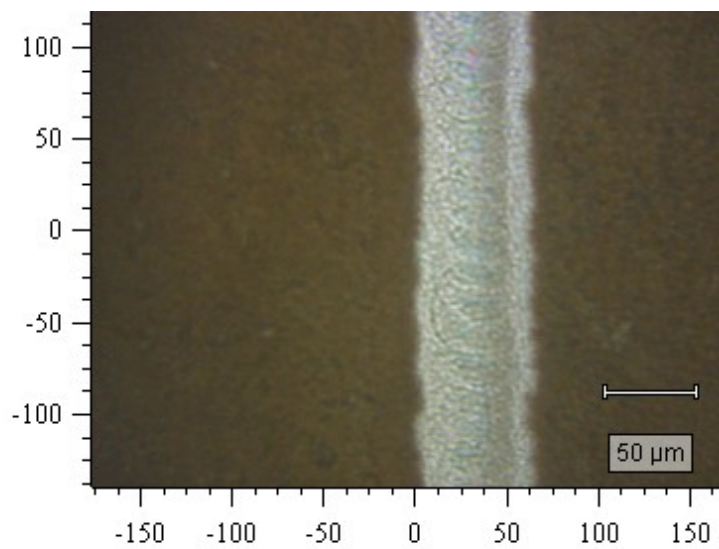
Σχήμα 107: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.5mJ/p (αριστερά) και 1.25mJ/p (δεξιά)



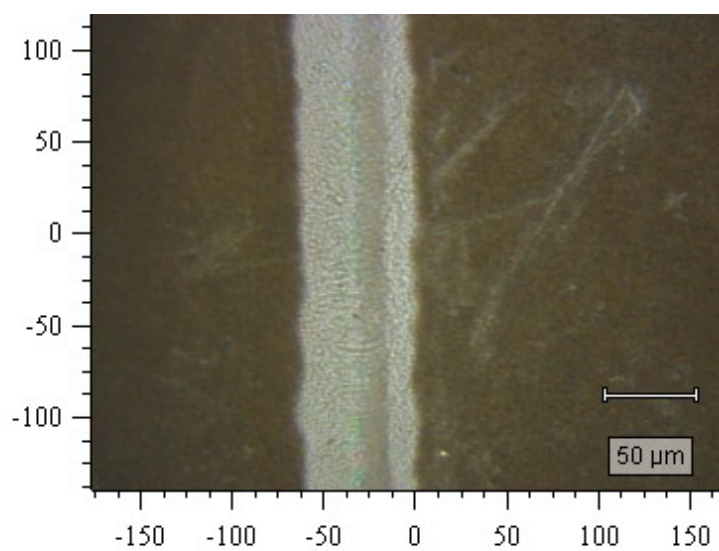
Σχήμα 108: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $2.0mJ/p$ (αριστερά) και $1.75mJ/p$ (δεξιά)



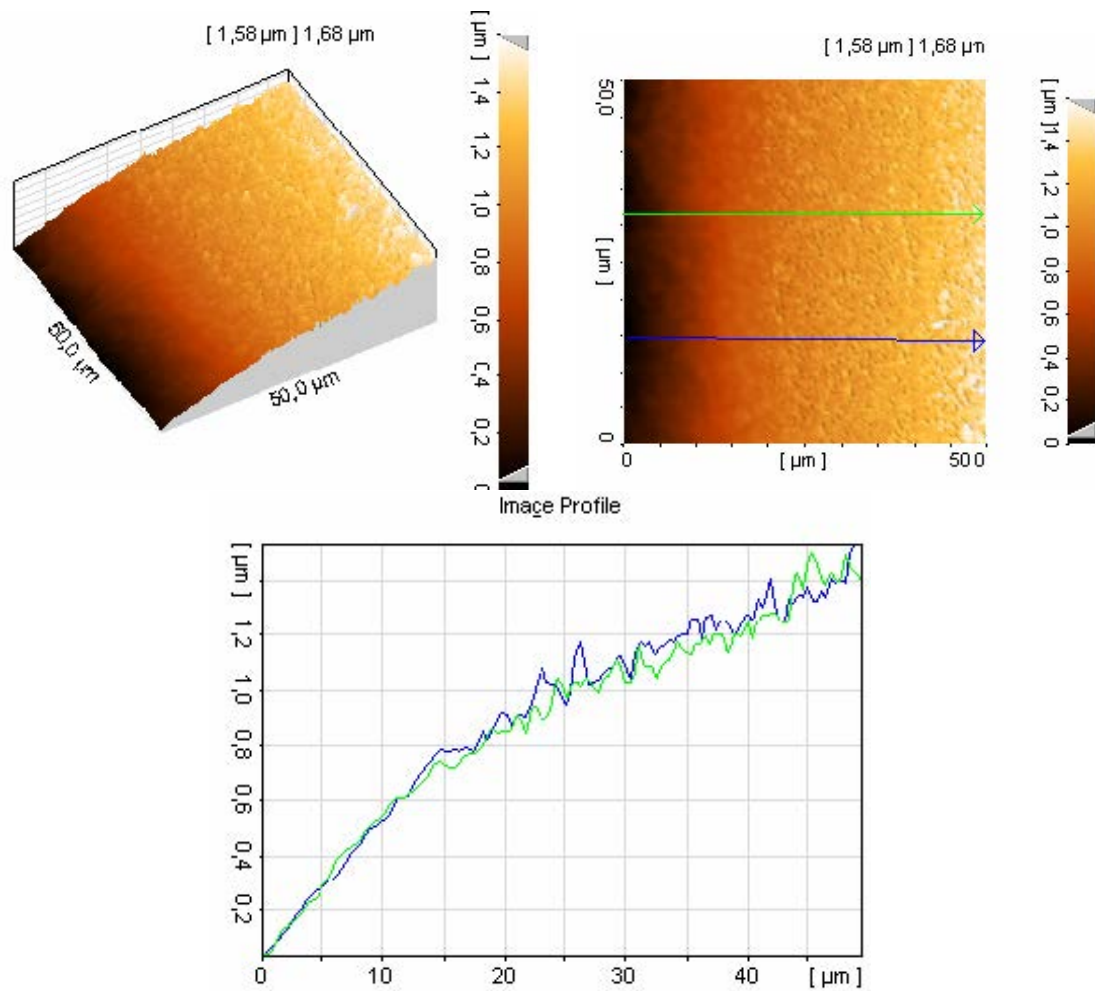
Σχήμα 109: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $0.7mJ/p$



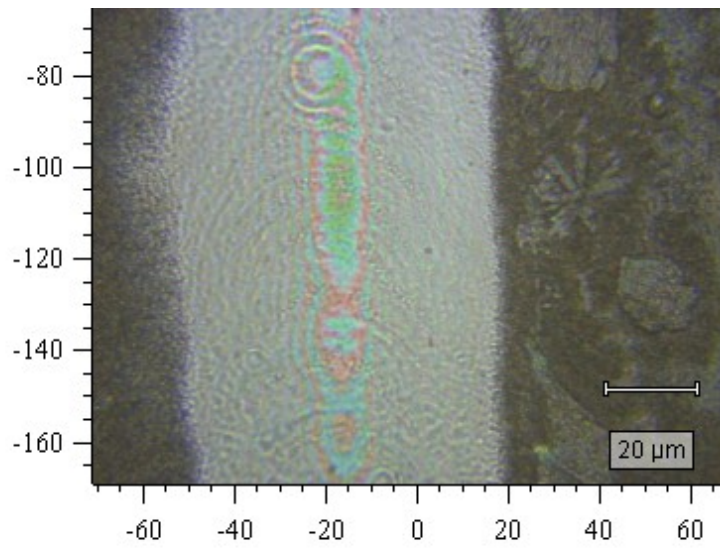
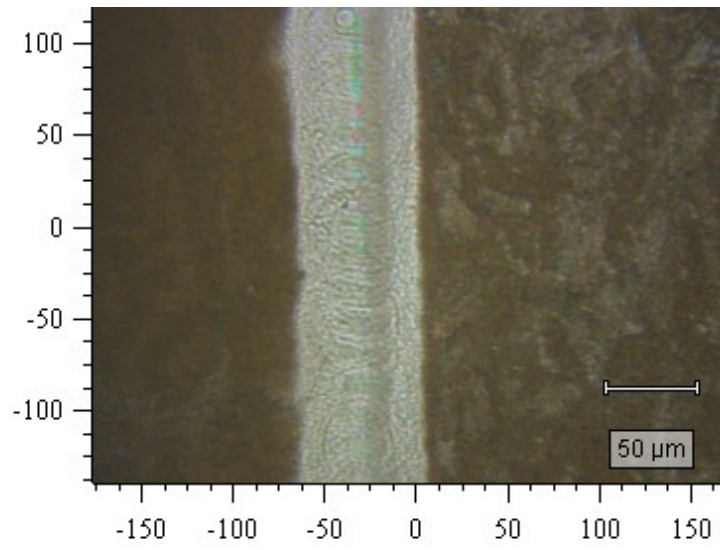
Σχήμα 110: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 1.0mJ/p



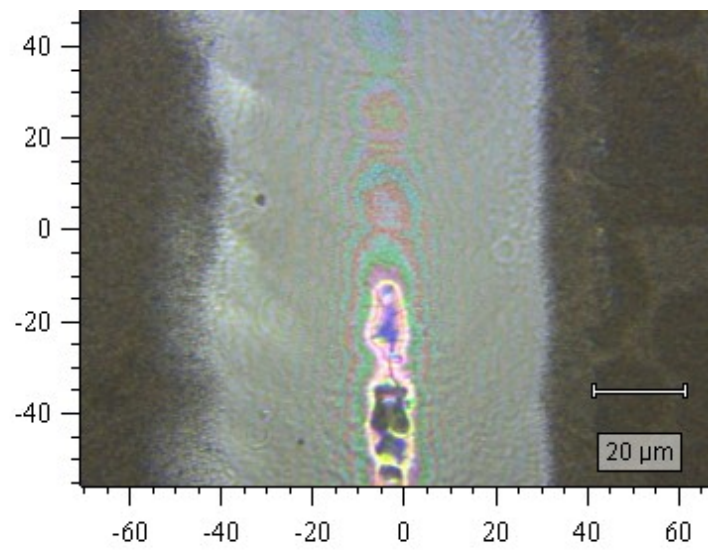
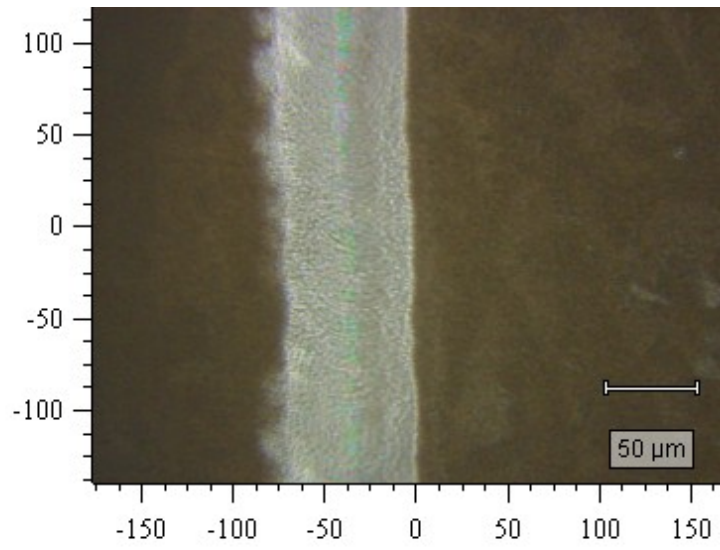
Σχήμα 111: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 1.25mJ/p



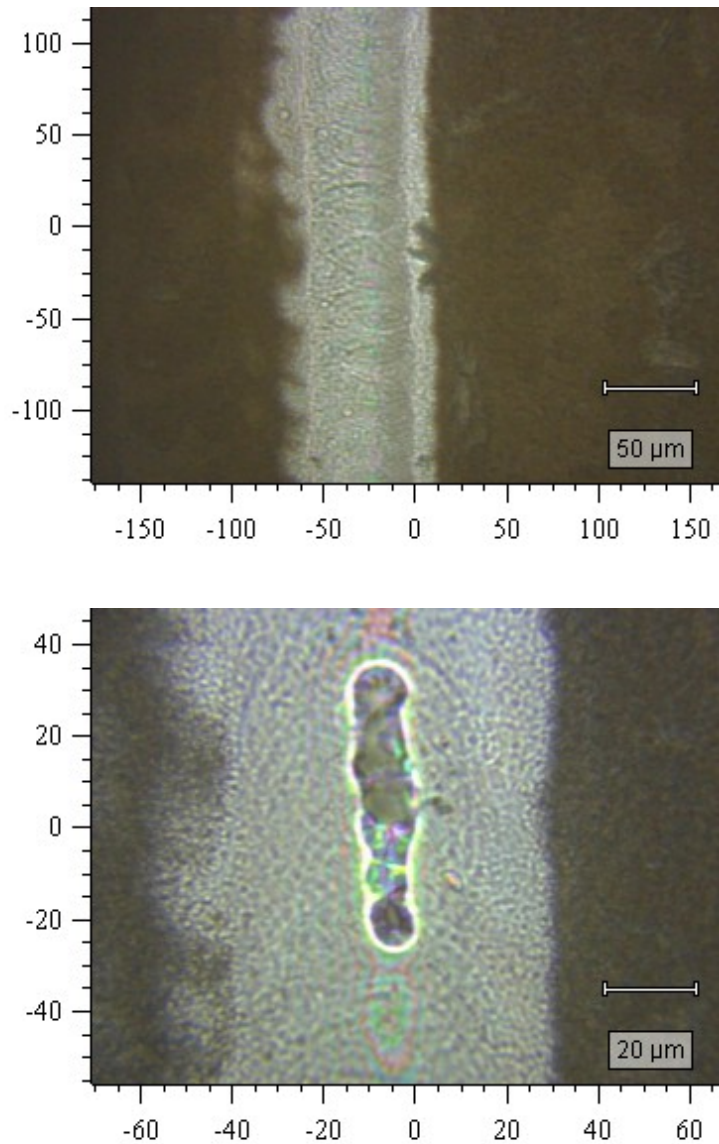
Σχήμα 112: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO*, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας 1.25mJ/p , ταχύτητα 2Volts , $D2 = 2\text{mm}$ και εστιακή απόσταση $d = 88\text{mm}$



Σχήμα 113: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser $1.50mJ/p$



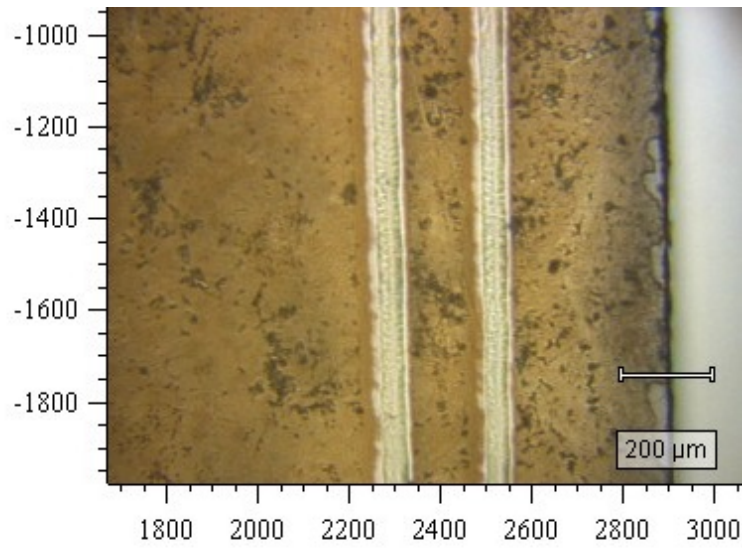
Σχήμα 114: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser $1.75mJ/p$



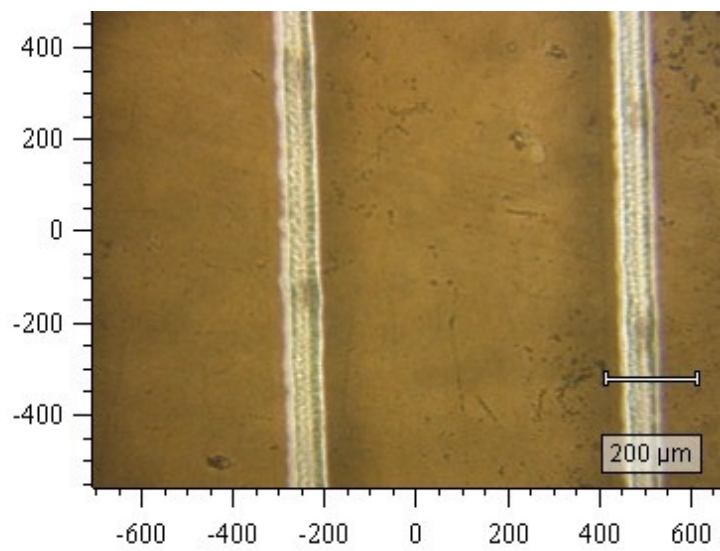
Σχήμα 115: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $2.0mJ/p$

Από τις Εικόνες 106 έως 115 παρατηρούμε ότι για καμιά από τις ενέργειες που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης δεν έχουμε πλήρη αποδόμηση του στόχου. Η βελτίωση της αποδόμησης των καναλιών είναι αναλογική με την αύξηση της ενέργειας της δέσμης. Επίσης, το κανάλι με πλάτος κοντά στον στόχο εμφανίζεται αυτό με την μικρότερη ενέργεια της δέσμης ($0.7mJ/p$). Το κανάλι που παρουσίασε την καλύτερη δομή (σχετικά μικρό πλάτος και σχετική ομοιομορφία στα τοιχώματα) είναι το κανάλι της Εικόνας 111 που δέχτηκε $1.25mJ/p$.

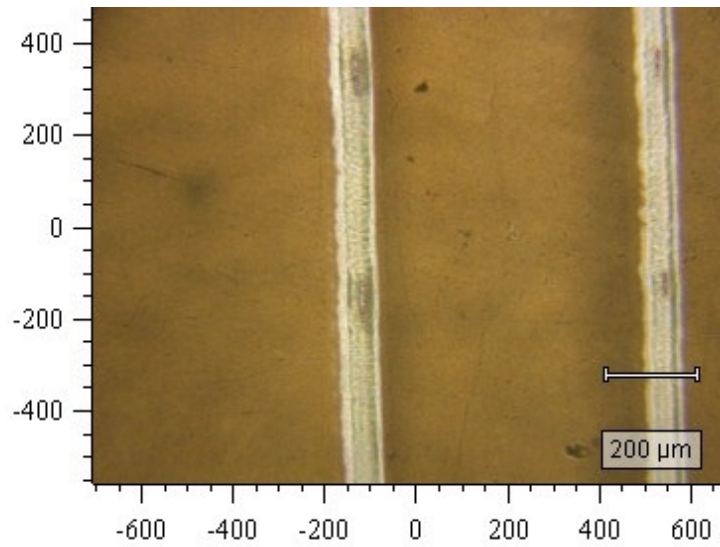
Κατά την 2η περίπτωση, η μεταβλητή παράμετρος παρέμεινε η ενέργεια του *laser*. Επίσης, αυξήθηκε το άνοιγμα του 2ου διαφράγματος στα $3mm$, ενώ το διάφραγμα $D1$ δεν μεταβλήθηκε ($D1 = 6mm$). Η ταχύτητα της βάσης ($2Volts$), η εστιακή απόσταση ($88mm$) έμειναν σταθερά, καθώς και η χρήση καθρέφτη σε αυτή την περίπτωση. Οι τιμές του *laser* που επιλέχθηκαν είχαν εύρος από $1mJ/p$ έως $2mJ/p$ με βήμα $0.25mJ/p$.



