

σύγχρονη

20ος χρόνος
κυκλοφορίας

τεύχος 238 • Μάρτιος 2012

ΤΕΧΝΙΚΗ

ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ

electrical



Ερευνα & Τεχνολογία

Φ/Β στοιχείαν λεπτών
υμενίων σε βάση χαλκοκυρίτη

ΠΑΡΟΜΟΝΟ
ΤΕΛΟΣ
τακ. τμήμα
ΚΕΜΕΤ ΑΦ
Αριθμός Λόγου
Σ216



Καρνιάδου 20, 163 46 Ηλιούπολη

Μετασηματιστές πολύ
χαμηλών απωλειών

Δρόμος για ένα ξεχωριστό
δίκτυο ρεύματος

Σύστημα
ασφαλούς ανύψωσης

Έρευνα και Τεχνολογία Φ/Β στοιχείων λεπτών υμενίων σε βάση χαλκοκυρίτη

Εναλλακτικές τεχνολογίες ανάπτυξης Φ/Β στοιχείων

Η σημερινή αγορά φωτοβολταϊκών (Φ/Β) στοιχείων κυριαρχείται κυρίως από την τεχνολογία πυριτίου (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, άμορφο ή συνδυασμός τους). Η περαιτέρω αύξηση της απόδοσής τους (σήμερα 20 – 25%) συναντά σημαντικά εμπόδια, τόσο στην ανάπτυξη των υλικών, όσο και στην παραγωγή των πηλασιών τους, λόγω της δυσκολίας επεξεργασίας του υλικού μέχρι το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα.

Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν τους ερευνητές σε αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών ανάπτυξης φωτοβολταϊκών στοιχείων, που να επιδιώκουν μείωση του πάχους των Φ/Β πηλασιών και συνεπώς του συνολικού βάρους της κατασκευής, καθώς και του κόστους παραγωγής τους. Αυτές τις προδιαγραφές μπόρεσαν να επιτευχθούν με στροφή της τεχνολογίας στη χρήση των Λεπτών Υμενίων.

Οι νέες τεχνολογίες βασίζονται σήμερα σε λεπτά υμενία ημιαγωγικών χαλκοκυριτών με καλή απορρόφηση του ηλιακού φάσματος (Σχήμα 1) και πάχους της τάξης μερικών μικρών ($1\mu = 10^{-3}$ mm). Οι χαλκοκυρίτες είναι σύνθετες ενώσεις χαλκού Cu,

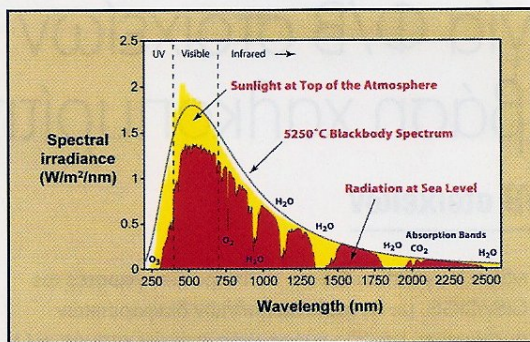
ινδίου In, γαλλίου Ga και σεληνίου Se, γνωστές ως CIS/CIGS, με δυνατότητα πολλών διαφορετικών συστάσεων, μεγάλο εύρος ενεργειακών χασμάτων (1 – 1,7 eV) και βαθμό απόδοσης στοιχείου ~ 20% [1] και πάνελ ~ 13% [2].

Ένα τέτοιο φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει τη δομή Mo/CIGS/B/ZnO/AZO, όπου Mo: υμένιο μολυβδαινίου, ως οπίσθια ηλεκτρική επαφή – ανακλαστήρας, CIGS: απορροφητής – ενεργή περιοχή Φ/Β στοιχείου, B: μεταβατικό στρώμα (π.χ. ZnSe), ZnO: λεπτό υμένιο διαφανούς αγωγίμου οξειδίου, διαπερατού από την ηλιακή ακτινοβολία, AZO (Al-doped ZnO): εμπρόσθια ηλεκτρική επαφή. (Σχήμα 2). Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας των λεπτών υμενίων είναι η επίτευξη της ηλεκτρικής διασύνδεσης των Φ/Β στοιχείων, μέσω της εγχάραξης των διαφόρων στρωμάτων. Η

