

RENEWABLE ENERGY

M A G A Z I N E

Τεύχος 2^ο | ΙΟΥΛΙΟΣ - ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2012
www.renewable-energy.gr

Αφιέρωμα Αιολικά

Αιγαία Ζεύξη: στην κατεύθυνση του 20-20-20

Καβείρια: το πρώτο θαλάσσιο πάρκο στην Ελλάδα

■ Φωτοβολταϊκά στις στέγες, συμφέρουν και με τις νέες μειωμένες τιμές

■ Συμπαράγωγή με αεριοποίηση βιομάζας

■ Μικρά Υδροηλεκτρικά: μπορούν να συμβάλλουν στην οικονομική ανάπτυξη



PARALOS
ENGINEERING S.A.

« Έργα ΑΠΕ με το κλειδί στο χέρι »

(σελ. 12)



Παραδοσιακή



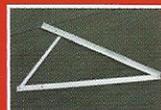
Βιομηχανικές στέγες



Δώματα



Πάρκα



Προσαναρμολογημένα εξαρτήματα



Πλήρης γκάμα υποστηρικτικών υλικών



fischer

innovative solutions

ολοκληρωμένη λύση στη στερέωση φωτοβολταϊκών

Επισκεφθείτε το
www.fischer.gr



Φ/Β στοιχεία λεπτών υμενίων

Ανόργανα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτών υμενίων σε βάση χαλκοκυρίτη με υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος

Παρουσιάζεται η τεχνολογία μιας νέας γενιάς φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων από ανόργανα υλικά, που στοχεύει στην αύξηση της απόδοσης και το μικρότερο κόστος.

Των

Π. Κοράλη (φωτο), υποψηφίας διδάκτορος Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ
Δ.Ε. Μανωλάκου, καθηγήτη Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ
Μ. Κομπίτσα, κύριου ερευνητή Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών

Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) λεπτών υμενίων

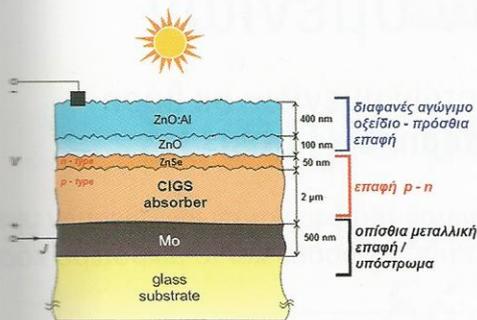
Η σημερινή αγορά Φ/Β στοιχείων κυριαρχείται κυρίως από την τεχνολογία πυριτίου (*μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό, άμορφο ή συνδυασμός τους*). Η επιπλέον αύξηση της απόδοσής τους, που κυμαίνεται μεταξύ 20 – 25%, συναντά σημαντικά εμπόδια, τα οποία οφείλονται

τόσο στην τεχνολογία των υλικών, όσο και στην παραγωγή των πλαισίων τους, εξαιτίας της δυσκολίας επεξεργασίας του υλικού μέχρι το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα.

Οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν τους ερευνητές σε αναζήτηση εναλλακτικών τεχνολογιών ανάπτυξης Φ/Β στοιχείων, με στόχο τη μείωση του πάχους των Φ/Β πλαισίων και συνεπώς του συνολικού βάρους της

κατασκευής, καθώς και του κόστους παραγωγής τους. Αυτές οι προδιαγραφές μπόρεσαν να επιτευχθούν με στροφή της τεχνολογίας στη χρήση των Λεπτών Υμενίων. Η χρήση των λεπτών υμενίων οδήγησε σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης των υλικών παρασκευής, διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών κατά την παραγωγή και δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων Φ/Β πλαισίων.





Σχήμα 1: Τυπική σχηματική παράσταση ενός φωτοβοληταϊκού στοιχείου λεπτών υμενίων χαλκοκυρίτη

- **ZnO:** λεπτό υμένιο διαφανούς αγώγιμου οξειδίου, διαπερατού από την ηλιακή ακτινοβολία,
- **AZO (Al-doped ZnO):** εμπρόσθια ηλεκτρική επαφή.

Το Εργαστήριο Τεχνικών και Εφαρμογών Laser του ΕΙΕ και ο Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ συνεργάζονται για την κατασκευή ενός μονολιθικά ολοκληρωμένου φωτοβοληταϊκού ηλιασίου μικρής κλίμακας με βάση απορροφητή χαλκοκυρίτη, με εφαρμογή της τεχνολογίας της μικρο-εγχάραξης με laser, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

Οι ελληνικές ομάδες βρίσκονται σε στενή συνεργασία και με τα Πανεπιστήμια Tokat και Trarzon της Τουρκίας, όπου αναπτύσσονται οι απορροφητές CIGS.