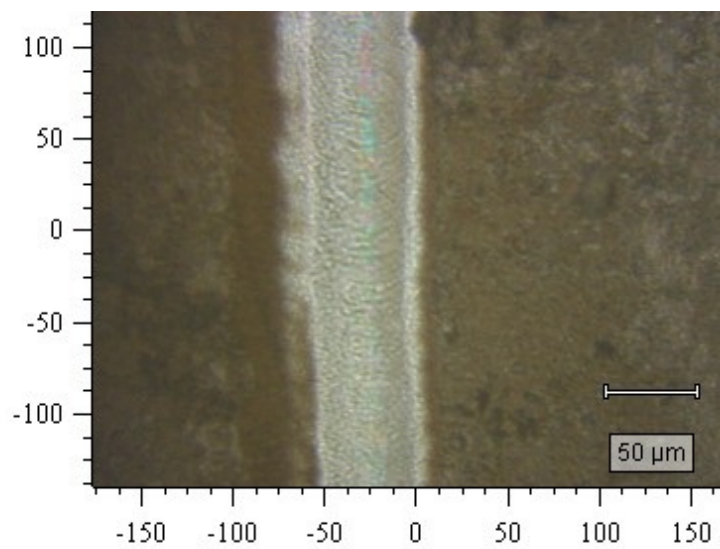
Σχήμα 116: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.25mJ/ρκα$ και $1.0mJ/ρ$



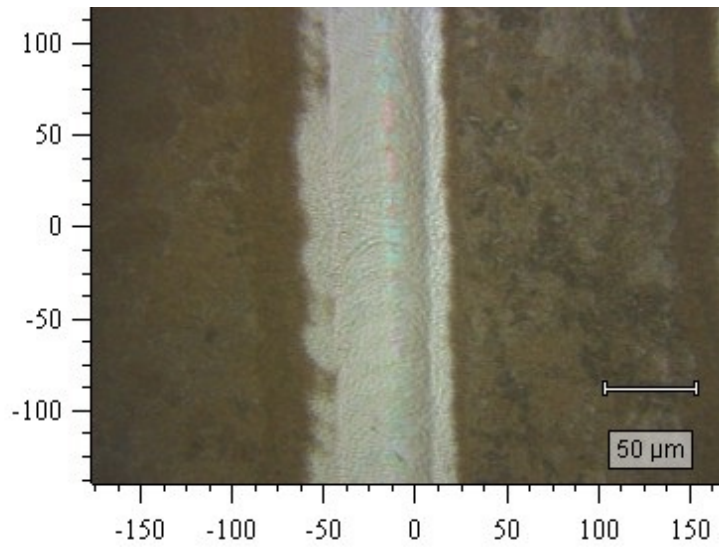
Σχήμα 117: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.75mJ/ρκα$ και $1.5mJ/ρ$



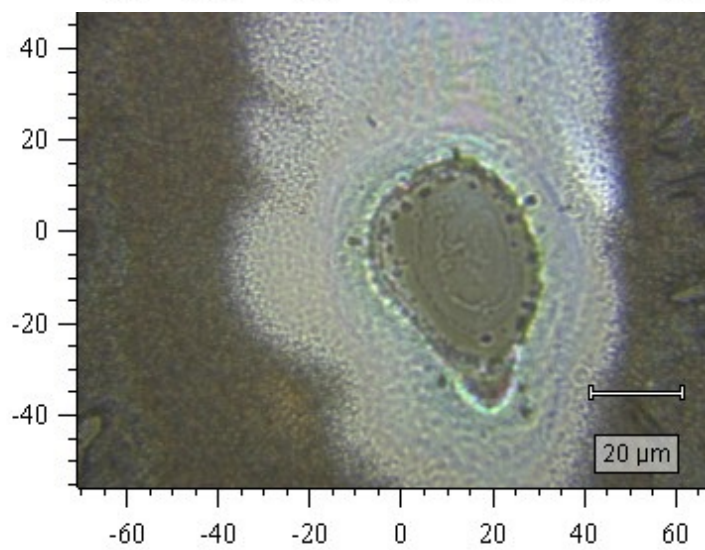
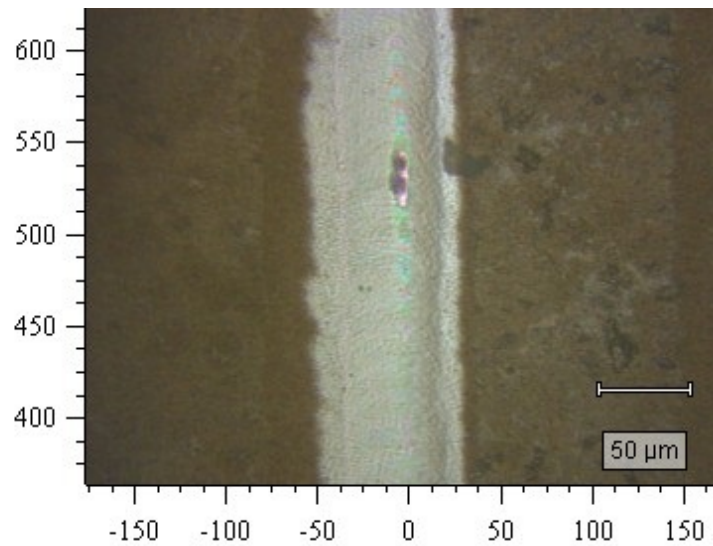
Σχήμα 118: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 2.0mJ/ρ και 1.75mJ/ρ



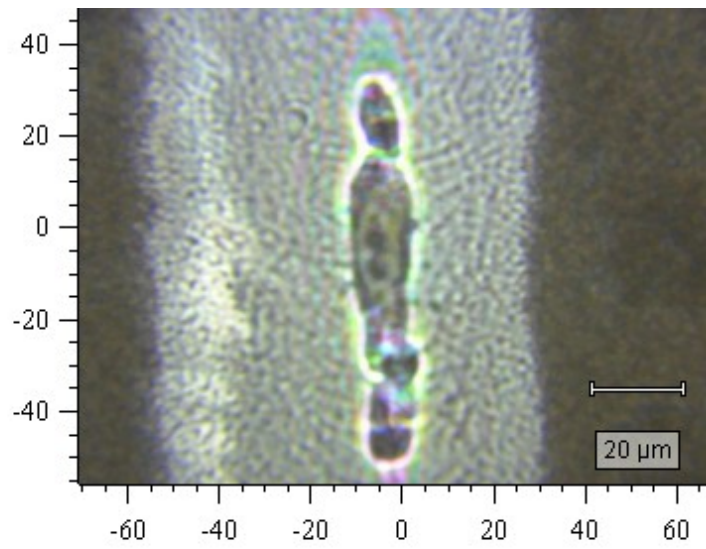
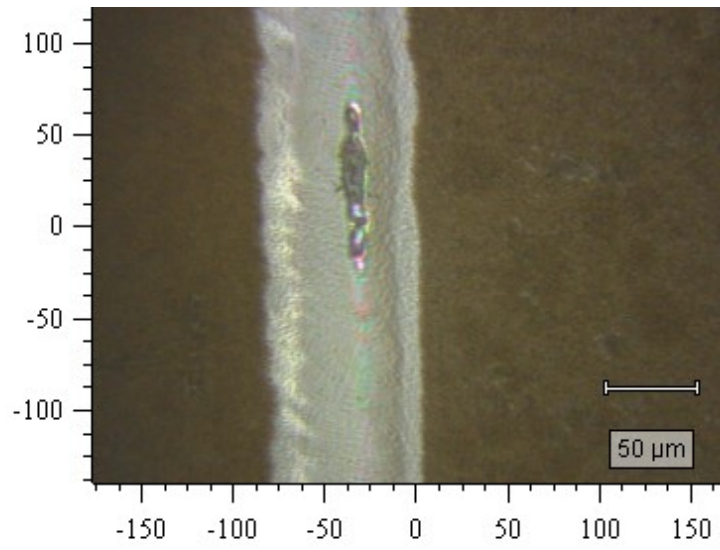
Σχήμα 119: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 1.0mJ/ρ



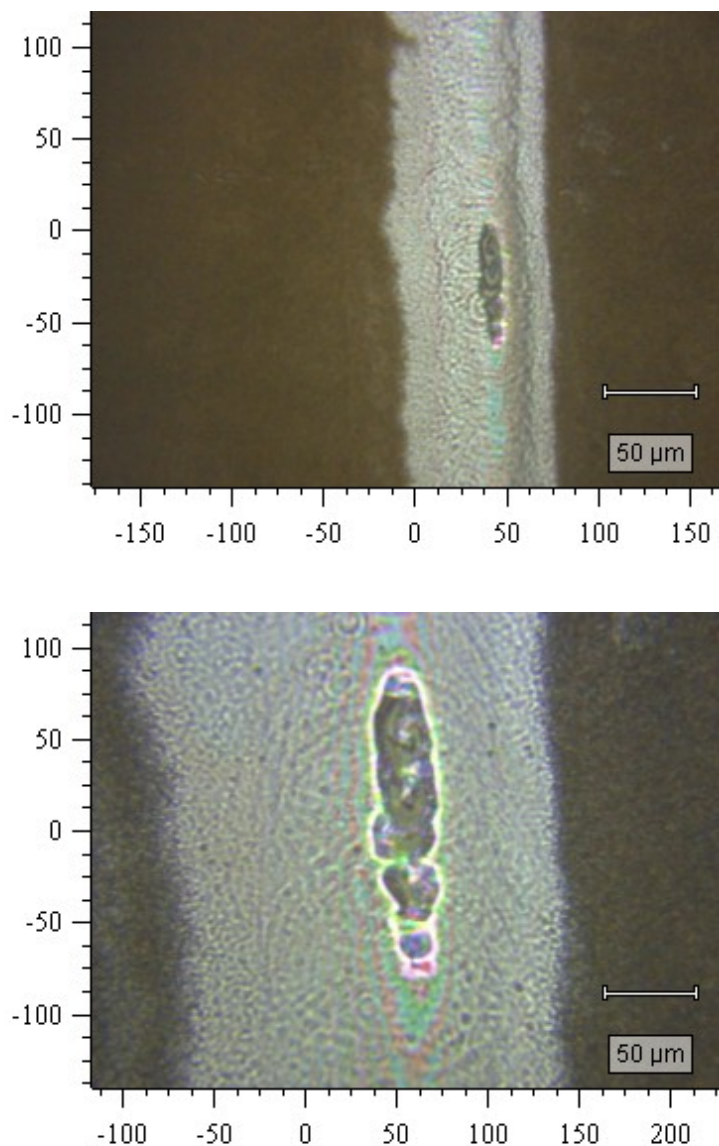
Σχήμα 120: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 1.25mJ/p



Σχήμα 121: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 1.25mJ/p



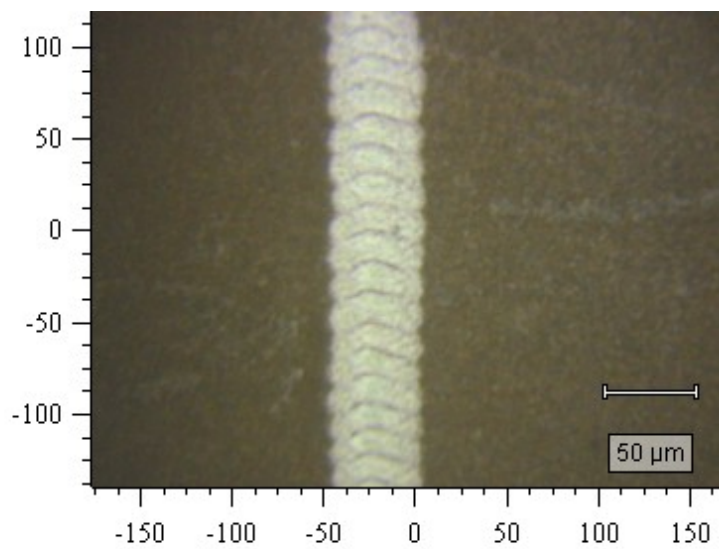
Σχήμα 122: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser $1.5mJ/p$



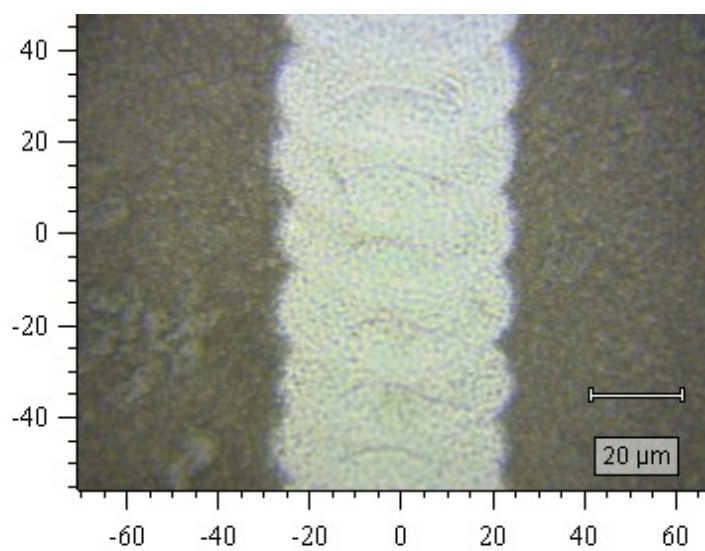
Σχήμα 123: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.75mJ/p$

Όπως παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη σειρά εγχαραξέων, όμοια και σε αυτή τη σειρά εγχαραξέων δεν είναι δυνατή η πλήρη αποδόμηση των καναλιών, παρά το γεγονός ότι στις υψηλότερες ενέργειες εμφανίζεται μεγαλύτερη αποδόμηση. Ακόμα, στα τοιχώματα των καναλιών παρατηρείται λόγω της ανομοιομορφίας της δέσμης *laser* συσσωρευμένη ενέργεια, καθώς και αλληλοεπικαλύψεις. Τέλος, το πλάτος των καναλιών αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ενέργεια του *laser*.

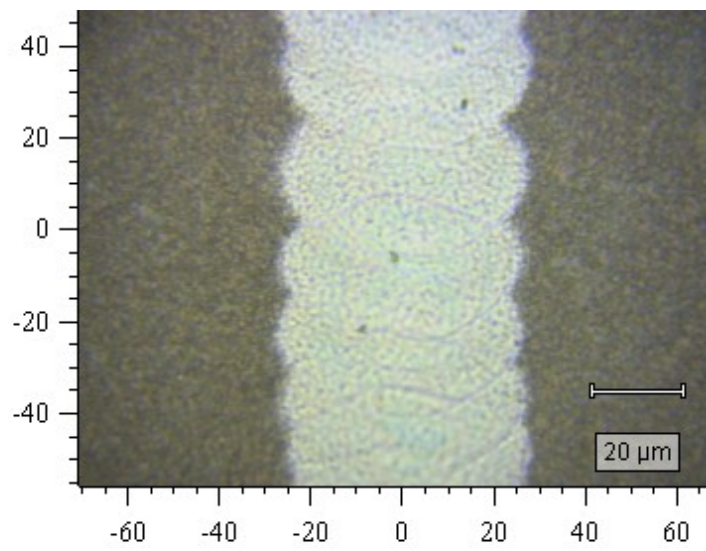
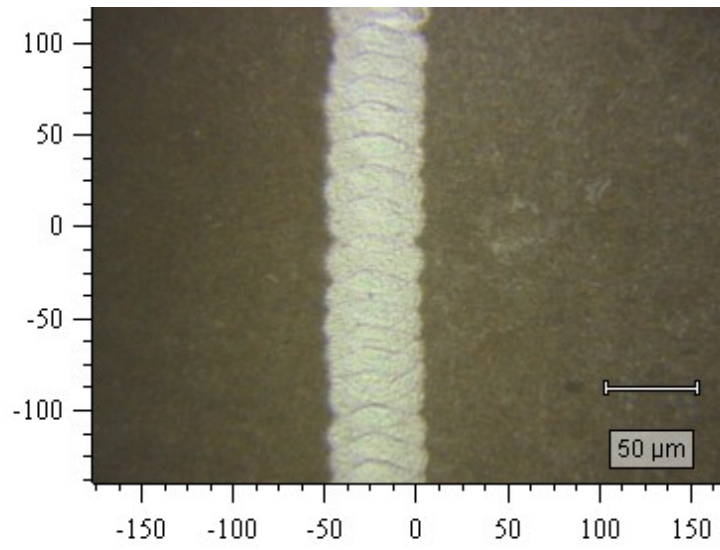
Κατά την 3η περίπτωση, η ενέργεια του *laser* ήταν εκ νέου μεταβλητή. Η εστιακή απόσταση αυξήθηκε στα $96mm$ και για την κατεύθυνση του *laser* επιλέχθηκε πρίσμα. Το άνοιγμα του διαφράγματος $D2$ μειώθηκε στα $2mm$ και το διάφραγμα $D1$ παρέμεινε σταθερό στα $6mm$, ενώ η ταχύτητα της βάσης έμεινε στα $2Volts$. Για την συγκεκριμένη περίπτωση έγιναν 3 εγχαραξίς με τιμές $1mJ/p$, $1.5mJ/p$ και $2mJ/p$ αντίστοιχα.