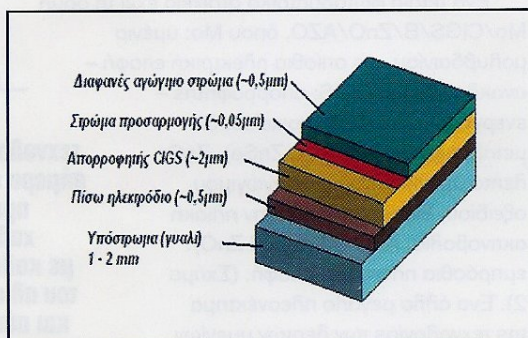
εγχάραξη των λεπτών υμενίων αποτελεί το βήμα κλειδί για τη μετάβαση από μικρές και μεμονωμένες ηλιακές

Οι νέες τεχνολογίες βασίζονται σήμερα σε λεπτά υμενία ημιαγωγικών χαλκοκυριτών με καλή απορρόφηση του ηλιακού φάσματος και πάχους της τάξης μερικών μικρών ($1\mu = 10^{-3}$ mm).





Σχήμα 1: Το φάσμα του ηλιακού φωτός.



Σχήμα 2: Τυπική σχηματική παράσταση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου λεπτών υμενίων χαλκοκυρίτη.

Η εναπόθεση του λεπτού υμενίου από μολυβδαίνιο έγινε με την τεχνική της εναπόθεσης με παλμικό laser υπό συνθήκες κενού. Είναι μία τεχνική που επιτρέπει την εναπόθεση σχεδόν κάθε υλικού πάνω σε επιλεγμένο υπόστρωμα.

κυψέλες, στη μονοηλεκτρική τους ολοκλήρωση σε μεγάλης επιφάνειας φωτοβολταϊκά πλαίσια. Με βάση το Σχ. 2 ακολουθεί η παρουσίαση της πρόσφατης δραστηριότητας του Εργαστηρίου Τεχνικών και Εφαρμογών Laser του ΕΙΕ σε συνεργασία με τον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την ανάπτυξη ενός εργαστηριακού πρωτοτύπου μονοηλεκτρικού Φ/Β στοιχείου λεπτών υμενίων. Οι ελληνικές ομάδες βρίσκονται σε στενή συνεργασία και με τα Πανεπιστήμια Tokat και Trapzon της Τουρκίας, όπου αναπτύχθηκαν οι απορροφητές CIGS.

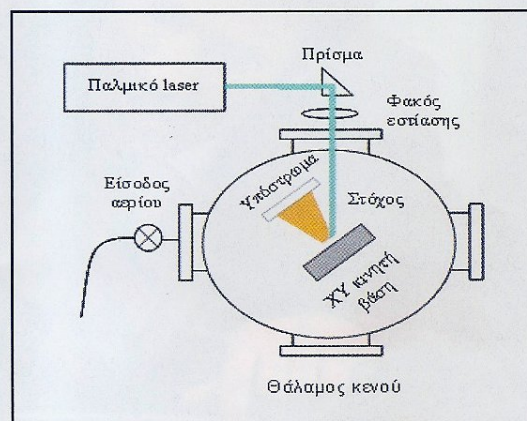
Εναπόθεση οπίσθιας ηλεκτρικής επαφής από μολυβδαίνιο (Mo)

Το πίσω ηλεκτρόδιο αποτελείται από μολυβδαίνιο (Mo), παρά τη χαμηλή ανακλαστικότητα που παρουσιάζει λόγω του σκούρου του χρώματος. Η επιλογή του βασίζεται σε απαιτήσεις που επιβάλλονται