Εναπόθεση οπίσθιας και πρόσθιας ηλεκτρικής επαφής από μολυβδαίνιο (Mo) και οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) αντίστοιχα

Το πίσω ηλεκτρόδιο αποτελείται από μολυβδαίνιο (Mo), παρά τη χαμηλή ανακλαστικότητα που παρουσιάζει λόγω του σκούρου του χρώματος. Η επιλογή του εν λόγω υλικού βασίζεται σε απαιτήσεις που επιβάλλονται από τη διεργασία και αφορούν κυρίως κατασκευαστικούς λόγους. Αφενός, το Mo ενώνεται με το σελήνιο (Se), δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα $MoSe_2$, το οποίο παρουσιάζει μικρή ηλεκτρική αντίσταση (~13.7 $\mu\Omega\text{cm}$) που απαιτείται για τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, αφετέρου, το υλικό παρουσιάζει σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες λόγω του μεγάλου σημείου τήξεώς του (2896 K) και είναι ανθεκτικό στις συνθήκες παρασκευής του CIGS, οι οποίες είναι ιδιαίτερα διαβρωτικές (π.χ. Χημική Εναπόθεση Ατμών - CVD) [3,4].

Το οξείδιο του ψευδαργύρου ZnO επιλέχτηκε στη Φ/Β τεχνολογία για να αντικαταστήσει το υλικό ITO (90% In_2O_3 + 10% SnO_2), το οποίο είναι πολύ ακριβό λόγω της σπανιότητας του ινδίου. Το ZnO είναι ημιαγωγός τύπου n, μη τοξικό, σταθερό, έχει σχετικά καλή αγωγιμότητα και είναι διαπερατό στο ηλιακό φως στην πε-

ριοχή του ορατού και κοντινού υπεριώδους (για $\lambda > 375 \text{ nm}$).

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 τη διαπερατότητα, τη δομή και τη μορφολογία της επιφάνειας του ZnO [5].

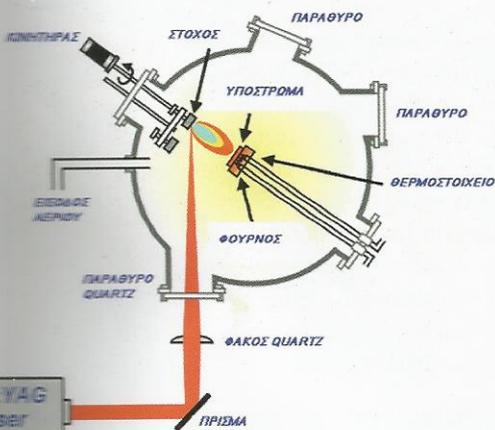
Η εναπόθεση των λεπτών υμενίων έγινε με την τεχνική της εναπόθεσης με παλμικό laser υπό συνθήκες κενού (pulsed laser deposition - PLD). Είναι μία τεχνική που επιτρέπει την εναπόθεση σχεδόν κάθε υλικού πάνω σε επιλεγμένο υπόστρωμα (γυαλί, πυρίτιο, πολυμερές κλπ). Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα για τοποθέτηση περισσότερων του ενός στόχων, με κατάλληλη επιλογή των οποίων επιτυγχάνεται εναπόθεση περισσότερων του ενός λεπτών υμενίων διαδοχικά, με διαφορετική κάθε φορά σύνθεση και επομένως ιδιότητες.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα γυαλί μικροσκοπίου και πολυμερές (PET) σε διάφορες θερμοκρασίες. Ένα Nd:YAG laser (στα 355 nm, με 10 nsec διάρκεια παλμού) εστιάζεται πάνω στο στόχο (μεταλλικό έλασμα, κεραμικό κ.λπ.) μέσα σε θάλαμο κενού ($5 \times 10^{-6} \text{ mbar}$). Ο στόχος εξαερούται και το υλικό εναποτίθεται στο υπόστρωμα. (βλ. Σχ. 2).

Με διαφοροποίηση των συνθηκών εναπόθεσης που επιλέγονται κάθε φορά, όπως η θερμοκρασία και το είδος του υποστρώματος, η ροή ενέργειας κατά μήκος της δέσμης του laser, ή η πίεση του περιβάλλοντος αερίου, δίνεται η δυνατότητα σύνθεσης λεπτών υμενίων με πολλαπλές διαφορετικές ιδιότητες, ανάλογα με την εφαρμογή που θα έχουν.

Μονολιθική ολοκλήρωση Φ/Β ηλιασίου - Εγχάραξη με laser

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 υμε-



Σχήμα 2: Σχηματική παράσταση της τεχνικής PLD

Οι νέες τεχνολογίες βασίζονται σήμερα σε λεπτά υμένια ημιαγωγικών χαλκοκυρίτων, με καλή απορρόφηση του ηλιακού φάσματος και πάχους της τάξης μερικών μικρών ($1\mu = 10^{-3} \text{ mm}$). 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 ενός στοιχείου ~20% [1] και πάνελ ~13% [2].