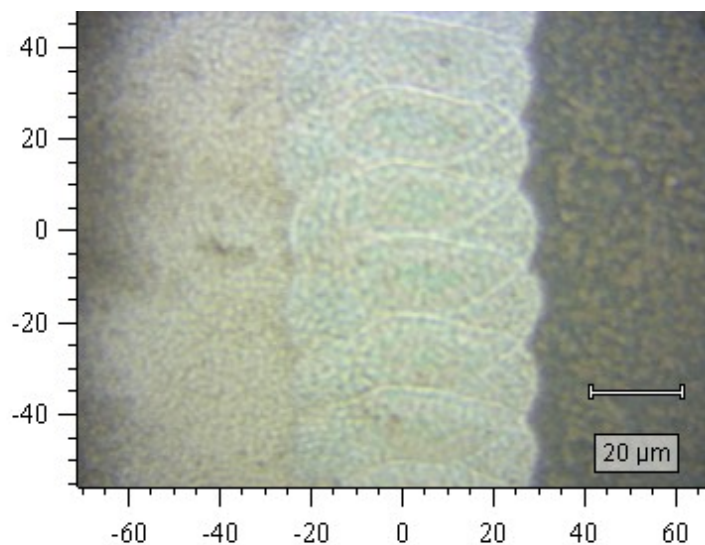
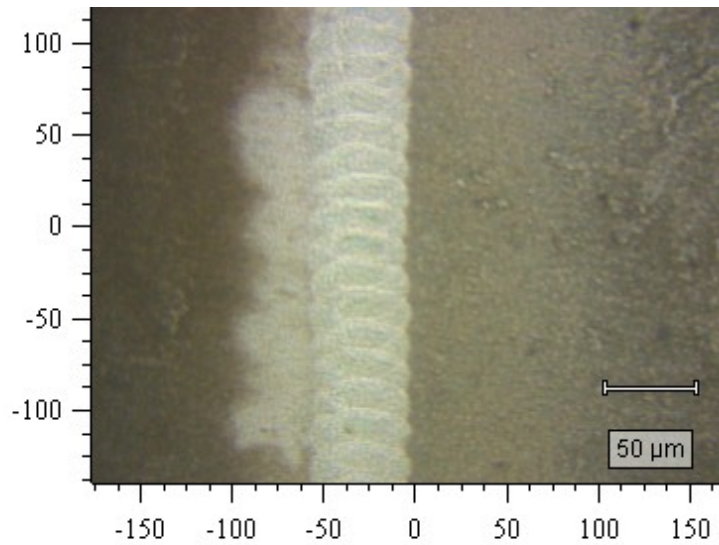
Σχήμα 124: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$



Σχήμα 125: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$



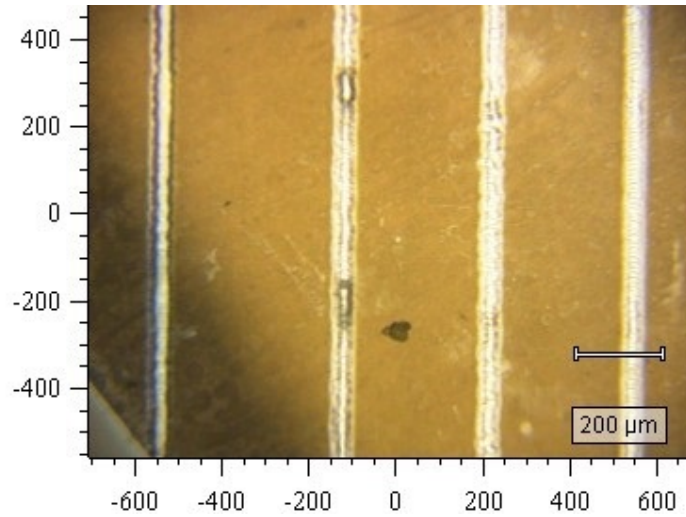
Σχήμα 126: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 1.5mJ/p



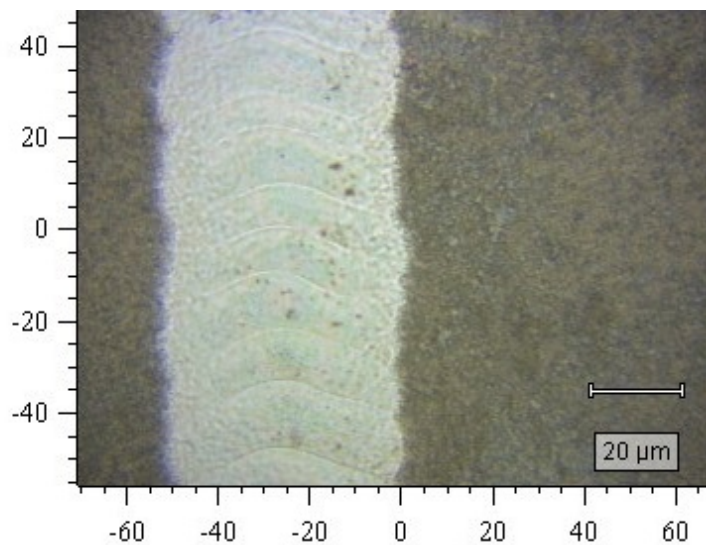
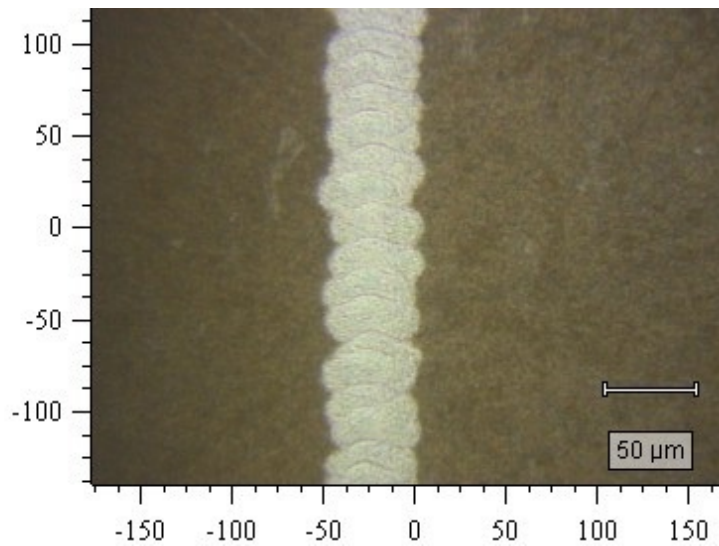
Σχήμα 127: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου laser 2.0mJ/p

Όπως παρατηρήθηκε και στην προηγούμενη σειρά εγχαραξιών δεν είναι δυνατή η πλήρη αποδόμηση των καναλιών, παρά το γεγονός ότι στις υψηλότερες ενέργειες εμφανίζεται μεγαλύτερη αποδόμηση. Ακόμα, στα τοιχώματα των καναλιών παρατηρείται λόγω της ανομοιομορφίας της δέσμης laser συσσωρευμένη ενέργεια, καθώς και αλληλοεπικαλύψεις. Τέλος, το πλάτος των καναλιών αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ενέργεια του laser.

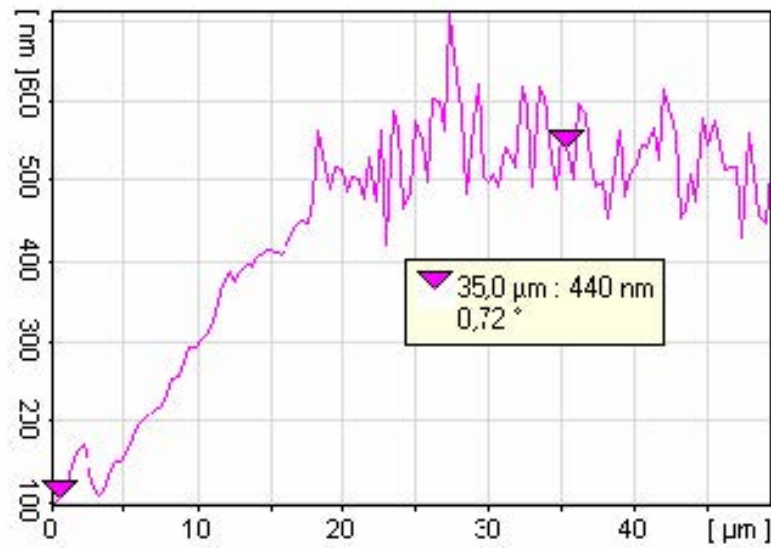
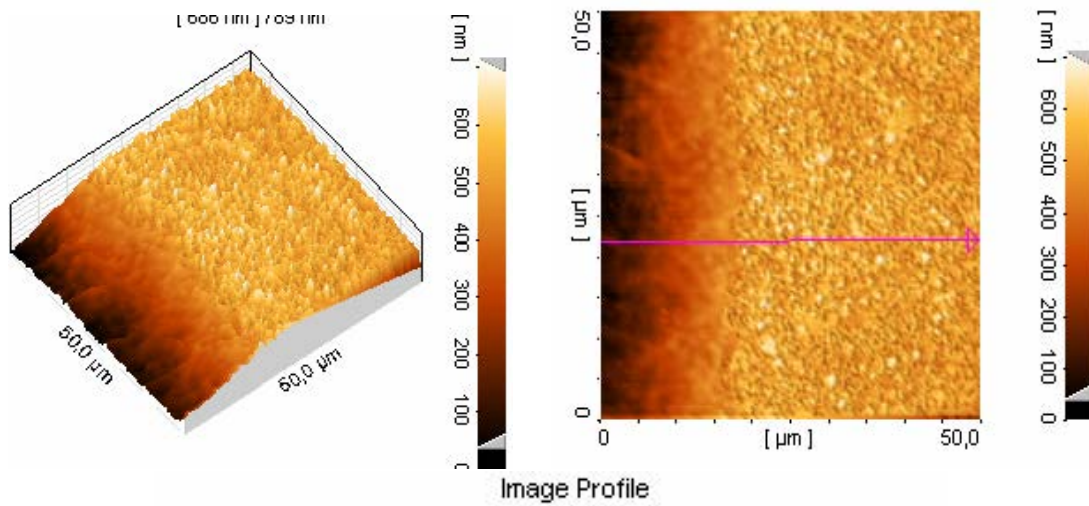
Τέλος, για την 4η περίπτωση, ως μεταβλητό μέγεθος επιλέχθηκε η ταχύτητα κίνησης των κινητήρων της βάσης. Για τα διαφράγματα χρησιμοποιήθηκαν οι προηγούμενες τιμές ($D1 = 6mm$ και $D2 = 2mm$), καθώς και για την εστιακή απόσταση φακού – υμενίου (96mm), ενώ για την κατεύθυνση του laser επιλέχθηκε το πρίσμα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 5 εγχαραξίες και οι τιμές της ταχύτητας πρόωσης που επιλέχθηκαν ήταν από 0.5Volt έως 2.0Volts.



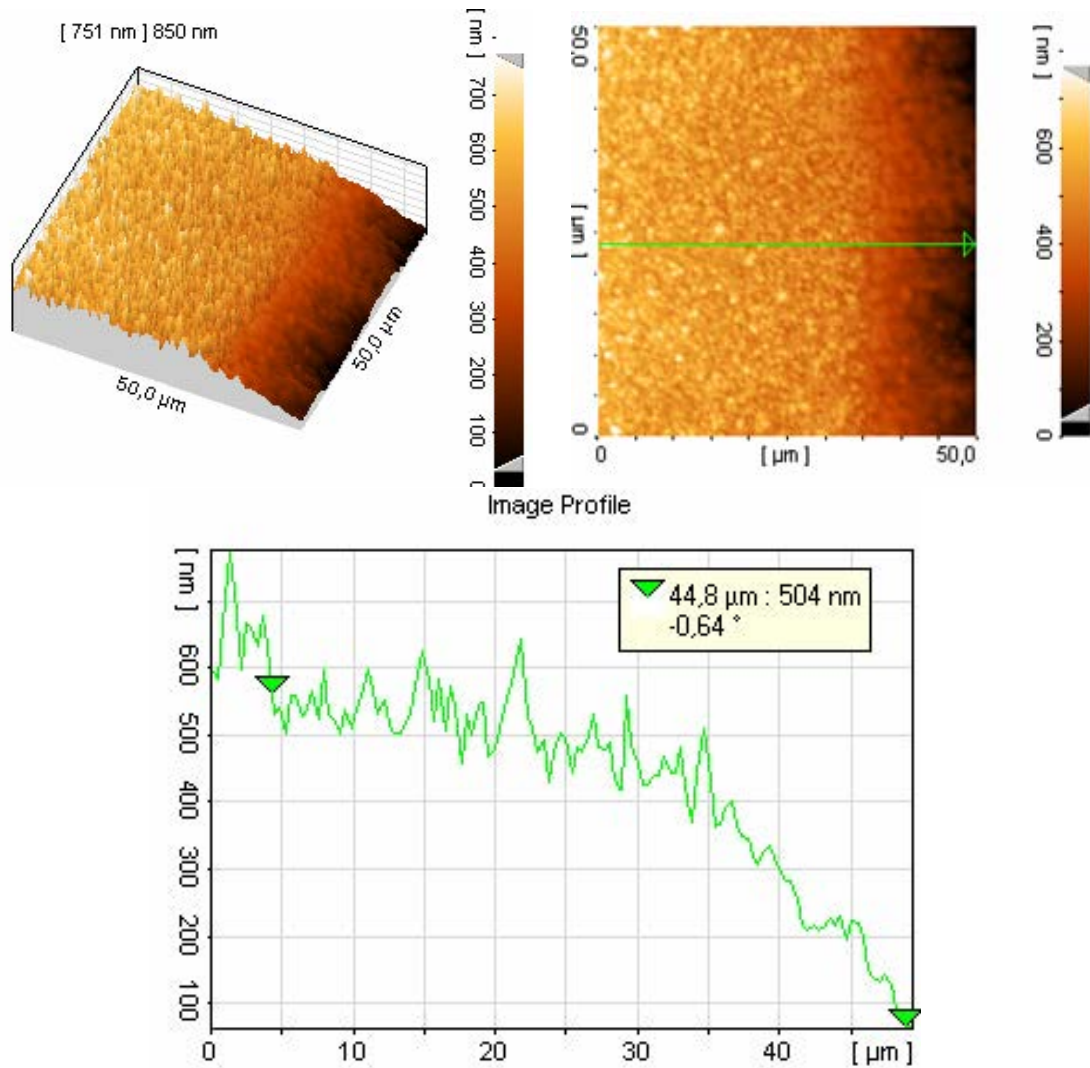
Σχήμα 128: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.0mJ/p και ταχύτητες από 0.5Volt έως 1.5Volts (από αριστερά προς τα δεξιά)



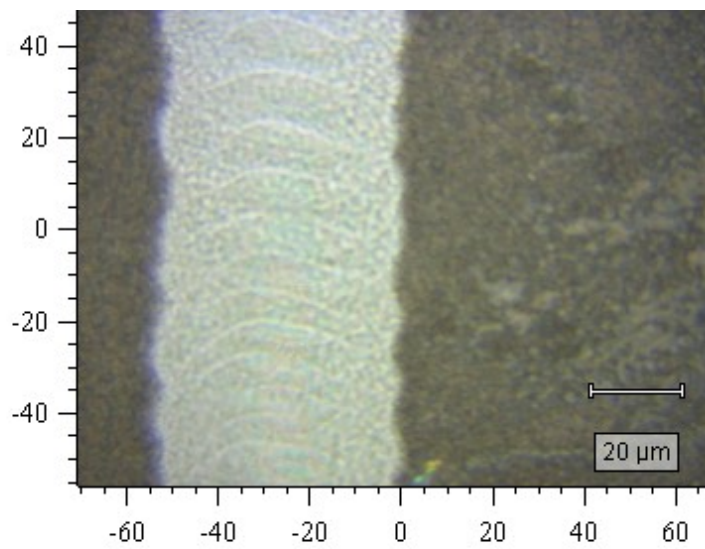
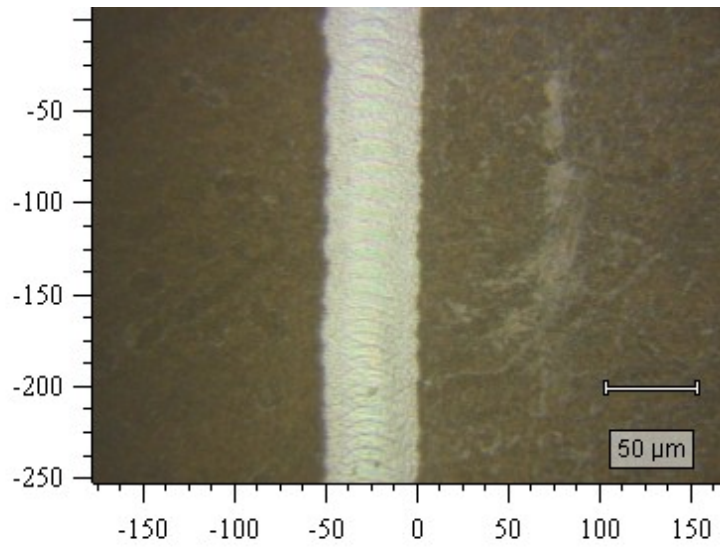
Σχήμα 129: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO, με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts



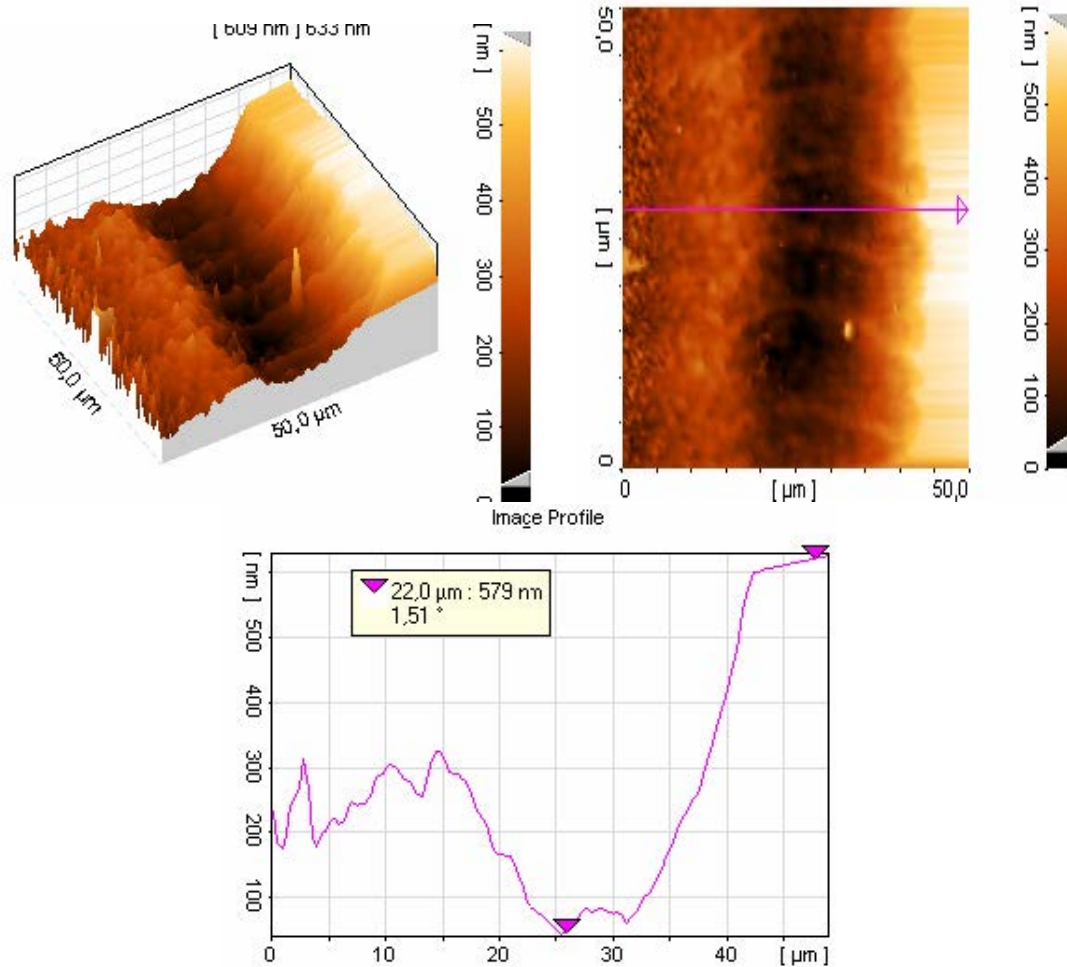
Σχήμα 130: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO* που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $2Volts$ και $D2 = 2mm$, $d = 96mm$