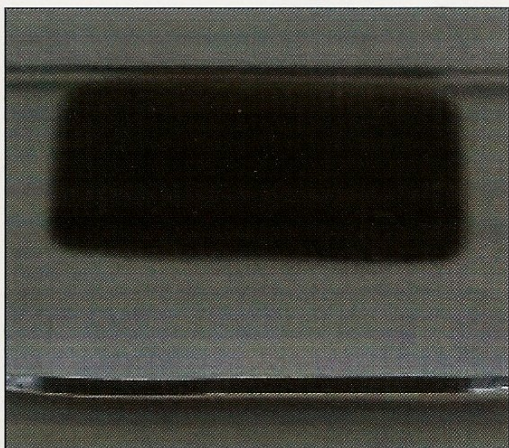
από τη διεργασία και αφορά κατασκευαστικούς λόγους. Το Mo παρουσιάζει σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω του μεγάλου σημείου τήξεώς του (2896 K) και είναι ανθεκτικό στις συνθήκες πρσσκευής του CIGS οι οποίες είναι ιδιαίτερα διαβρωτικές (π.χ. Χημική Εναπόθεση Ατμών – CVD) [3,4]. Επιπλέον, το Mo ενώνεται με το σεληνίο (Se), δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα MoSe₂, το οποίο παρουσιάζει μικρή ηλεκτρική αντίσταση (~13.7 μΩcm), η οποία απαιτείται για να επιτυγχάνεται μεταφορά του ηλ. ρεύματος.

Η εναπόθεση του λεπτού υμενίου από μολυβδαίνιο έγινε με την τεχνική της εναπόθεσης με παλμικό laser υπό συνθήκες κενού (pulsed laser deposition – PLD). Είναι μία τεχνική που επιτρέπει την εναπόθεση σχεδόν κάθε υλικού πάνω σε επιλεγμένο υπόστρωμα (γυαλί, πυρίτιο, πολυμερές κλπ). Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν ως υποστρώματα γυαλί μικροσκοπίου και πολυμερές (PET) σε διάφορες θερμοκρασίες. Ένα Nd:YAG laser (στα 355 nm, με 10 nsec διάρκεια παλμού) εστιάζεται πάνω σε ένα έλασμα από Mo (στόχος) μέσα σε θάλαμο κενού (5 x 10⁻⁶ mbar). Ο στόχος εξαερούται και το υλικό εναποτίθεται στο υπόστρωμα. (βλ. εικ. 1) Με τις επιλεγμένες συνθήκες της εναπόθεσης, το λεπτό υμενίο Mo είχε πολύ καλή πρόσφυση και στα δύο υποστρώματα.

Ο στόχος του Mo τοποθετήθηκε πάνω σε κινητή βάση που εκτελεί κινήσεις κατά XY με την βοήθεια δύο βηματικών κινητήρων που προγραμματίζονται από ένα Η/Υ. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η διάτρηση του στόχου και η καταστροφή του. Επιπλέον είναι δυνατή η τοποθέτηση περισσότερων του ενός στόχων και με την κατάλληλη επιλογή τους επιτυγχάνεται εναπόθεση περισσότερων του ενός λεπτού υμενίου διαδοχικά με διαφορετική κάθε φορά σύνθεση και επομένως ιδιότητες.



Σχήμα 3: Σχηματική παράσταση της τεχνικής PLD



Εικόνα 1: Λεπτό υμένιο μολυβδανίου σε υπόστρωμα γυαλιού.

Εναπόθεση απορροφητή CIGS/μεταβατικού στρώματος ZnSe

Όσον αφορά τον απορροφητή, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα τετραμερές υλικό, το οποίο αποτελείται από στοιχεία των ομάδων I, III και IV του περιοδικού πίνακα. Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή στην Φ/Β τεχνολογία, κυρίως λόγω των μεγάλων συντελεστών απορρόφησης (high optical absorption coefficients) και των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών [5]. Επιπρόσθετα, ένα πλεονέκτημα των απορροφητών αυτής της κατηγορίας είναι η μη τοξικότητα, σε αντίθεση με το ανταγωνιστικό CdTe που το καθιστά και μη αποδεκτό.

Τα λεπτά υμένια CIGS, κατασκευάστηκαν στην Τουρκία με τη μέθοδο της Εξάχνωσης με Δέσμη Ηλεκτρονίων (e-beam evaporation), σε διάφορες περιεκτικότητες, ώστε να εξευρεθεί η βέλτιστη στοιχειομετρία και υποβλήθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης, για να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι ιδιότητες των υμενίων κάθε φορά. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν οπτικές μετρήσεις, για να υπολογιστεί το ενεργειακό χάσμα, ενώ παράλληλα μελετήθηκε η κρυσταλλικότητα με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD) και η μορφολογία της επιφάνειας τους με Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης (AFM).