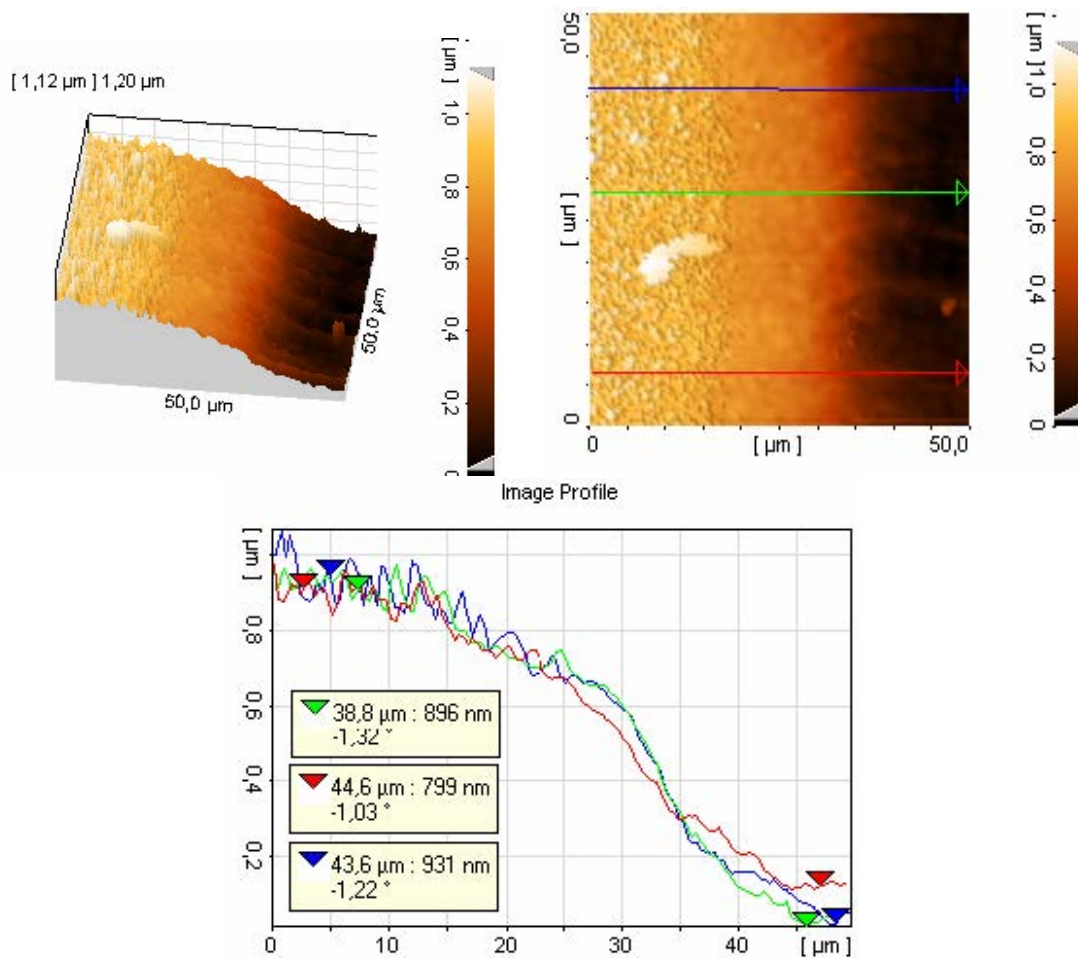
Σχήμα 131: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO* που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $2Volts$, $D2 = 2mm$, $d = 96mm$



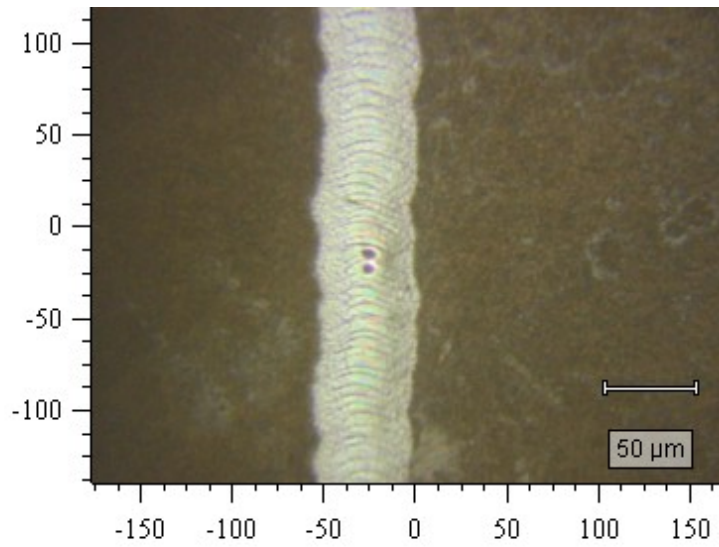
Σχήμα 132: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $1.5Volts$



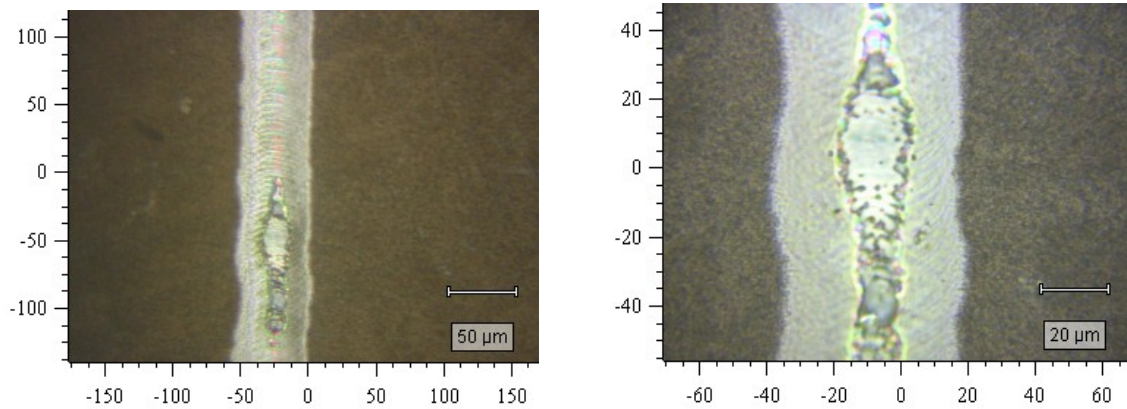
Σχήμα 133: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής και εντός του καναλιού, της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO* που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1mJ/p$ και ταχύτητα $1.5Volts$, $D2 = 2mm$, $d = 96mm$



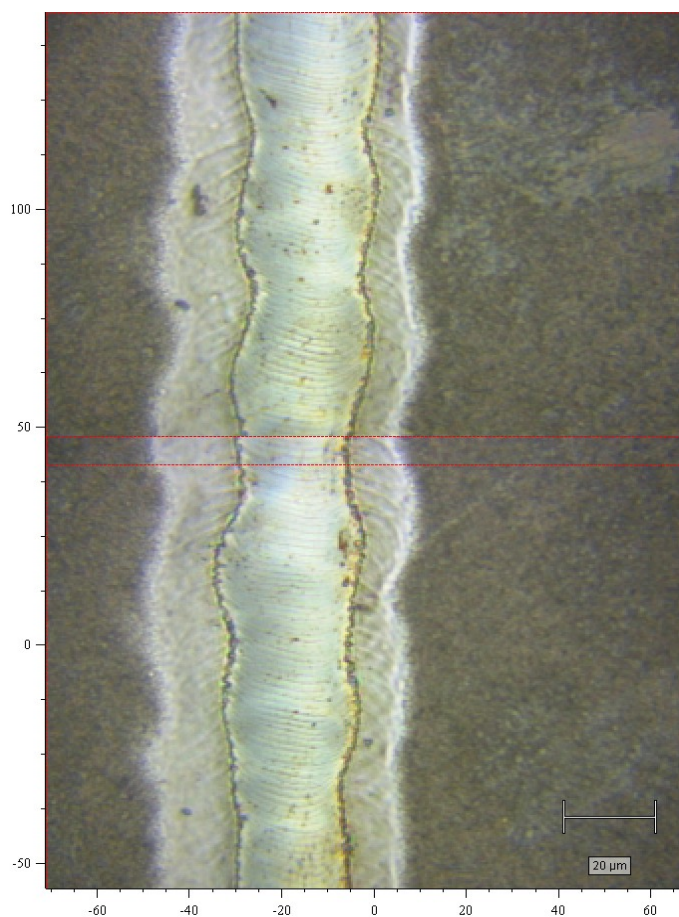
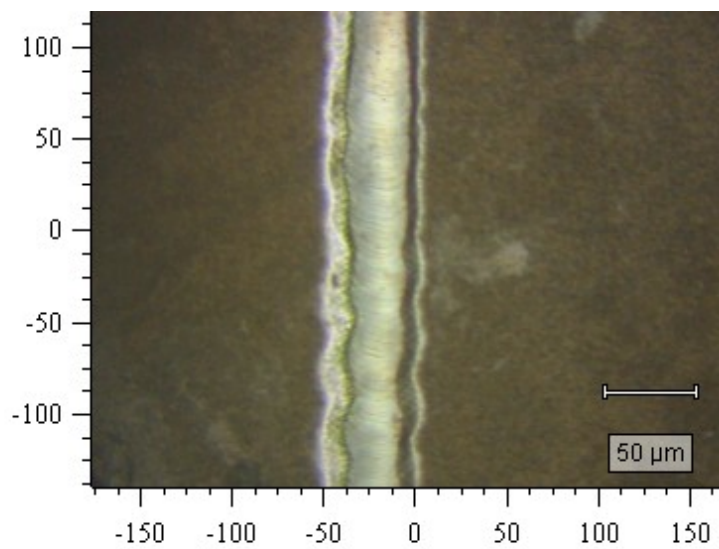
Σχήμα 134: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO* που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας 1mJ/p και ταχύτητα 1.5Volts , $D2 = 2\text{mm}$, $d = 96\text{mm}$



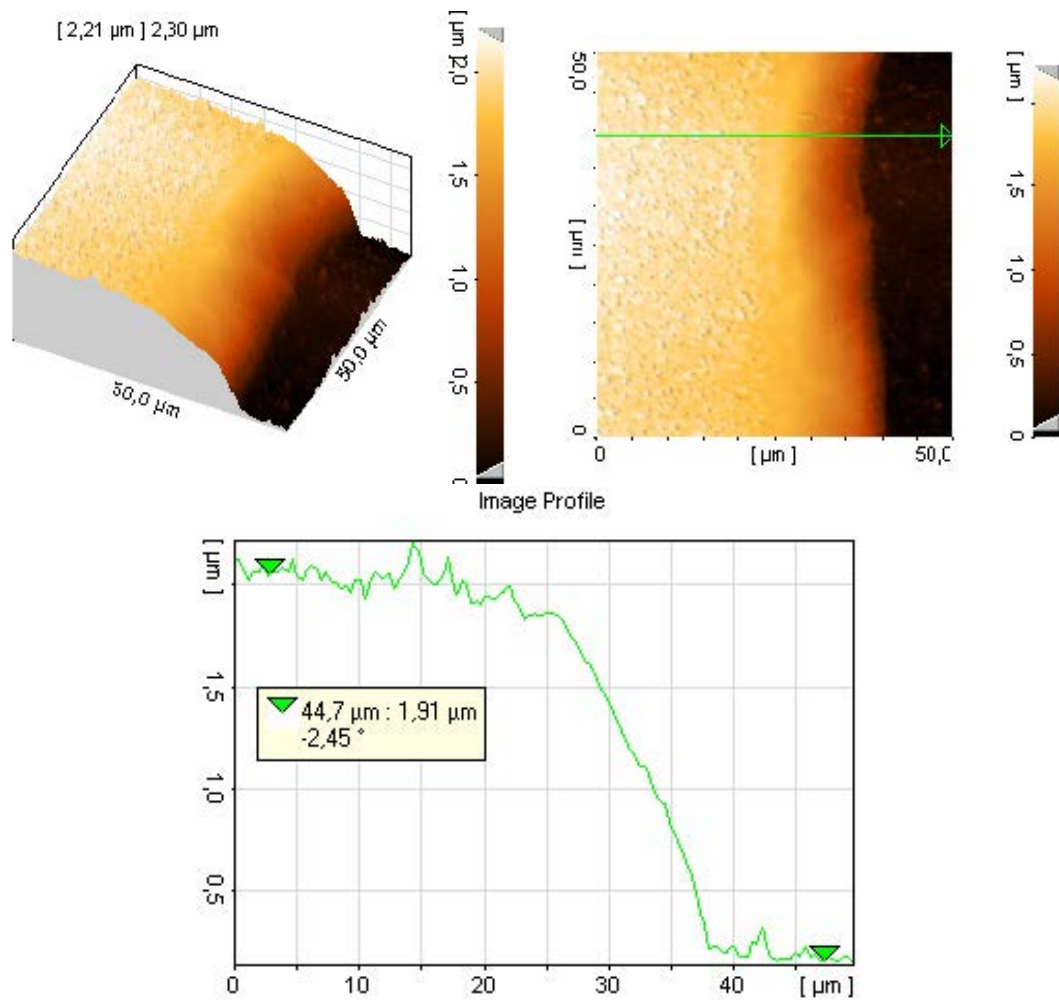
Σχήμα 135: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $1.0Volt$



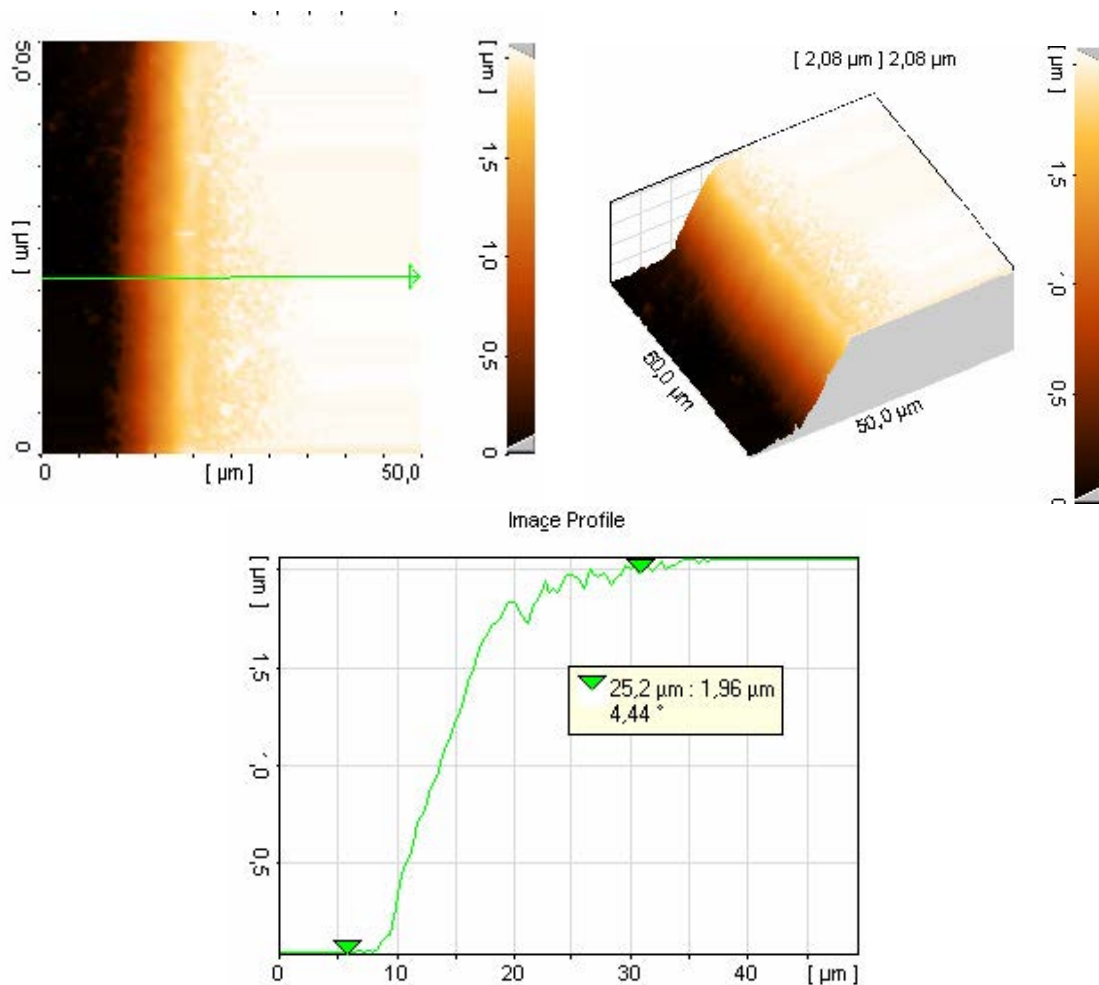
Σχήμα 136: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.75Volt$



Σχήμα 137: Κανάλι από μικρο – επεξεργασία ZnO , με ενέργεια εστιασμένου $laser$ $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.5Volt$



Σχήμα 138: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO* που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$, $D2 = 2mm$ και εστιακή απόσταση $d = 96mm$



Σχήμα 139: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του *ZnO*, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$, $D2 = 2mm$ και εστιακή απόσταση $d = 96mm$

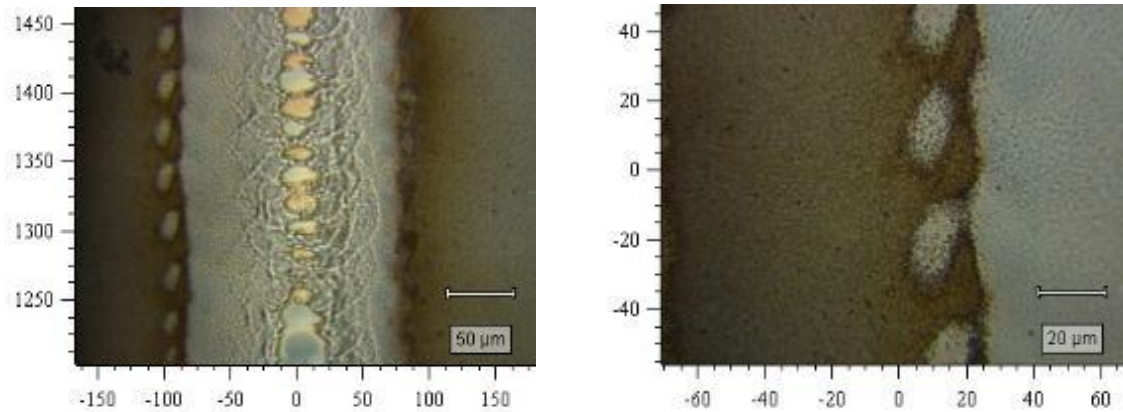
Στην τελευταία σειρά εγχαράξεων, όπως φαίνεται στις Εικόνες 128 έως 139, το πλάτος των καναλιών είναι κοντά στο στόχο των $50\mu m$, χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνεται πλήρη αποδόμηση σε μεγάλες ταχύτητες πρόωσης. Παρουσιάζονται επίσης αρκετές αλληλοκαλύψεις, οι οποίες οδηγούν στην οξείδωση αρκετών περιοχών. Πλήρης αποδόμηση του καναλιού έχουμε για την μικρότερη ταχύτητα ($0.5Volt$) που δοκιμάστηκε, με ομοιόμορφη *HAZ* και στις δύο πλευρές των τοιχωμάτων, που όμως δεν θα επηρεάσει την μετέπειτα λειτουργία της κυψέλης, όπως παρατηρείται από την βιβλιογραφία.