Η απορρόφηση των υμενίων CIGS καταγράφηκε στην φασματική περιοχή 1300–300 nm και προέκυψε το διάγραμμα του σχήματος 4 (Tauc plot). Από το

διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι το ενεργειακό χάσμα είναι στην περιοχή 1.1–1.2 eV, ανάλογα με την θερμοκρασία ανόπτησης. Επομένως, το υμένιο CIGS απορροφά για μήκη κύματος $\lambda < 1100$ nm, δηλαδή το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1, γεγονός που αυξάνει το βαθμό απόδοσης του Φ/Β στοιχείου [6].

Όσον αφορά στη μορφολογία της επιφάνειας των λεπτών υμενίων, διαπιστώθηκε ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης, αυξάνεται αισθητά και η τραχύτητα (Σχήμα 5). Το γεγονός αυτό είναι επιθυμητό, καθότι (α) καθιστά ευκολότερη και με καλύτερη πρόσφυση την εναπόθεση του επόμενου στρώματος και (β) αυξάνεται η σκέδαση του φωτός και, επομένως, η απορρόφηση. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης, τα λεπτά υμένια που παρουσιάζαν λιγότερες ραγμές ήταν και περισσότερο ομογενή.

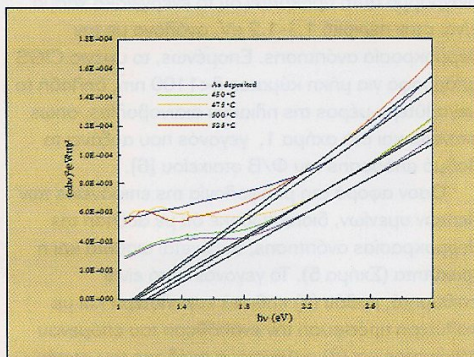
Τέλος, η καταγραφή φασμάτων περίθλασης (XRD) έδειξε ότι τα υμένια που αναπτύχθηκαν, έχουν κρυσταλλική και όχι άμορφη δομή και επιπλέον διαπιστώθηκε ότι η κρυσταλλικότητα αυξάνει με την θερμοκρασία ανόπτησης.

Τα λεπτά υμένια CIGS, κατασκευάστηκαν στην Τουρκία με τη μέθοδο της Εξάχνωσης με Δέσμη Ηλεκτρονίων, ώστε να εξευρεθεί η βέλτιστη στοιχειομετρία και υποβλήθηκαν σε διαφορετικές θερμοκρασίες ανόπτησης.

Εναπόθεση εμπρόσθιας ηλεκτρικής επαφής ZnO, AZO και IZO

Το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO επιλέχτηκε στην Φ/Β τεχνολογία για να αντικαταστήσει το υλικό ITO (90% In₂O₃ + 10% SnO₂) το οποίο είναι πολύ ακριβό λόγω της σπανιότητας του ινδίου. Το ZnO είναι ημιαγωγός τύπου n (οι φορείς ηλεκτρισμού είναι ηλεκτρόνια), μη τοξικό, σταθερό, έχει σχετικά καλή αγωγιμότητα και είναι διαπερατό στο ηλιακό φως στην περιοχή του ορατού και κοντινού υπεριώδους (για $\lambda > 375$ nm, βλ. φάσμα εκπομπής ηλιακού φωτός, σχήμα 1).





Σχήμα 4: Διάγραμμα Tauc για τον προσδιορισμό του ενεργειακού χάσματος των υμενίων CIGS.

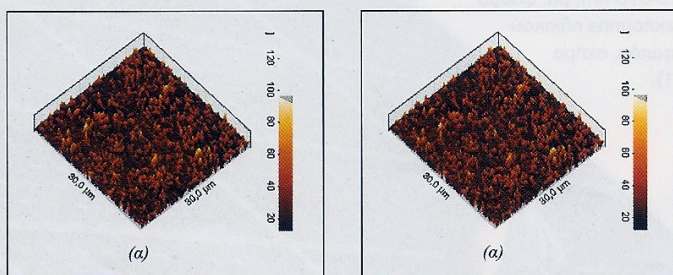
Η αγωγιμότητα του ZnO μπορεί να βελτιωθεί με εμφύτευση εξωτερικών προσμίξεων με άτομα της 3ης ομάδας του περιοδικού συστήματος (Al, Ga, In). Η συγκέντρωση και το είδος της πρόσμιξης, εκτός από την ηλεκτρική αγωγιμότητα καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την διαπερατότητα, την δομή και την μορφολογία της επιφάνειας του ZnO. Στο Σχ. 6 παρουσιάζεται μια καινοτόμος τεχνική που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο του ΕΙΕ το 2006 και επιτρέπει το έλεγχο της συγκέντρωσης της εξωτερικής πρόσμιξης κατά την διάρκεια της εναπόθεσης του ZnO. Η εναπόθεση έγινε πάνω σε εύκαμπτο υπόστρωμα PET [7]. Ο χρονισμός των δύο συστημάτων laser ελέγχεται εξωτερικά με την βοήθεια μίας γεννήτριας παλμών 10 Hz. Συγκεκριμένα, δέσμη 1 προέρχεται από ένα excimer laser (240 nm, 10 nsec) σταθερής ισχύος και χρησιμοποιείται για την εναπόθεση του υμενίου ZnO. Η δέσμη 2 προέρχεται από ένα Nd:YAG laser και χρησιμοποιείται για την εναπόθεση της πρόσμιξης. Η ισχύς της δέσμης 2 καθορίζει την συγκέντρωση του πρόσμιξης μέσα στο πλέγμα του ZnO. Παλαιότερες μετρήσεις [8] έδειξαν

ότι υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ της ισχύος της δέσμης 2 και της συγκέντρωσης του Al μέσα στο πλέγμα του ZnO (AZO).

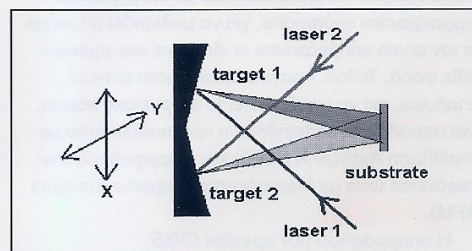
Στη φωτογραφία της εικόνας 2 φαίνεται η περιοχή του πλάσματος που προέρχεται από τους δύο στόχους. Η σκιά στο κέντρο οφείλεται σε σωλήνα, ο οποίος εισάγει αέριο οξυγόνο στην περιοχή του πλάσματος. Το οξυγόνο είναι απαραίτητο για την οξείδωση των σωματιδίων Zn και Al και την εναπόθεση του υμενίου AZO στο υπόστρωμα. Τυπικές τιμές της πίεσης (δυναμική πίεση) του οξυγόνου είναι 10-30 Pa. Με ανάλογο τρόπο γίνεται και η ανάπτυξη του υμενίου με εμφύτευση ινδίου (IZO). Τα ποσοστά των προσμίξεων είναι μερικά %.

Στό σχήμα 7 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων διαπερατότητας των υμενίων ZnO, AZO και IZO. Το υμένιο ZnO έχει μία μέση διαπερατότητα ~95%. Η απότομη ελάττωση στην περιοχή για μήκη κύματος $\lambda < 380$ nm οφείλεται στην απορρόφηση του ZnO. Η εμφύτευση ινδίου έχει ως αποτέλεσμα την δραστηκή ελάττωση της μέσης διαπερατότητας σε ποσοστά 30-40%. Αναφορικά με τα υμένια AZO, το δείγμα που αναπτύχθηκε με φωτεινή ροή 0.7 J/cm² έχει την μεγαλύτερη διαπερατότητα ~90%.