7.2.2 Εγχαράξη δειγμάτων χαλκοπυρίτη CIGS με χρήση laser

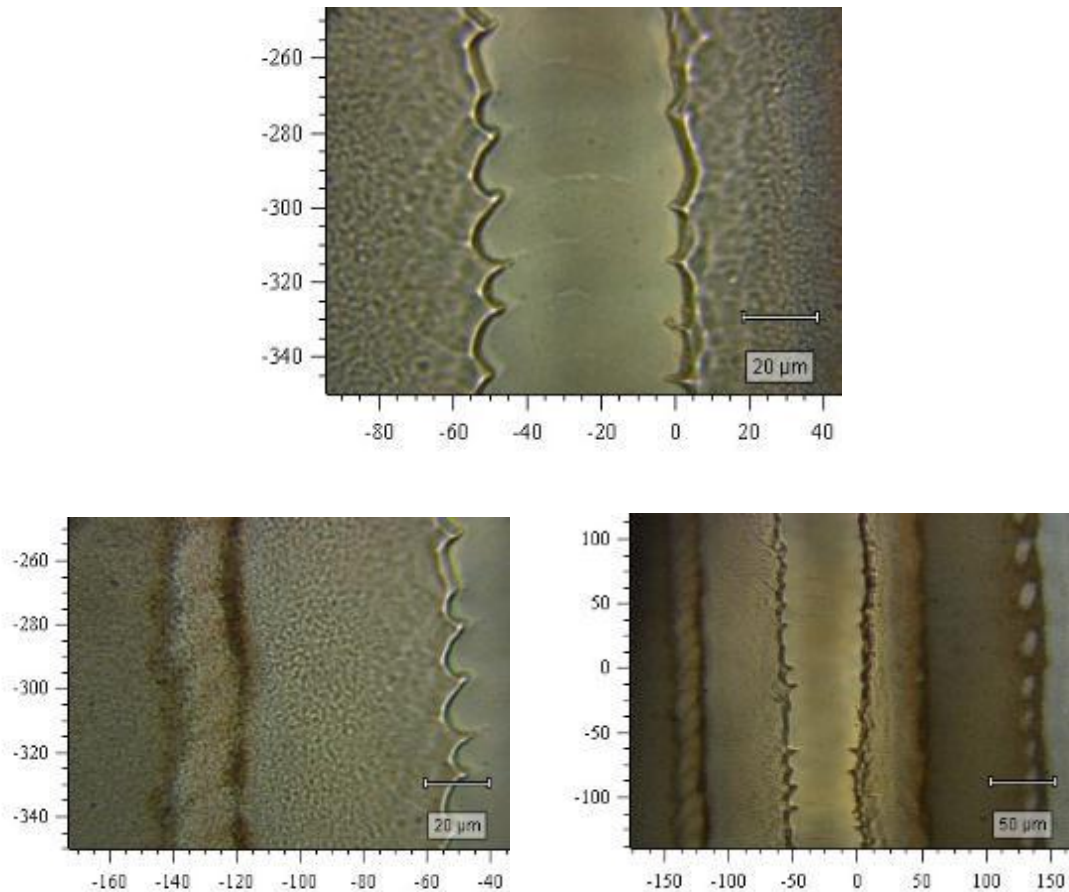
Λαμβάνοντας υπόψιν όπως παράγοντες εγχαράξης που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκαν 13 εγχαράξεις με χρήση laser σε φωτοβολταϊκά 2ης γενιάς με βάση το χαλκοπυρίτη. Τα υμένια που εγχαράχθηκαν ήταν $CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se_{(1-x)}Te_x$, που αναπτύχθηκαν με την μέθοδο *e-beam evaporation* για $x \in [0,1]$ με βήμα 0.2. Οι στόχοι των εγχαράξεων ήταν όπως και προηγουμένως, η δημιουργία καναλιών πλάτους $50\mu m$, με καλή ποιότητα επιφανείας και μικρή θερμικά επηρεασμένη ζώνη. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το ατομικό μικροσκόπιο δυνάμεων (AFM) για τον προσδιορισμό όπως μορφολογίας των παραγόμενων καναλιών.

Για να υπολογιστεί η εστιακή απόσταση φακού χρησιμοποιήθηκε η ανιχνευτική διάταξη πλάσματος (οπτική ίνα, φασματομέτρο, φωτοπολλαπλασιαστής και παλμογράφος). Συγκεκριμένα, ορίζουμε τον μονοχρωμάτορα στα $522nm$, στο μήκος κύματος που γνωρίζουμε ότι εμφανίζονται τρεις δυνατές φασματικές γραμμές *Cu*. Το φάσμα εκπομπής του *Cu* συλλέγεται με τη βοήθεια όπως οπτικής ίνας και εμφανίζεται στον παλμογράφο, από τον οποίο βρίσκουμε την κατάλληλη εστιακή απόσταση, όταν έχουμε μέγιστο εκπεμπόμενο σήμα.

Στην αρχική εγχαράξη επιλέξαμε για ενέργεια του laser τα $2.8mJ/p$ με ταχύτητα πρόωσης όπως βάσης τα $2Volts$ και τα $4Volts$. Το διάφραγμα *D1* επιλέξαμε να είναι ανοιχτό, ενώ το διάφραγμα *D2* είχε τιμή $2mm$ και για την κατεύθυνση όπως δέσμης του laser χρησιμοποιήσαμε πρίσμα.

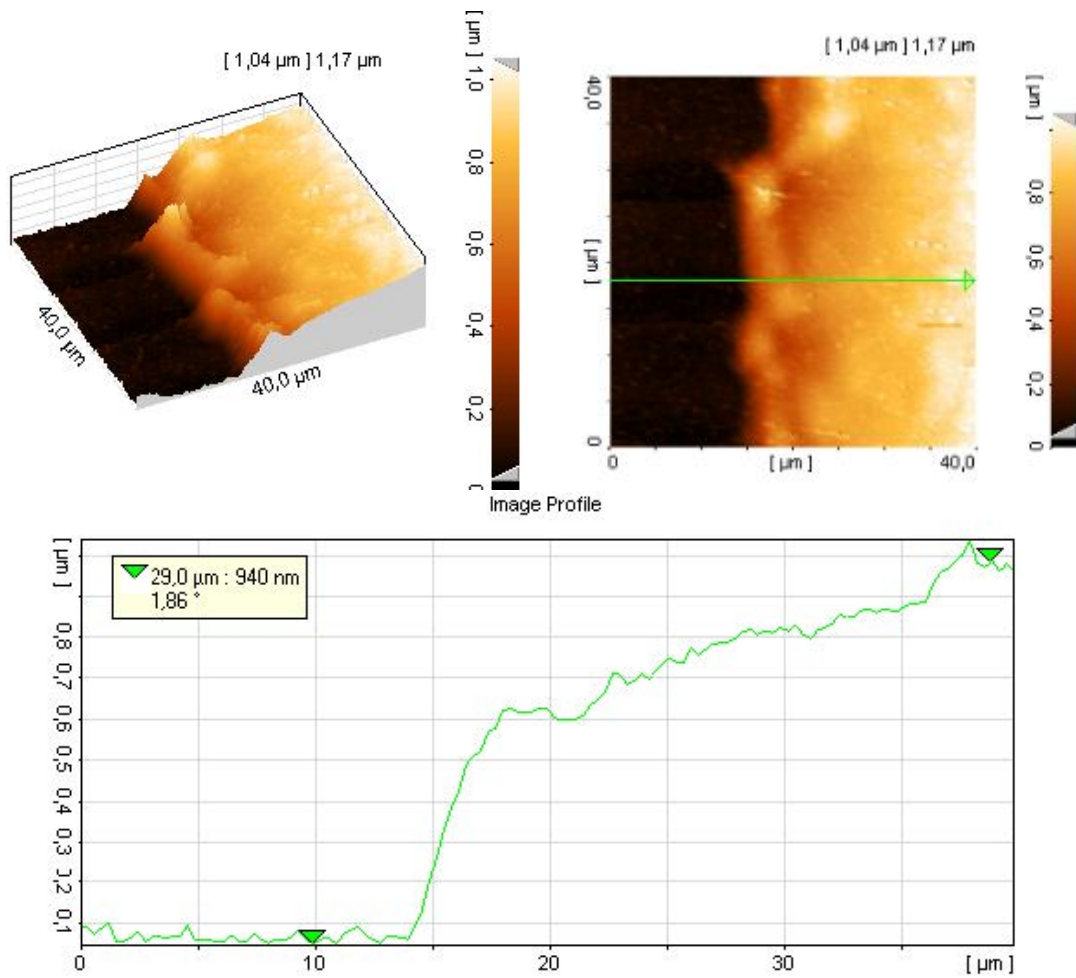


Σχήμα 140: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου laser $2.8mJ/p$ και ταχύτητα $4.0Volts$

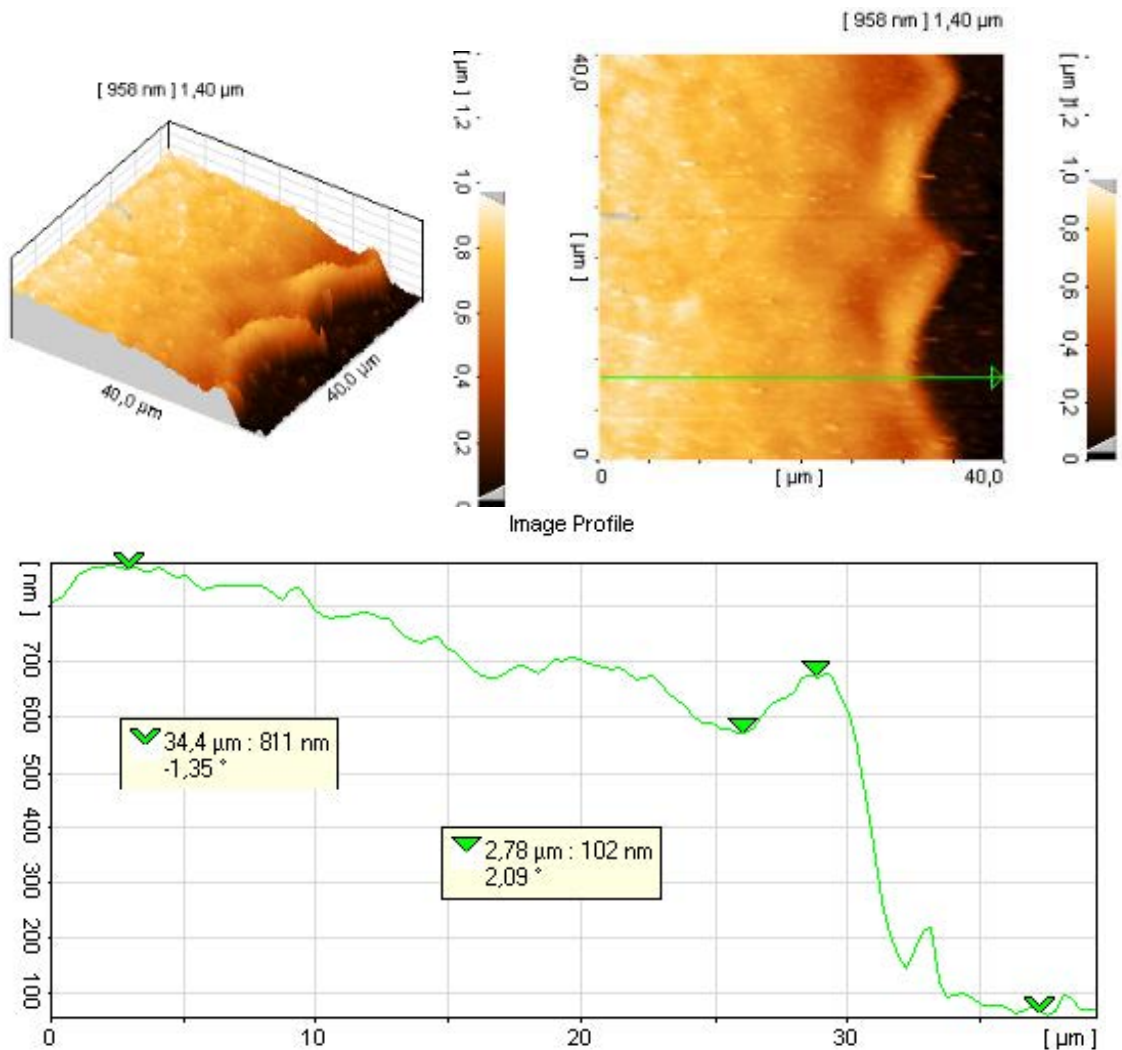


Σχήμα 141: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $2.8mJ/p$ και ταχύτητα $2.0Volts$

Όπως φαίνεται στις Εικόνες 140 και 141, για ταχύτητα πρόωσης $4Volt$ παρουσιάζεται πολύ μεγάλο κανάλι ($150\mu m$) χωρίς να έχει αποδομηθεί σωστά. Επίσης, στην δεξιά πλευρά του καναλιού εμφανίζεται μεγάλη συσσώρευση ενέργειας λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής της δέσμης ενέργειας. Τέλος, στην αριστερή πλευρά του καναλιού παρατηρείται ένα παράλληλο κανάλι, η οποία οφείλεται σε κάποια ανάκλαση της δέσμης, που πρέπει να αποκοπεί. Με τη μείωση της ταχύτητας στα $2Volts$ το πλάτος του καναλιού που παράγεται είναι εξαιρετικά κοντά στο στόχο ($55 - 60\mu m$), το οποίο συνδυάζεται με την πλήρη αποδόμηση της περιοχής. Ωστόσο, εμφανίζεται εκ νέου παράλληλο κανάλι στην αριστερή πλευρά και έντονη συσσώρευση ενέργειας στο δεξιό τοίχωμα.



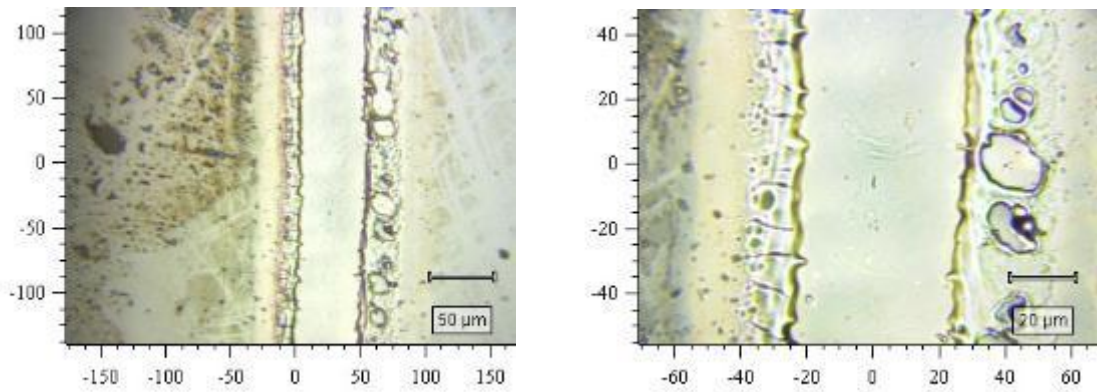
Σχήμα 142: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του μενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $2.8mJ/p$, ταχύτητα $2Volts$



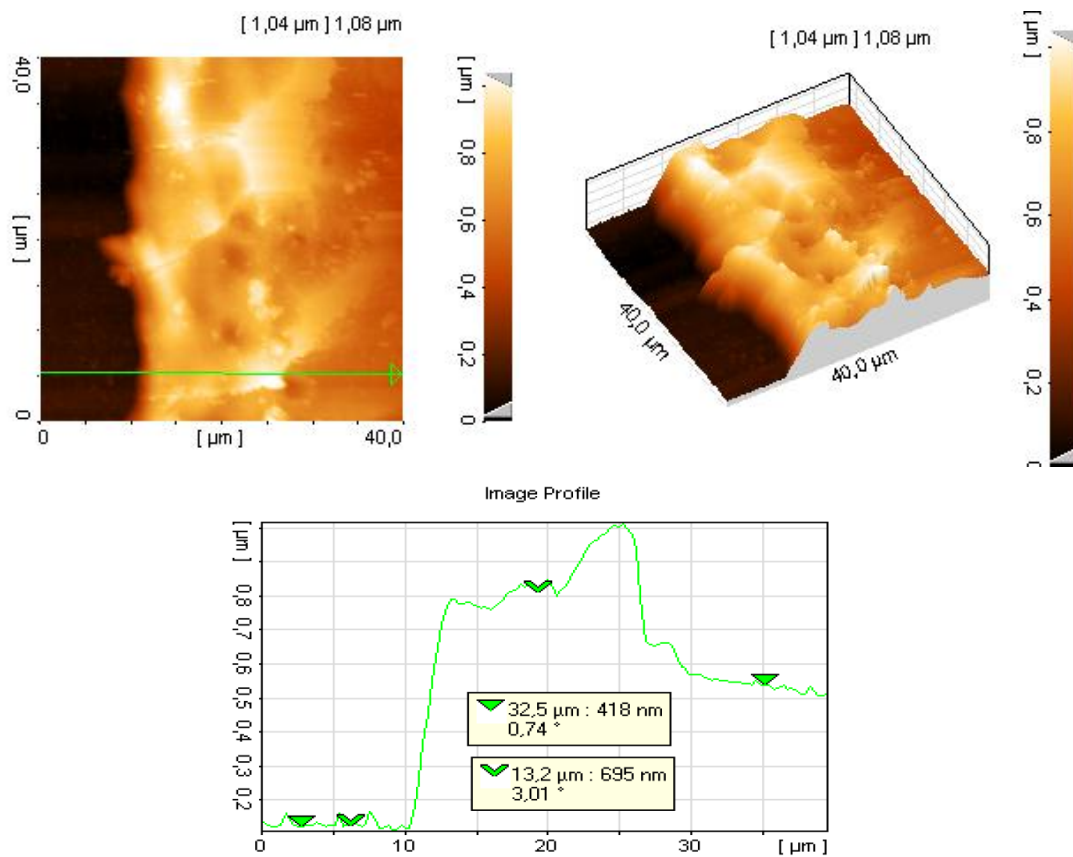
Σχήμα 143: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $2.8mJ/p$, ταχύτητα $2Volts$

Από τις εικόνες του *AFM*, μπορούμε να σχηματίσουμε μια πιο λεπτομερή άποψη για τα τοιχώματα του καναλιού, τα οποία δεν παρουσιάζουν τελικά την επιθυμητή καθετότητα. Ακόμα, γίνεται πιο εμφανής η αποδόμηση υλικού από την *HAZ*, η οποία οφείλεται στην υψηλή ενέργεια που χρησιμοποιήσαμε.

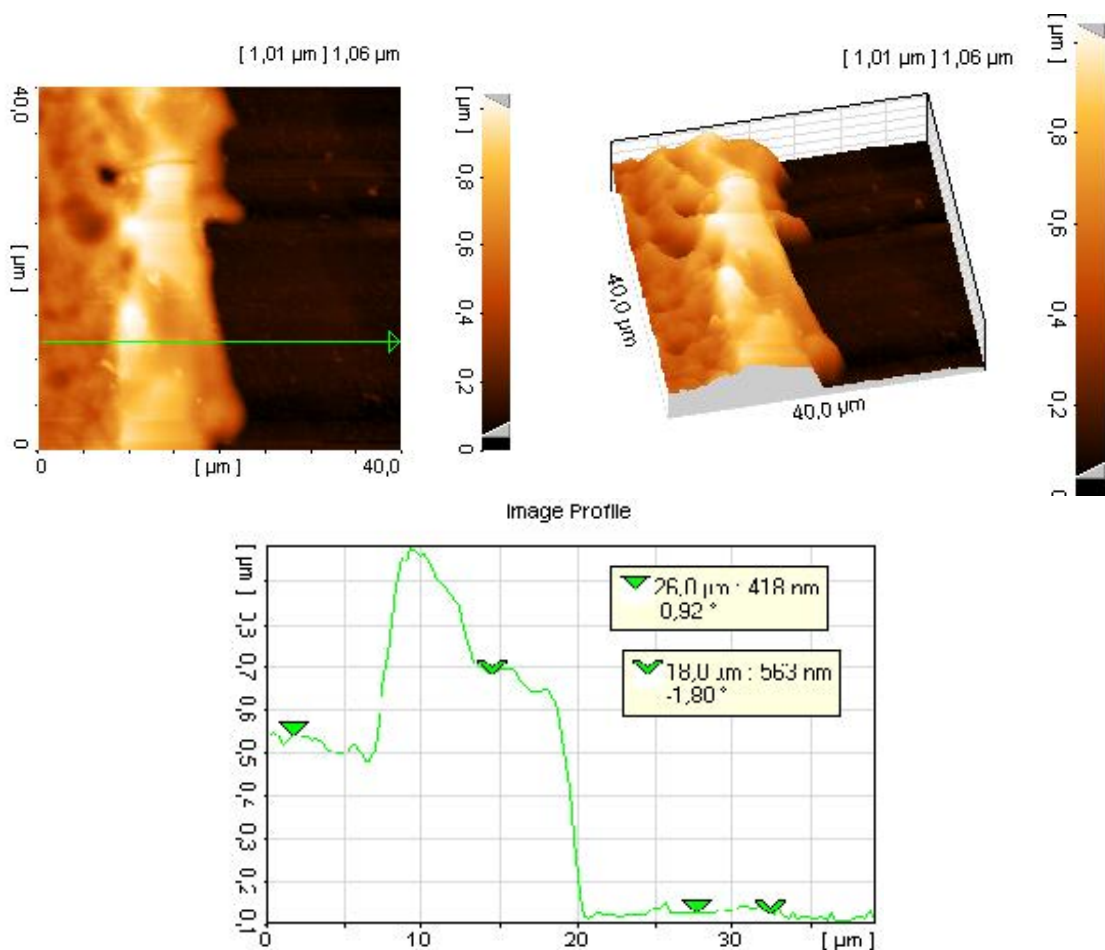
Εν συνεχεία, μειώσαμε την ενέργεια της δέσμης του *laser*, την ταχύτητα πρόωσης και αντικαταστήσαμε τον καθρέφτη με πρίσμα, ώστε να μειωθεί η διάσπαση υλικού από την *HAZ* και να εξαλειφθούν οι ανακλάσεις που παρουσιάζονται στη δέσμη ενέργειας, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, η ενέργεια μειώθηκε στο $1mJ/p$ και η ταχύτητα στα $2.5Volts$. Τέλος, ρυθμίσαμε το διάφραγμα *D1* στα $6mm$ και το *D2* στα $2mm$.