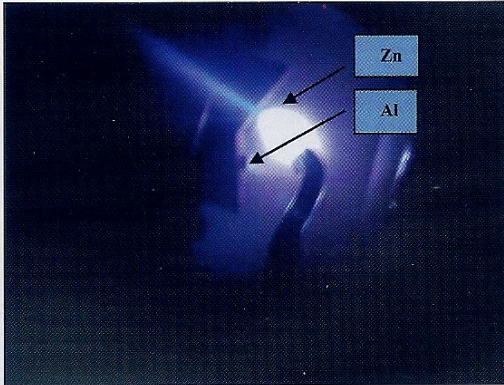
Στόν πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες των δειγμάτων. Όπως φαίνεται, το δείγμα AZO με την μεγαλύτερη διαπερατότητα παρουσιάζει και την μικρότερη ηλεκτρική αντίσταση όλων. Επιπλέον, το ενεργειακό του χάσμα έχει την μεγαλύτερη τιμή 3.52 eV. Αυτό σημαίνει ότι η διαπερατότητα του αυξάνεται στην περιοχή του κοντινού υπεριώδους. Στην Φ/Β τεχνολογία, ο δείκτης καταλληλότητας (Figure of Merit) ορίζεται ως ο λόγος της μέσης διαπερατότητας T προς την ειδική αντίσταση του υλικού ρ: $F = T/\rho$. Συμπερασματικά, το υμένιο AZO που εναποτέθηκε με 0.7 J/cm² είναι το πλέον κατάλληλο για τους σκοπούς αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.



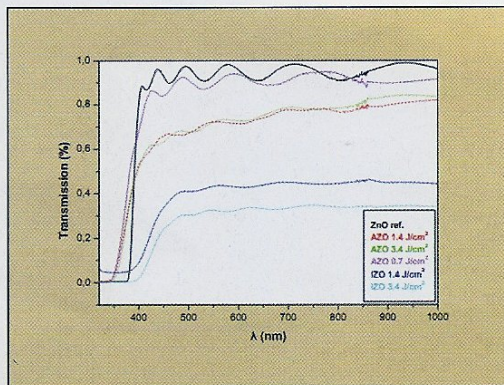
Σχήμα 5: Η τρισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας των λεπκών υμενίων CIGS (α) χωρίς ανόπτηση και (β) με ανόπτηση στους 525 °C.



Σχήμα 6: Τεχνική εναπόθεσης ZnO με χρήση δύο δέσμων laser και δύο στόχων για την ελεγχόμενη εμφύτευση εξωτερικών προσμίξεων.



Εικόνα 2: Κάτση της περιοχής αποδόμησης των δύο στόχων. Η έντονη εκπομπή είναι το πλάσμα του στόχου Zn. Η μαύρη σκιά στο μέσον είναι ο χάλκινος σωλήνας εισόδου του αερίου οξυγόνου στην περιοχή του πλάσματος.



Σχήμα 7: Διαπερατότητα των υμενίων ZnO, Al:ZnO και In:ZnO με διαφορετικά ποσοστά της πρόσμιξης Al και In.

Εγχάραξη με laser

Για τη μετάβαση από ένα απλό Φ/Β στοιχείο (cell) σε Φ/Β πηλαιο (module), τα διάφορα στρώματα μονώνονται και συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρικά, με κανάλια (scribes), τα οποία επιτυγχάνονται με αφαίρεση του υλικού με χρήση laser (laser scribing). Η διαδικασία περιλαμβάνει την έκθεση των διαφόρων στρωμάτων των ηλεπών υμενίων του Φ/Β πηλαιού σε εστιασμένη δέσμη laser, η οποία αποδομεί το υλικό με μεγάλη ακρίβεια και δίνει την δυνατότητα για πολύ μικρού πλάτους κανάλια με τυπικό πλάτος καναλιού 50-60 μm. Η πρόκληση είναι η επίτευξη της ηλεκτρικής διασύνδεσης των Φ/Β στοιχείων με τη μικρότερη δυνατή απώλεια υλικού, ενώ ένα επιπλέον πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι το βήμα αυτό δεν θα γίνεται έπειτα από την ολοκλήρωση της

διαδικασίας κατασκευής των μεμονωμένων Φ/Β στοιχείων, όπως γίνεται στις συμβατικές κατασκευές πυριτίου, όπου η εν σειρά διασύνδεση των στοιχείων γίνεται με μικρο-ηλεκτροσυγκόλληση, αλλά θα εντάσσεται στα πλαίσια της διαδικασίας παραγωγής.

Η σειριακή διασύνδεση των στοιχείων ενός φωτοβολητικού πηλαιού φαίνεται στο σχήμα 8.