Σχήμα 144: Κανάλια από μικρο - επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.5Volts



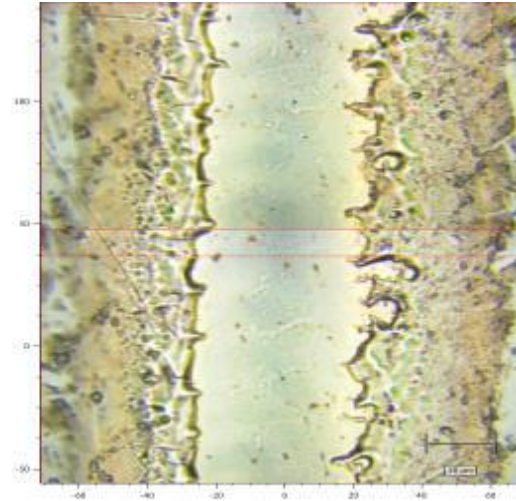
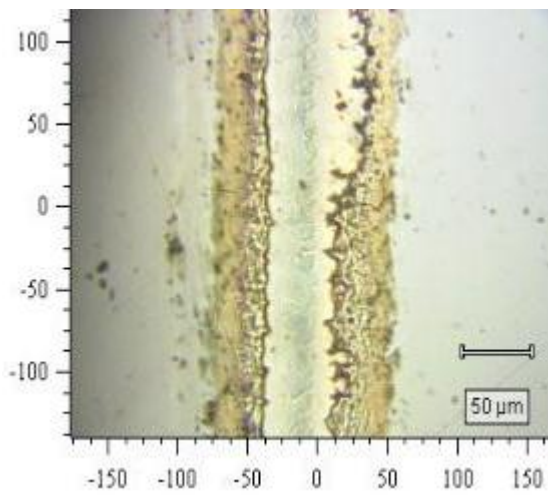
Σχήμα 145: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.5Volts



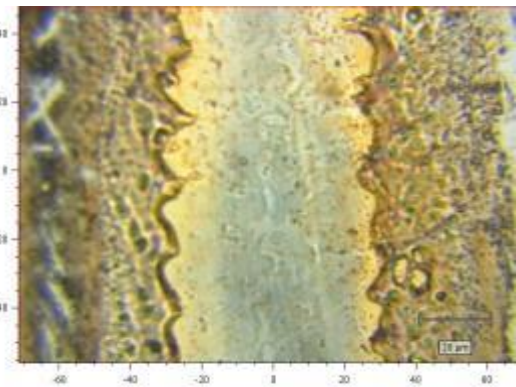
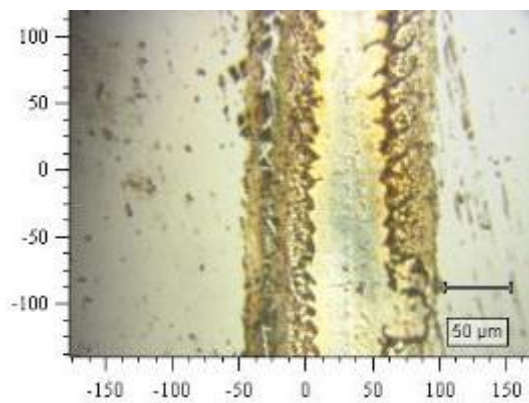
Σχήμα 146: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $2.5Volts$

Όσον αφορά τα νέα πειραματικά δεδομένα παρατηρούμε, ότι δημιουργήθηκε κανάλι $40\mu m$ με πλήρη αποδόμηση του στόχου και παράλληλα δεν εμφανίστηκαν παράπλευρα κανάλια εξαιτίας των ανακλάσεων. Ωστόσο, υπάρχουν περιοχές της *HAZ*, στις οποίες έχουμε αποδόμηση υλικού, ενώ ταυτόχρονα στα τοιχώματα του καναλιού έχει γίνει εναπόθεση ατμοποιημένου υλικού, το οποίο στερεοποιήθηκε.

Για να βελτιώσουμε το προφίλ της δέσμης του *laser* δοκιμάσαμε την τεχνική της αποεστίασης (*defocused*) για $2mm$ και $4mm$ εκτός εστιακής απόστασης. Σύμφωνα με την αποεστίαση, προκαλείται άνοιγμα της δέσμης ενέργειας και έτσι έχουμε μεγαλύτερη ενέργεια περιμετρικά της δέσμης. Οι υπόλοιποι παράγοντες έμειναν αμετάβλητοι.



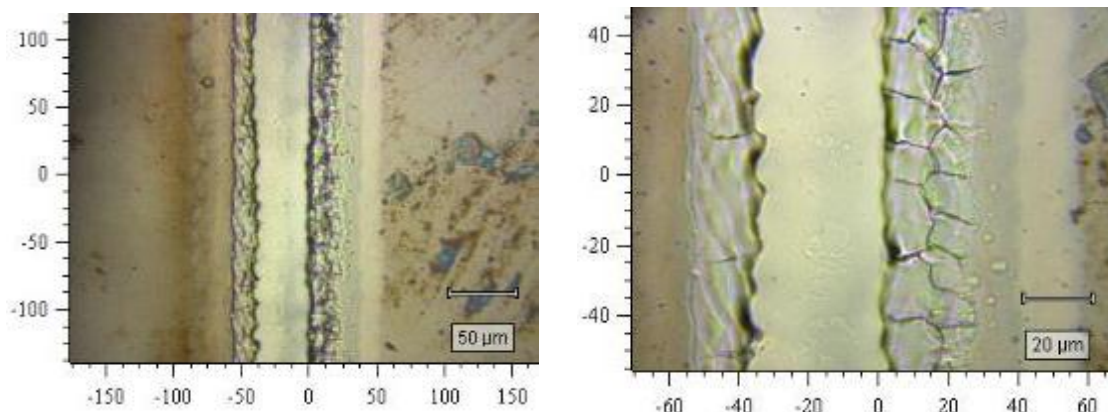
Σχήμα 147: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $2.5Volts$, $2mm$ εκτός εστιακής απόστασης



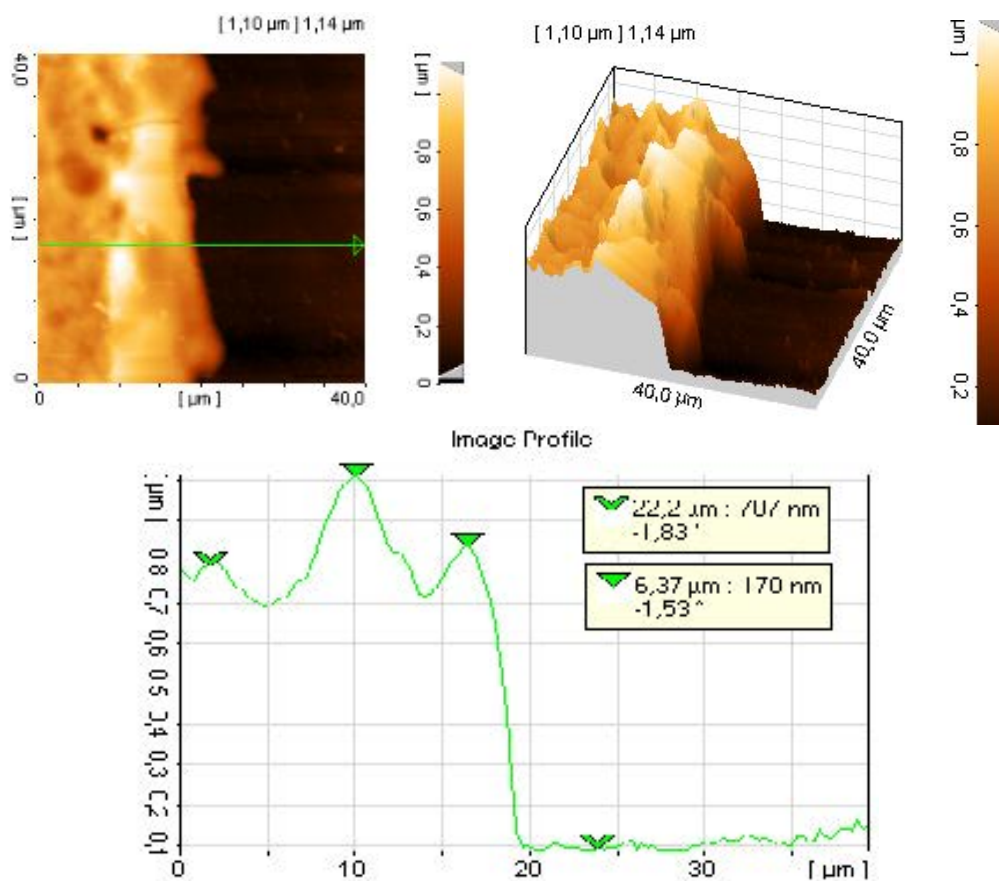
Σχήμα 148: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $2.5Volts$, $4mm$ εκτός εστιακής απόστασης

Κατά την αποεστίαση, τα παραγόμενα κανάλια παρουσιάζουν χειρότερη ποιότητα από τα προηγούμενα. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ανομοιομορφία ανάμεσα στις δύο πλευρές των καναλιών, καθώς και αποδομημένη *HAZ*.

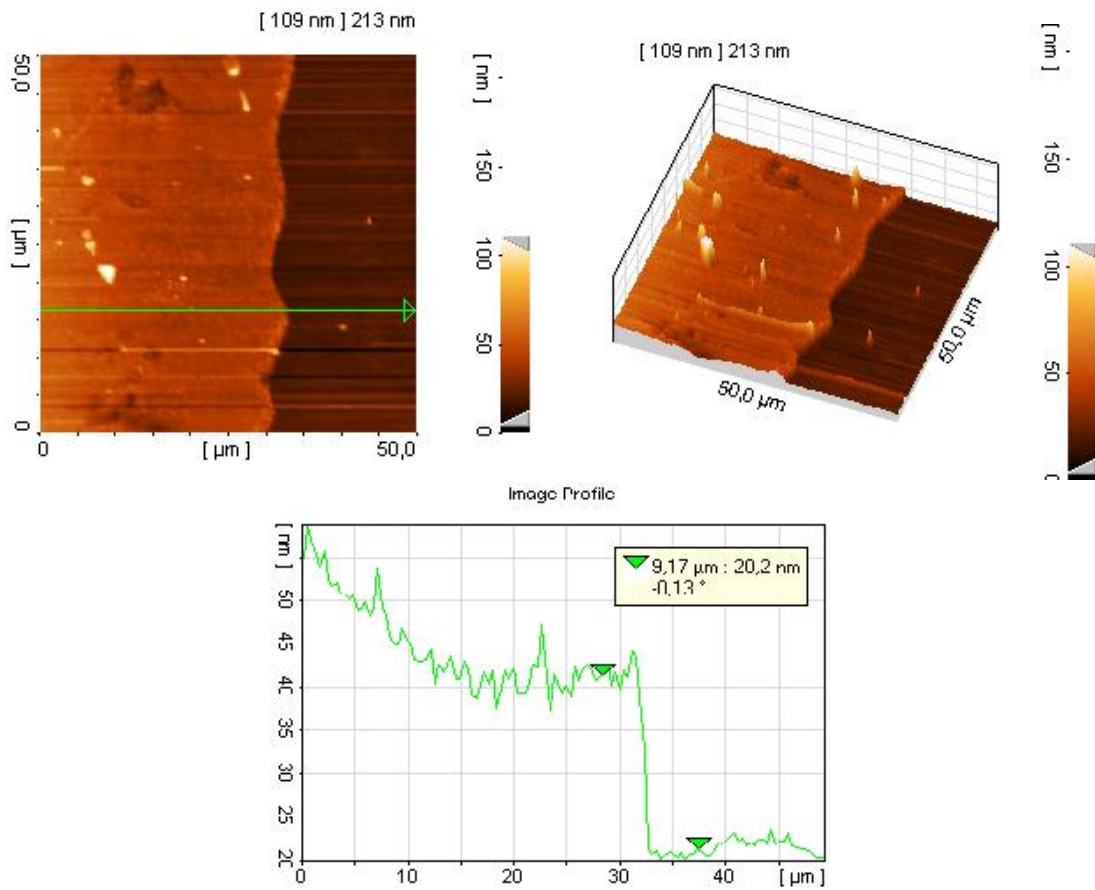
Στην συνέχεια ορίσαμε τα $87mm$ ως εστιακή απόσταση από την άνω ακμή του φακού μέχρι και την κινητή βάση, ενώ παράλληλα μειώσαμε την ταχύτητα στα $2Volts$. Η ενέργεια του *laser* ($1mJ/p$) και τα διαφράγματα $D1(6mm)$ και $D2(2mm)$ παρέμειναν σταθερά.



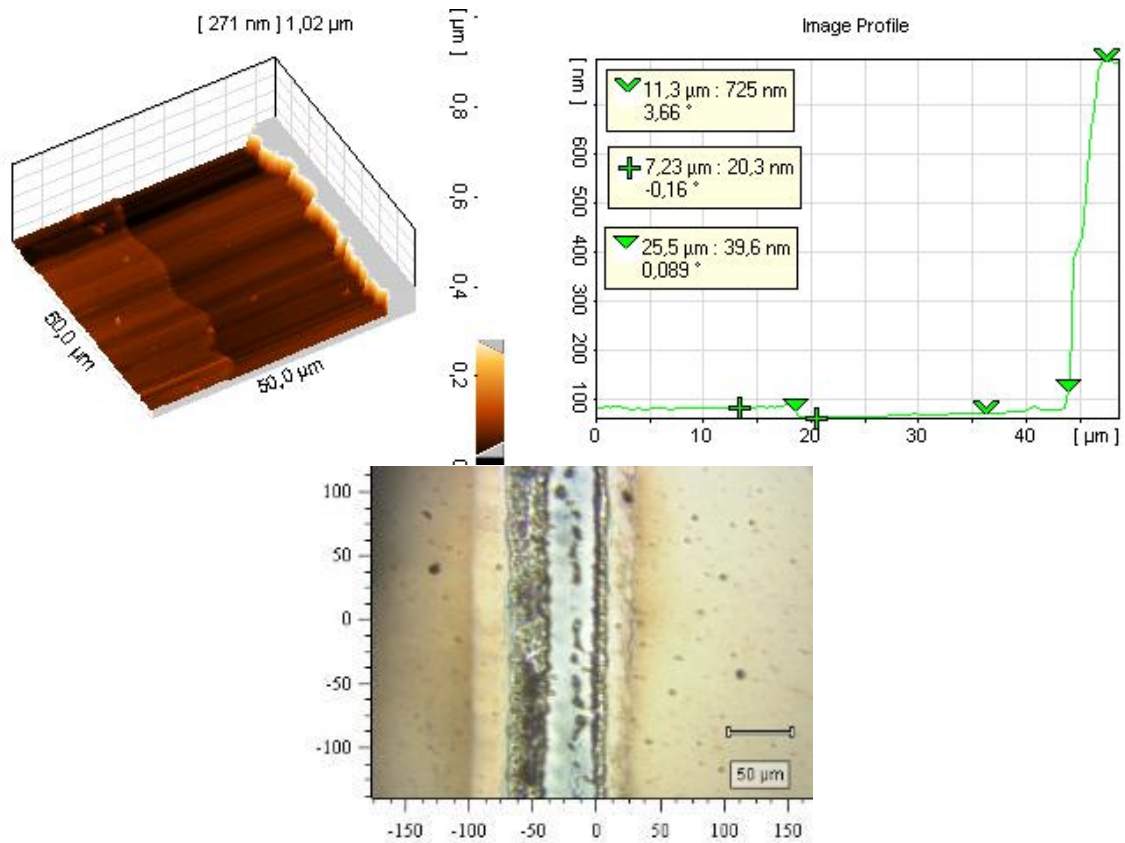
Σχήμα 149: Κανάλια από μικρο - επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts, με εστιακή απόσταση 87mm



Σχήμα 150: Τριδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας 1.0mJ/p, ταχύτητα 2.0Volts και εστιακή απόσταση 87mm



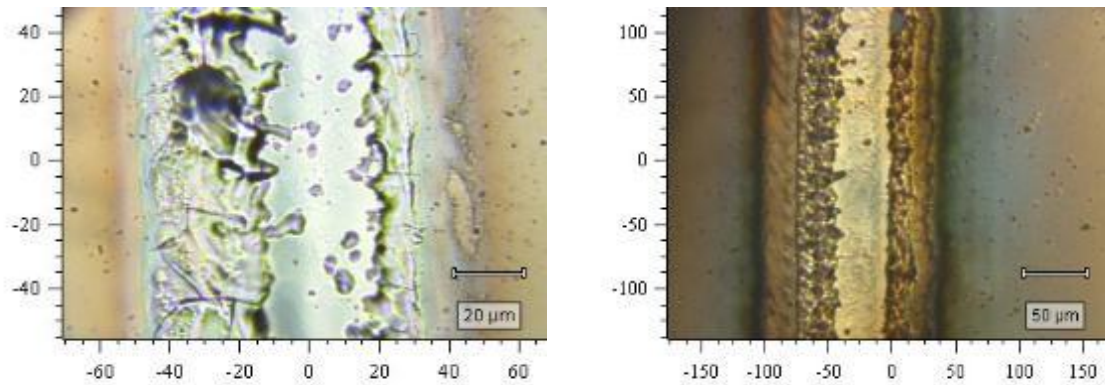
Σχήμα 151: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, του πυθμένα της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $2.0Volts$ και εστιακή απόσταση $87mm$



Σχήμα 152: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $2.0Volts$ και εστιακή απόσταση $87mm$

Με την νέα εστιακή απόσταση παρατηρούμε την δημιουργία καναλιού $40\mu m$, με πλήρη αποδόμηση. Η θερμικά επηρεασμένη περιοχή εμφανίζει ρωγμές, χωρίς ωστόσο να έχουμε αποδόμηση υλικού. Οι πλευρές εμφανίζουν ομοιομορφία, ενώ παρατηρείται εναπόθεση υλικού κυρίως στην αριστερή πλευρά. Τέλος, εμφανίζεται στον πυθμένα του καναλιού υλικό πάχους $40nm$ με πλάτος $20\mu m$, το οποίο οφείλεται στην ανομοιόμορφη δέσμη ενέργειας.

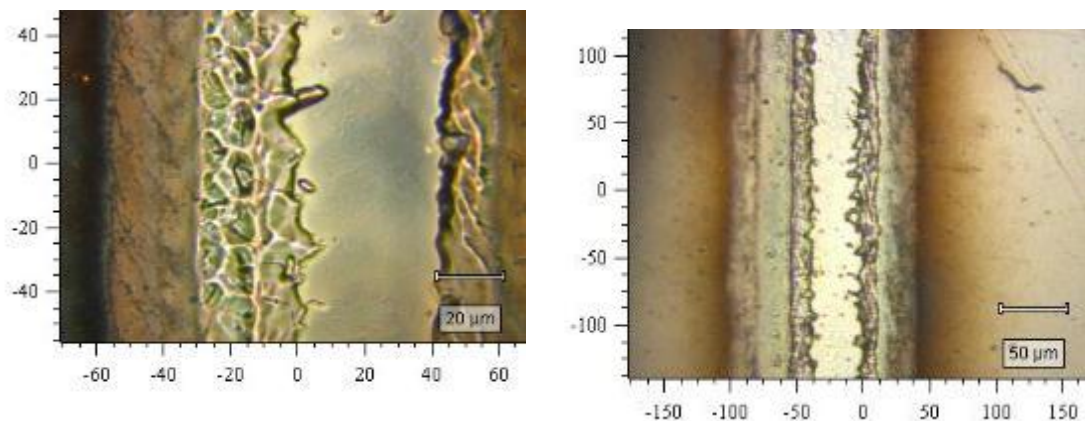
Για τον περιορισμό της *HAZ* που παρουσιάζεται, ρυθμίσαμε την ενέργεια στα $0.5mJ/p$, κρατώντας τις υπόλοιπες παραμέτρους σταθερές.



Σχήμα 153: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $0.5mJ/p$ και ταχύτητα $2.0Volts$, με εστιακή απόσταση $87mm$

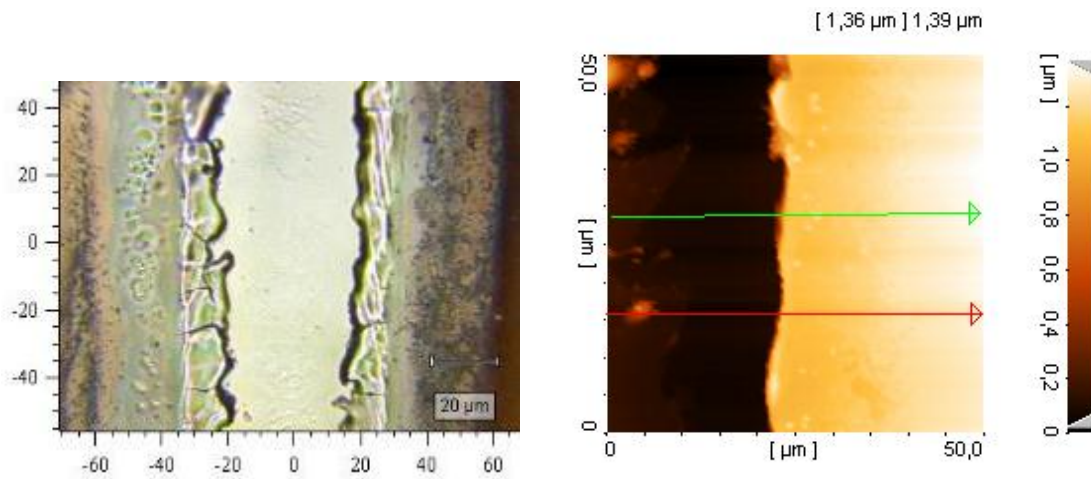
Παρατηρείται ότι η μείωση της ενέργειας της δέσμης δεν βοήθησε στην πλήρη αποδόμηση του καναλιού, ενώ παράλληλα εμφανίζεται μεγάλη ανομοιομορφία σε σχέση με την *HAZ* στις δύο πλευρές, το οποίο οφείλεται στα οπτικά εξαρτήματα της διάταξης.

Στο επόμενο βήμα, για να πετύχουμε καλύτερο και πιο ομοιόμορφο προφίλ μετακινήσαμε το διάφραγμα *D2* και αυξήσαμε παράλληλα την ενέργεια στο $1mJ/p$.

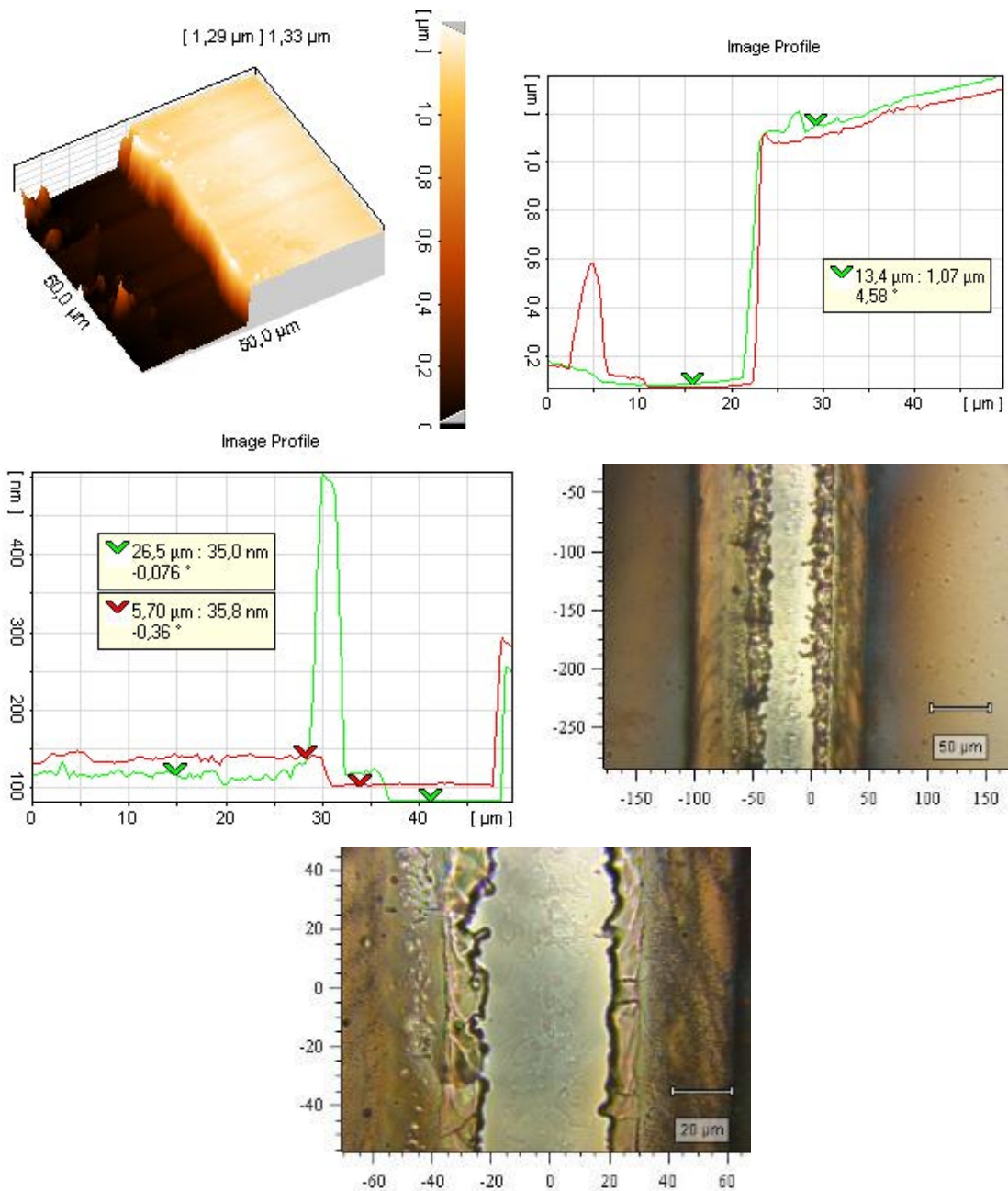


Σχήμα 154: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $2.0Volts$, με εστιακή απόσταση $87mm$

Από την Εικόνα 154 παρατηρήθηκε ότι η ενέργεια του $1mJ/p$ δεν επαρκεί για την πλήρη αποδόμηση του καναλιού, όμως η μετακίνηση του διαφράγματος *D2* βοήθησε στην βελτίωση της κατανομής της δέσμης. Για να βελτιώσουμε τα παραπάνω αποτελέσματα επιλέξαμε την αύξηση της ενέργειας κατά $0.25mJ/p$.



Σχήμα 155: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.25mJ/p$ και ταχύτητα $2.0Volts$, με εστιακή απόσταση $87mm$



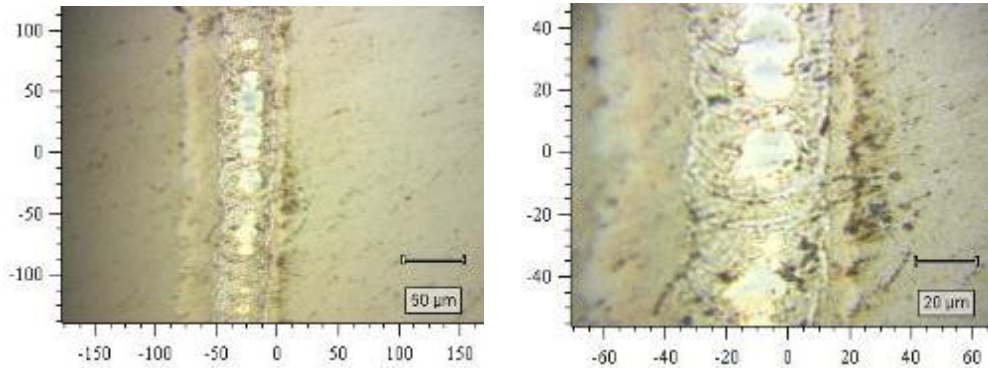
Σχήμα 156: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1.25mJ/p$, ταχύτητα $2.0Volts$ και εστιακή απόσταση $87mm$

Από την Εικόνα 155 παρατηρούμε την δημιουργία ενός καναλιού $\sim 40\mu m$, στο οποίο όμως εμφανίζονται αρκετά υπολείμματα υλικού. Από την Εικόνα 156 του *AFM*, διαπιστώνουμε ότι και οι δύο πλευρές εμφανίζουν την επιθυμητή καθετότητα, αλλά και την ύπαρξη μικρής εναπόθεσης υλικού (πάχους $\sim 2\mu m$) στα τοιχώματα, καθώς και την ύπαρξη σκαλοπατιού στον πυθμένα του καναλιού (πάχους $\sim 1\mu m$).

Για περαιτέρω βελτίωση του καναλιού και της καθαρότητας που παρουσιάζει αυξήσαμε την ενέργεια του *laser* στα $1.5mJ/p$. Με την αύξηση της ενέργειας καταφέραμε την πλήρη αποδόμηση της

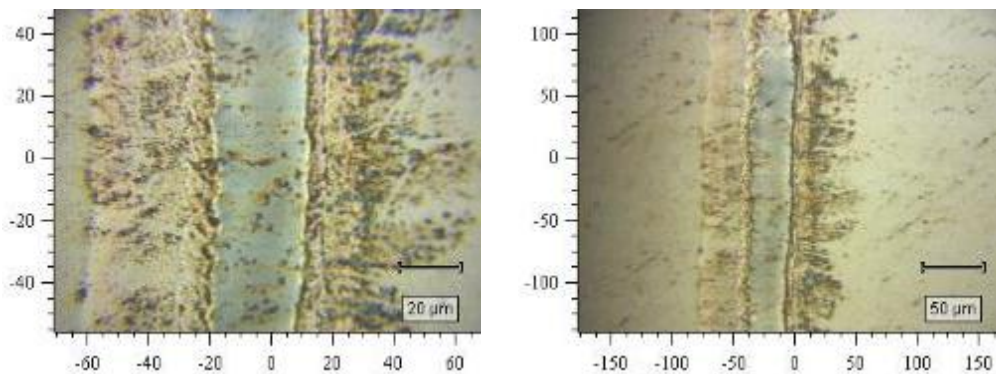
περιοχής του καναλιού πλάτους $45\mu\text{m}$, όμως παράλληλα αυξήθηκε η θερμικά επηρεασμένη περιοχή.

Η χρήση του καθρέφτη για την κατεύθυνση της δέσμης οδήγησε στην παραγωγή καναλιών που παρουσιάζουν έντονα επηρεασμένες πλευρές και τοιχώματα. Για αυτό το λόγο επαναφέραμε το πρίσμα στην πειραματική διάταξη προσαρμόζοντας παράλληλα την ενέργεια της δέσμης σε αρκετά χαμηλότερη ενέργεια και συγκεκριμένα στο 1mJ/p και χωρίς άλλες αλλαγές στους υπόλοιπους παράγοντες.



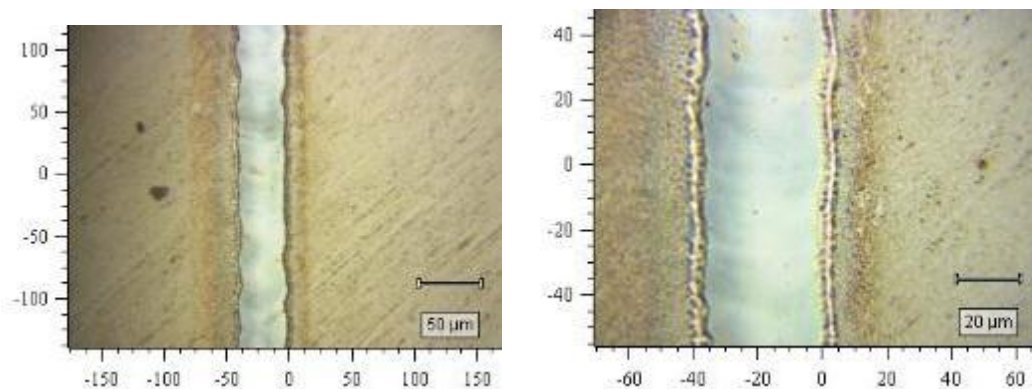
Σχήμα 157: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.0mJ/p και ταχύτητα 2.0Volts , με εστιακή απόσταση 87mm

Η ύπαρξη υπολειμμάτων στο κανάλι οδήγησε σε μείωση της ταχύτητα των κινητήρων της βάσης κατά το ήμισυ και συγκεκριμένα στο 1Volt .

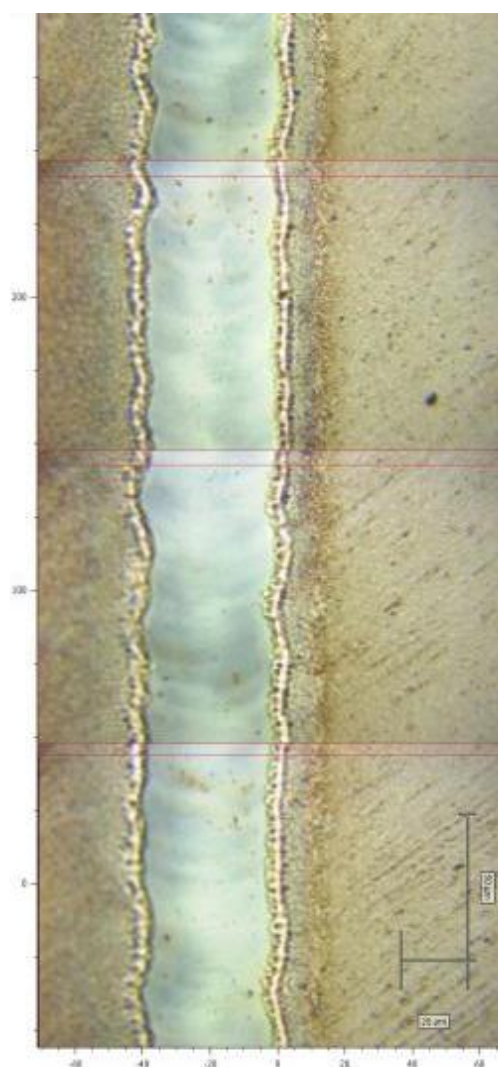


Σχήμα 158: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* 1.0mJ/p και ταχύτητα 1.0Volt , με εστιακή απόσταση 87mm

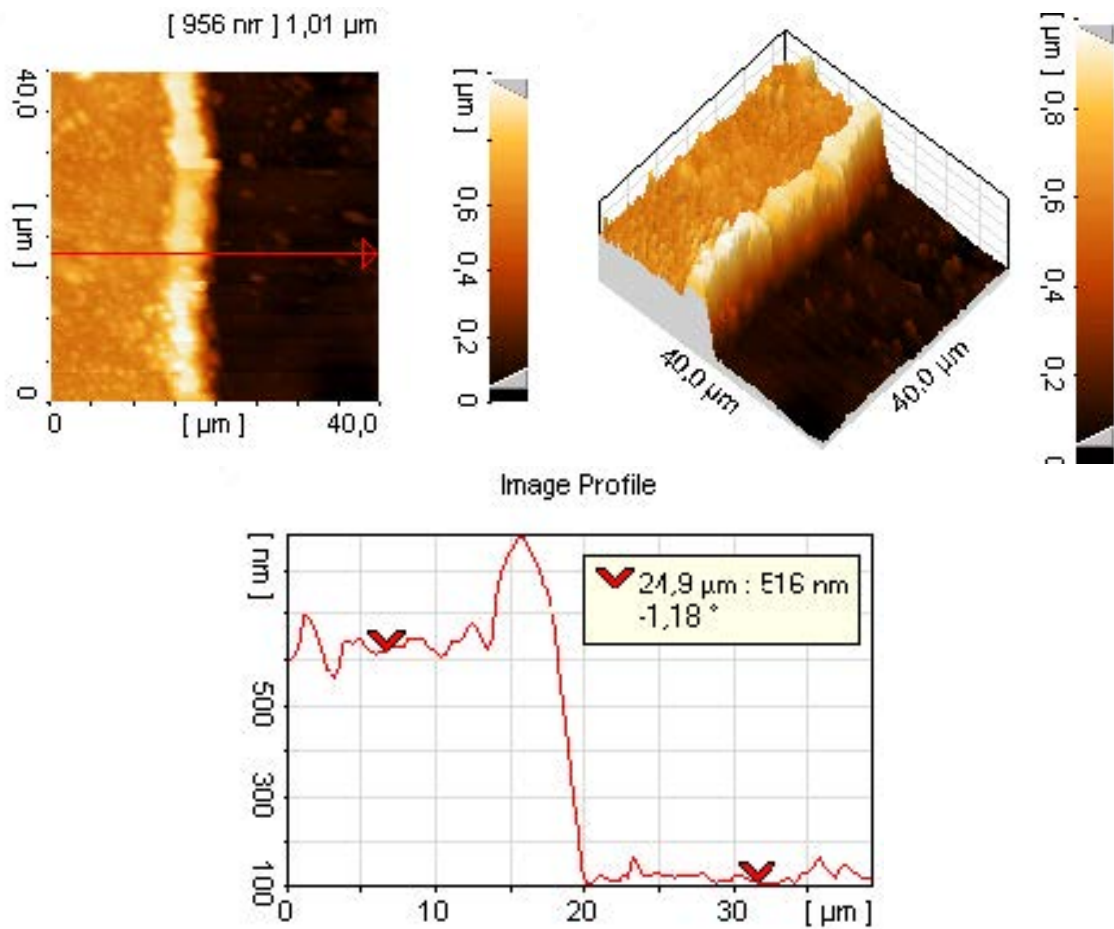
Η νέα ταχύτητα δεν βελτίωσε την καθαρότητα της επιφάνειας, για αυτό επιλέχθηκε να μειωθεί εκ νέου στο μισό η ταχύτητα (0.5Volt).