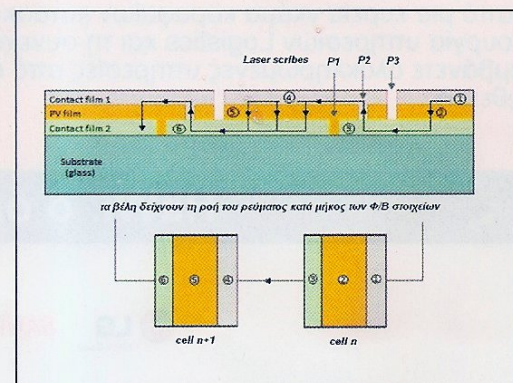
όπου τα κανάλια εξυπηρετούν τις παρακάτω λειτουργίες:

- P1: χωρίζει τα Φ/Β στοιχεία στο πίσω ηλεκτρόδιο.
- P2: πραγματοποιεί τη σύνδεση με το πρόσθιο ηλεκτρόδιο και καθοδηγεί τη ροή του ρεύματος από το ένα στοιχείο στο άλλο, ενώνοντάς τα
- P3: κόβει το πρόσθιο ηλεκτρόδιο και μονώνει από πάνω το στοιχείο, ενώ ολοκληρώνει την διασύνδεση των στοιχείων του Φ/Β πηλαιού.

Τα ηλεπτά υμενία του Mo υποβλήθηκαν στη διεργασία της μικρο-εγχάραξης με laser, με υπερϊώδη ακτινοβολία παλμικού laser Nd:YAG (355 nm, 10 nsec διάρκεια παλμού) με τη διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 9: Η απόσταση του εστιακού φακού από το υμένιο είναι καθοριστική για την επίτευξη καναλιού με το επιθυμητό πλάτος.

Αυτό επιτυγχάνεται on-line με την βοήθεια μιας τεχνικής που ονομάζεται φασματοσκοπία πλάσματος επαγομένου από Laser (LIPS- Laser Induced Plasma Spectroscopy) [9]. Μια οπτική ίνα καταγράφει την εκπομπή του πλάσματος μολυβδαινίου, η οποία μεγιστοποιείται, για δεδομένη ενέργεια παλμού laser, όταν το ηλεπτό υμένιο ευρίσκεται στην εστία του φακού. Με την τεχνική αυτή, το κανάλι από την εγχάραξη του ηλεπτού υμενίου που μετρήθηκε σε οπτικό μικροσκόπιο με πηλαιο 47 μm περίπου, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.

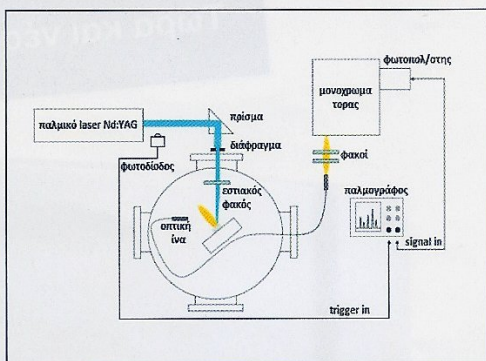
Με την βοήθεια Μικροσκοπίας Ατομικής Δύναμης,



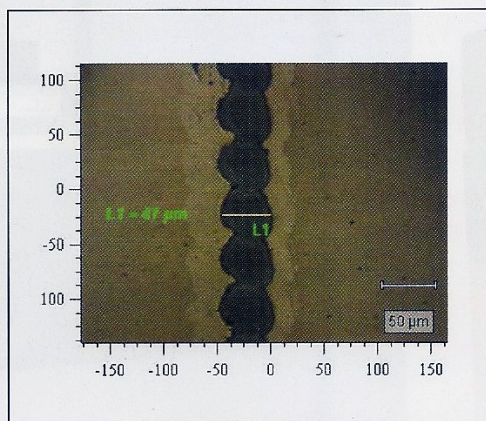
Σχήμα 8: Η εν σειρά διασύνδεση των στοιχείων ενός Φ/Β πηλαιού.

Πίνακας 1.