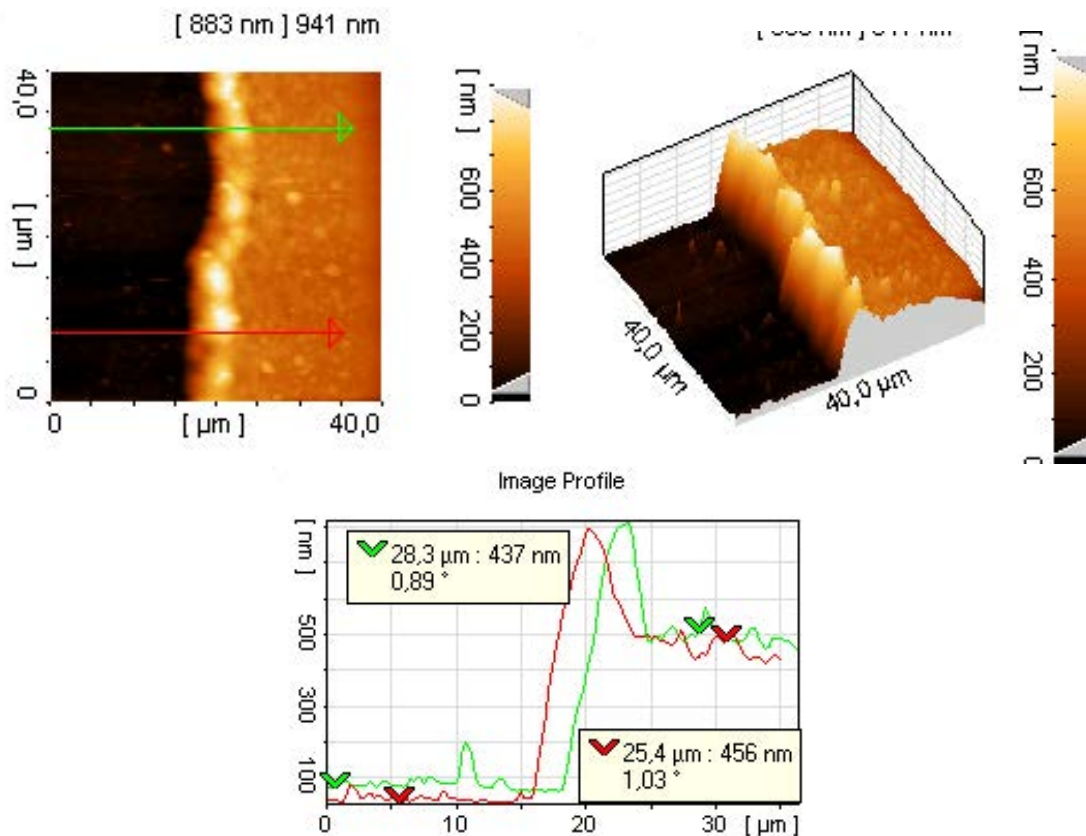
Σχήμα 159: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.5Volt$, με εστιακή απόσταση $87mm$



Σχήμα 160: Κανάλια από μικρο – επεξεργασία χαλκοπυρίτη, με ενέργεια εστιασμένου *laser* $1.0mJ/p$ και ταχύτητα $0.5Volt$, με εστιακή απόσταση $87mm$



Σχήμα 161: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της αριστερής πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$ και εστιακή απόσταση $87mm$



Σχήμα 162: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ, με χρήση του *AFM*, της δεξιάς πλευράς της ακμής της αποδομημένης περιοχής του υμενίου του χαλκοπυρίτη, που παράχθηκε με εστιασμένο *laser* ενέργειας $1.0mJ/p$, ταχύτητα $0.5Volt$ και εστιακή απόσταση $87mm$

Κατά την τελευταία εγχάραξη παρατηρήθηκαν βελτιωμένα αποτελέσματα σε όλους τους τομείς του καναλιού. Αρχικά, το πλάτος του καναλιού μετρήθηκε στα $38\mu m$ με πλήρη αποδόμηση στο εσωτερικό του καναλιού. Η θερμικά επηρεασμένη περιοχή παρουσιάζει ομοιομορφία και μικρή έκταση σε σύγκριση με προηγούμενα αποτελέσματα. Τέλος, από τις εικόνες του *AFM*, παρατηρούμε εναπόθεση υλικού στην κορυφή των τοιχωμάτων, τα οποία όμως παρουσιάζουν αρκετά καλή καθαρότητα.

7.2.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εγχάραξης - Συμπεράσματα

Συγκεντρώνοντας τα βέλτιστα αποτελέσματα της εγχάραξης των λεπτών υμενίων *ZnO* και *CIGS*, έχουμε:

	<i>ZnO</i>	<i>CIGS</i>
Ενέργεια <i>Laser</i> [<i>mJ/p</i>]	1	1
Διάφραγμα <i>D1</i> [<i>mm</i>]	6	6
Διάφραγμα <i>D2</i> [<i>mm</i>]	2	2
Ταχύτητα πρόωσης [<i>Volt</i>]	0.5	0.5
Εστιακή απόσταση [<i>mm</i>]	96	87
Τύπος διάταξης	Πρίσμα	Πρίσμα
Πλάτος καναλιού [<i>μm</i>]	25-35	39

Πίνακας 1: Βέλτιστα αποτελέσματα εγχαραξέων

Αρχικά, παρατηρούμε ότι το πλάτη των βέλτιστων καναλιών είναι μικρότερα από τον στόχο που τέθηκε στην αρχή των πειραμάτων. Επίσης, είναι εμφανές ότι και τα δύο είδη λεπτών υμενίων μπορούν να κατεργαστούν με σχεδόν ίδιες εργαστηριακές διατάξεις.

8 Βελτιώσεις

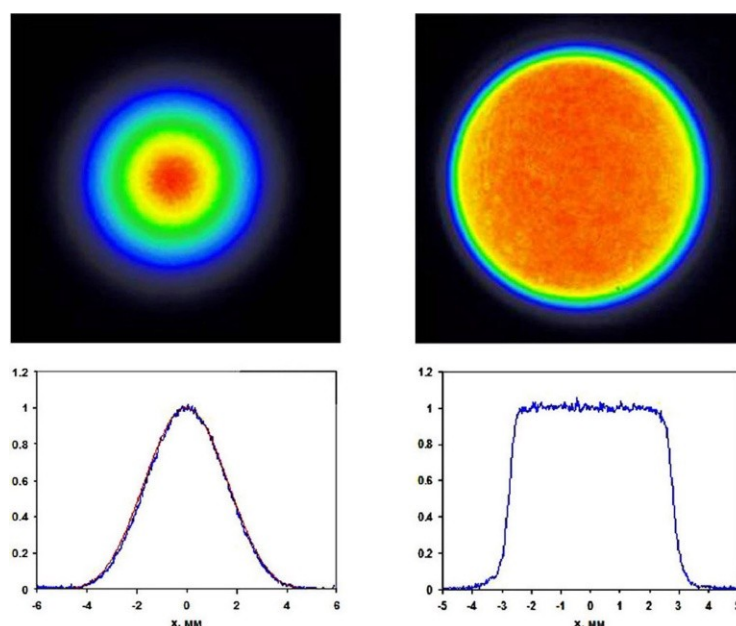
Ως κύριος στόχος των προτεινόμενων βελτιώσεων είναι η επίτευξη μείωσης του πλάτους των παραγόμενων καναλιών, καθώς και η βελτίωση της ποιότητας του και ταυτόχρονα μειωμένη HAZ. Για την βελτίωση των εργαστηριακών αποτελεσμάτων μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια σειρά βελτιώσεων κυρίως στις εργαστηριακές διατάξεις και τον τρόπο λειτουργίας τους. Μερικές από αυτές είναι:

- Η χρησιμοποίηση οπτικής ίνας (*optical fiber*) ειδικού τύπου που θα βελτιώσει την μεταφορά της δέσμης του *laser* και θα μειώσει της διάφορες απώλειες σε αυτή
- Η χρήση *flat top laser beam shaper*, το οποίο μπορεί να μετατρέψει το προφίλ μιας *Gaussian* δέσμης *laser* σε *flat top*, κατά το οποίο παράγονται ποιοτικότερα κανάλια στα υμένια



Σχήμα 163: Αρχή λειτουργίας διαμορφωτή δέσμης

- Η επίτευξη ενός *flat top* προφίλ μπορεί να γίνει με την χρησιμοποίηση ενός *excimer laser* σε μήκη κύματος 248mm ή 193mm. Με ένα *flat top* προφίλ δέσμης *laser* μπορούμε να πετύχουμε κανάλια μικρότερου πλάτους, καθώς και λόγω των μικρών μηκών κύματος που λειτουργεί το *laser*, έχουμε καλύτερη απορρόφηση ενέργειας από το υμένιο και σαν συνέπεια αποδοτικότερη αποσύνθεση του καναλιού.



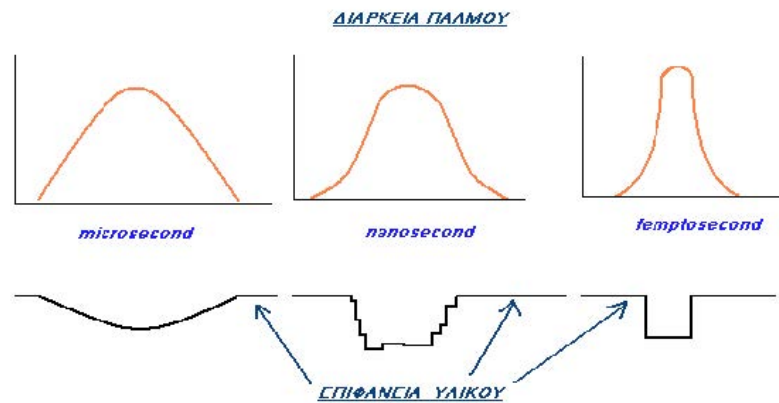
Σχήμα 164: Παράδειγμα διαμόρφωσης δέσμης. Αριστερά *Gaussian* δέσμη, δεξιά *flat top* δέσμη

- Για καλύτερη εστίαση της δέσμης του *laser* μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οπτικές παγίδες (*objectives*)



Σχήμα 165: Οπτικές παγίδες δέσμης *laser*

- Συνίσταται η χρήση πηγών *laser* με διάρκεια παλμών της τάξεως των *picoseconds* (*ps*) ή και των *femtoseconds* (*fs*), διότι οδηγούν σε απευθείας εξάχνωση και έτσι προσφέρουν τομές μεγάλης ακρίβειας



Σχήμα 166: Αλληλεπίδραση της διαφορετικής διάρκειας παλμών *laser*

Από βιομηχανικής και εμπορικής πλευράς η χρονική διάρκεια των εγχαραξών είναι αρκετά μεγάλη. Για την εγχάραξη πολλών υμενίων ταυτόχρονα είναι δυνατή η χρήση *beam splitters*, με τους οποίους μπορούμε να διαχωρίσουμε την δέσμη σε παράλληλα κανάλια και να αυξήσουμε την παραγωγικότητα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Επίσης, μπορούμε να επιλέξουμε *Nd : YAG*, μήκους κύματος 355nm , με μεγαλύτερη συχνότητα, ώστε να αντισταθμίσουμε την αύξηση ταχύτητας της κινητής βάσης, με σκοπό την μείωση του χρόνου της κατεργασίας.

Αναφορές

- [1] Alvin D. Compaan, “Photovoltaics: Clean power for the 21st century”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) p.2170–2180
- [2] Roger A. Messenger, Jerry Ventre, “Photovoltaic Systems Engineering”, Taylor & Francis, 2005
- [3] Κονσολάκης Μιχαήλ, ‘ΓΕΝΙΚΗ ΧΗΜΕΙΑ - Θεωρία και εφαρμογές’, Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Αένας, 2008
- [4] Zeman M., Ηλεκτρονικές σημειώσεις “Semiconductor materials for solar cells”, TU Delft, 2014
- [5] Luque A., Hegedus S., “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [6] R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes, “Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues”, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* 51 (2005) p.1-42
- [7] El Chaara L., lamonta L. A., El Zeinb N., “Review of photovoltaic technologies”, Volume 15, Issue 5, June 2011, p.2165–2175
- [8] Χουντάλας Βασίλειος, ‘Δομικές και οπτικές ιδιότητες, στοιχειακή ανάλυση και εγχάραξη με *laser* λεπτών υμενίων $CuInGaSe_{1-x}Te_x$ για φωτοβολταϊκά στοιχείας 2ης γενιάς’, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2012
- [9] Μάρκου Ελένη, Ανάπτυξη λεπτών υμενίων $ZnO : M$ με Παλμική Εναπόθεση με *Laser*: Μικρο – εγχάραξη, μελέτη οπτικών και μορφολογικών ιδιοτήτων για φωτοβολταϊκά στοιχεία 2ης γενιάς, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2012
- [10] Ζιάκας Ιωάννης, ‘Οπτικός Χαρακτηρισμός Χαλκοπυριτικών Απορροφητών σε εξάρτηση από τη θερμοκρασία’, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2012
- [11] Κοράλλη Παναγιώτα, ‘Μικρο-επεξεργασία λεπτού υμενίου μολυβδενίου (Mo) με *laser* για εφαρμογή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία’, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2010
- [12] Σταματάκη Μαρία, ‘Ανάπτυξη λεπτών υμενίων NiO με Παλμική Εναπόθεση με *Laser* (*PLD*) και χαρακτηρισμός τους’, Μεταπτυχιακή Εργασία, Αθήνα, 2006
- [13] Λαγόπουλος Ισίδωρος, ‘Πειραματική Μελέτη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Λεπτών Υμενίων’, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2011
- [14] Ρεντούμης Μ., ‘Ανάπτυξη Βιομηχανικής Γραμμής Παραγωγής Ανακύκλωσης Φωτοβολταϊκών Πινάκων Κρυσταλλικού Πυριτίου’, Μεταπτυχιακή Εργασία, Χανιά, 2015
- [15] Χρήστος Πολυζωίδης, *OPVs* (Οργανικά Φωτοβολταϊκά), <http://chpolyz.blogspot.gr/2013/02/opvs.html>
- [16] Neeraj Dwivedi, Sushil Kumar, Atul Bisht, Kamlesh Patel, S. Sudhakar, “Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT solar cells to achieve ~27% efficiency”, Volume 88, February 2013, p.31–41

- [17] Χρίστος Κοϊδης, ‘Ανάπτυξη λεπτών υμενίων ZnO σε πολυμερικά υποστρώματα και χαρακτηρισμός, για εφαρμογές σε εύκαμπτες ηλεκτρονικές διατάξεις’, Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2007
- [18] C. Ferrari, F. Melino, M. Pinelli, P. R. Spina, M. Venturini “Overview and Status of Thermophotovoltaic Systems”, Energy Procedia 45 (2014) p.160 – 169
- [19] Τσουκαλάς Δ., Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος ‘Εργαστηριακές Τεχνικές για Νανουλικά’, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών ‘Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις’, ΕΜΠ
- [20] Sethi V.K., Pandey M., Shukla P., “Use of Nanotechnology in Solar PV Cell”, International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 2, No. 2, April 2011
- [21] Gavin Conibeer, Arthur Willoughby, “Solar Cells Materials Developing Technologies”, John Wiley & Sons Ltd, 2014
- [22] Konrad Mertens, “PHOTOVOLTAICS FUNDAMENTALS, TECHNOLOGY AND PRACTICE”, John Wiley & Sons Ltd, 2014
- [23] A. McEvoy, L. Castaner, T. Markvart “Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation”, Elsevier Ltd, 2013
- [24] Μπίνας Δ., Σημειώσεις μαθήματος ‘Ηλεκτρονική Μικροσκοπία’, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης
- [25] Nie Hong Bin, “Magnetic anisotropy and microstructure of nanocrystalline soft iron-based thin films”, PhD Thesis, National University of Singapore, 2003
- [26] Τσιτσιπής Παναγιώτης, Σημειώσεις μαθήματος ‘Ηλεκτρονική Φυσική’, ΤΕΙ Λαμίας, 2006
- [27] Donald M. Mattox, “Ion plating - past, present and future”, Surface and Coatings Technology 133-134 (2000) p.517-521
- [28] Παππάς Σ., ‘Παρασκευή με τη μέθοδο *sputtering*, χαρακτηρισμός και ιδιότητες λεπτών μαγνητικών υμενίων τεχνολογικού ενδιαφέροντος’, Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2008
- [29] D.B. Chrisey and G.K. Hubler, Pulsed Laser Deposition of Thin Film, John Wiley & Sons Ltd, 1994
- [30] Ψυλλάκη Πανδώρα, Εργαστηριακές σημειώσεις ‘ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ - ΕΝΟΤΗΤΑ Α: ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ’, Τμήμα Μηχανολογίας, ΤΕΙ Πειραιά
- [31] Compaan A.D., Matulionis I., Nakade S., “Laser scribing of polycrystalline thin films”, Optics and Lasers in Engineering 34 (2000) p.15-45
- [32] A. Burna, M. Muralta, S. Pilza, V. Romano, R. Witteb, B. Freib, S. Buecheler, S. Nishiwaki, L. Krainer, “All fiber laser scribing of $Cu(In, Ga)Se_2$ thin-film solar modules”, Physics Procedia 41 (2013) p.713 – 722
- [33] Μπινώλη Μ., ‘Προσομοίωση λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου και έλεγχος απόδοσης του’, Διπλωματική Εργασία, Ξάνθη, 2010
- [34] Παπαδόκης Δ., ‘ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ’, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2010

- [35] Φ. Ρουμπάνη-Καλαντζοπούλου, Μ. Κομπίτσας, «ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ *LASER* ΣΤΗ ΧΗΜΕΙΑ», Αθήνα, 2005
- [36] Paulius Gecys, Gediminas Raciukaitis, Eimantas Miltenis, Alexander Braumb, Steffen Ragnow, “Scribing of Thin-film Solar Cells with Picosecond Laser Pulses”, *Physics Procedia* 12 (2011) p.141–148
- [37] Συμεωνίδης Κ., ‘Ανάπτυξη διμεταλλικών μαγνητικών νανοσωματιδίων με διαμορφούμενη μαγνητική συμπεριφορά’, Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη, 2009
- [38] R.S. Adrain, J Watson, “Laser microspectral analysis: a review of principles and applications”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 17, Number 10, 1984
- [39] “Current technology of beam profile measurement”, Carlos B. Roundy.
- [40] “Innovate laser materials processing for Photovoltaics”, Oliver Homburg, Paul Harten, Wiley – VCH GmbH & KGaA, Weinheim, 2009
- [41] P. Gecys, G. Raclukaltis, M. Ehrhardt, K. Zimmer, M. Gedvilas, “ps-laser scribing of CIGS films at different wavelengths”, 2010, p.101:373-378
- [42] A. Lemkea, D. Ashkenasia, H.J. Eichlerb, “Picosecond laser induced selective removal of functional layers on CIGS thin film solar cells”, *Physics Procedia* 41 (2013) p.769 – 775