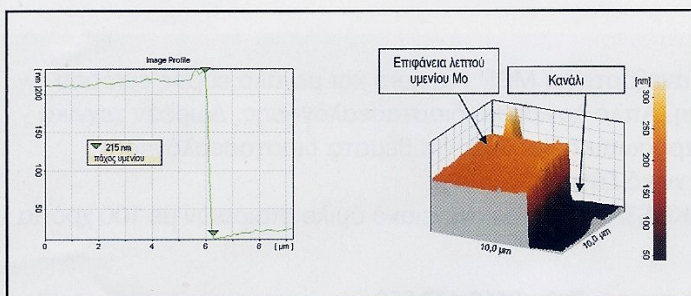
Sample	$F_{\text{ass. om.}}$ (J/cm^2)	Thickness (μm)	Resistivity (Ωcm)	Optical gap (eV)
ZnO (ref.)	—	775 \pm 10	2×10^3	3.22
AZO	3.4	726	1.9×10^2	3.43
AZO	1.4	625	0.17	3.43
AZO	0.7	600	0.11	3.52
IZO	3.4	—	5.5×10^2	2.97
IZO	1.4	—	2	2.94



Σχήμα 9: Σχηματική παράσταση διάταξης μικρο-εγχάραξης λεπτών υμενίων.



Εικόνα 3: Εγχάραξη λεπτού υμενίου Mo.



Εικόνα 4: Τρισδιάστατη απεικόνιση και προφίλ μικρο-κοπής λεπτού υμενίου μολυβδανίου.

ελέγχθηκε το προφίλ του καναλιού μικροεγχάραξης. Όπως φαίνεται στις εικόνες 4α (δύο διαστάσεις) και 4β (τρεις διαστάσεις), η τομή είναι σχεδόν κάθετη για ένα λεπτό υμένιο Mo πάχους 215 nm. Επομένως, οι πειραματικές συνθήκες που επιλέχθηκαν οδηγούν σε τομές κατάλληλες για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Συμπεράσματα

Η μέχρι τώρα δραστηριότητα αφορούσε την εναπόθεση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων για κάθε ένα από τα λεπτά υμένια χωριστά, που αποτελούν ένα ολοκληρωμένο Φ/Β στοιχείο. Παράλληλα, έγινε συστηματική μελέτη για την εγχάραξη P1 του Mo και τα αποτελέσματα απεδείχθησαν πολύ ικανοποιητικά. Ήδη έχει ξεκινήσει η εγχάραξη των απορροφητών CIGS τύπου P2 και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων για την επάλληλη εναπόθεση της εμπρόσθιας επαφής ZnO/AZO με την τεχνική PLD.

Βιβλιογραφία

- [1]: I. Repins, M. Conteras, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, Cl. Perkins, Prog. Photovoltaics Res. Appl 16 (2008) 235.
- [2]: M. Powalla, Proceedings of the 21th European photovoltaic solar energy conference, 2006, p. 1789-95.
- [3]: A.D. Compaan, I. Matulionis and S. Nakade, Opt. Las. Eng (2000) 3415.
- [4]: D.R Lide (Ed.), Handbook of Chemistry and Physics 73th edition, CRC Press (1993).
- [5]: I. El. Chaar et al., Renewable and Sustainable Energy Review 15 (2011) 2465.
- [6]: S. Fiat, P. Koralli, I. Polat, E. Bacaksiz, D. Manolakos, G. Cankaya, M. Kompitsas, 28th International Physics Conference, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.
- [7]: M. Girtan, M. Kompitsas, R. Mallet and I. Fasaki, Eur. J. Appl. Phys. 51 (2010) 33212.
- [8]: E. György, J. Santiso, A. Giannoudakos, M. Kompitsas, I.N. Mihailescu, D. Pantelica, Appl. Surf. Science 248 (2005) 147.
- [9]: I. Bassiotis, A. Diamantopoulou, A. Giannoudakos, F. Roubani-Kalantzopoulou, M. Kompitsas, Spectrochimica Acta Part B 56 (2001) 671.

Συγγραφείς: Π. Κοράληνη, Δ.Ε. Μανωλάκος, ΕΜΠ/Σχ. Μηχ. Μηχανικών, Αθήνα
 Μ. Κομπίτσας, Εθνικό Ίδρυμα Έρευνών, Αθήνα.
 S. Fiat, University of Tokat, Turkey,
 E. Bacaksiz, University of Trapzon, Turkey.