Ένα τέτοιου είδους φωτοβοληταϊκό στοιχείο (Σχήμα 1) έχει τη δομή Mo/CIGS/B/ZnO/AZO, όπου:

- **Mo:** υμένιο μολυβδαίνιου, ως οπίσθια ηλεκτρική επαφή - ανακλαστήρας,
- **CIGS:** απορροφητής - ημιαγωγός τύπου p (ενεργή περιοχή Φ/Β στοιχείου),
- **B:** λεπτό υμένιο ημιαγωγού τύπου n (οι φορείς ηλεκτρισμού είναι ηλεκτρόνια - π.χ. ZnSe ή ZnS),

νών αποτελεί το βήμα κλειδί για τη μετάβαση από μικρές και μεμονωμένες ηλιακές κυψέλες, στη μονολιθική τους ολοκλήρωση σε μεγάλης επιφάνειας φωτοβολταϊκά ηλιασίου.

Για τη μετάβαση από ένα απλό Φ/Β στοιχείο (cell) σε Φ/Β ηλιασίο (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 λεπτών υμενίων του Φ/Β ηλιασίου σε εστιασμένη δέσμη laser, η οποία αποδομεί το υλικό με μεγάλη ακρίβεια και δίνει τη 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 Φ/Β πυριτίου, όπου η εν σειρά διασύνδεση των στοιχείων γίνεται με μικρο-ηλεκτροσυγκόλληση, αλλά θα εντάσσεται στα ηλιασίου της διαδικασίας παραγωγής.

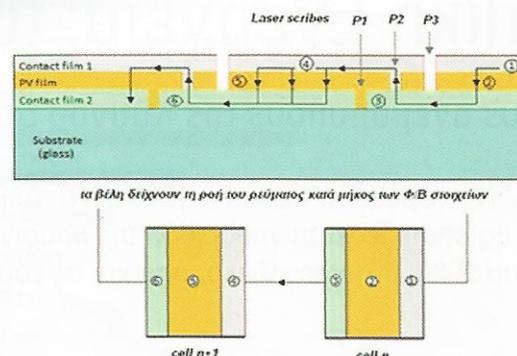
Η σειριακή διασύνδεση των στοιχείων ενός φωτοβολταϊκού ηλιασίου φαίνεται στο σχήμα 3 όπου τα κανάλια εξυπηρετούν τις παρακάτω λειτουργίες:

- **P1:** χωρίζει τα Φ/Β στοιχεία στο πίσω ηλεκτρόδιο.
- **P2:** πραγματοποιεί τη σύνδεση με το πρόσθιο ηλεκτρόδιο και καθο-

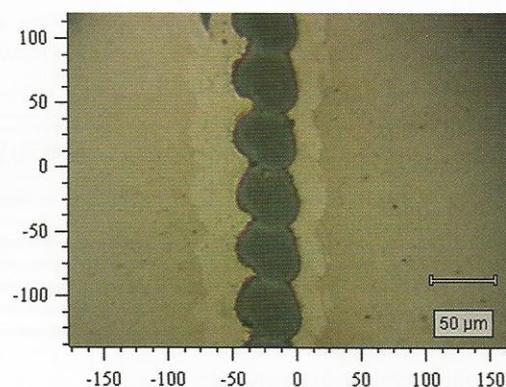
δηγεί τη ροή του ρεύματος από το ένα στοιχείο στο άλλο, ενώνοντάς τα

- **P3:** κόβει το πρόσθιο ηλεκτρόδιο και μονώνει από πάνω το στοιχείο, ενώ ολοκληρώνει τη διασύνδεση των στοιχείων του Φ/Β ηλιασίου.

Η απόσταση του εστιακού φακού από το υμένιο είναι καθοριστική για την επίτευξη καναλιού με το επιθυμητό πλάτος. Αυτό επιτυγχάνεται on-line με τη βοήθεια μιας τεχνικής που ονομάζεται φασματοσκοπία πλάσματος επαγομένου από Laser (LIPS - Laser Induced Plasma Spectroscopy) [6]. Μια οπτική ίνα καταγράφει την εκπομπή του πλάσματος, η οποία μεγιστοποιείται, για δεδομένη ενέργεια παλμού laser, όταν το λεπτό υμένιο ευρίσκεται στην εστία του φακού. Με την τεχνική αυτή, το κανάλι από την εγχάραξη του λεπτού υμενίου που μετρήθηκε σε οπτικό μικροσκόπιο με πλάτος 47 μm περίπου, παρουσιάζεται στην εικόνα 1.



Σχήμα 3: Η εν σειρά διασύνδεση των στοιχείων ενός Φ/Β ηλιασίου



Εικόνα 1: Εγχάραξη λεπτού υμενίου Mo

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:

- [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.* 34 (2000) 3415.
- [4]: D.R Lide (Ed.), *Handbook of Chemistry and Physics 73th edition*, CRC Press (1993).
- [5] M. Girtan, M. Kompitsas, R.Mallet and I.Fasaki, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 51 (2010) 33212.
- [6] I. Bassiotis, A. Diamantopoulou, A. Giannoudakos, F. Roubani-Kalantzopoulou, M. Kompitsas, *Spectrochimica Acta Part B* 56 (2001) 671.



Σύντομο βιογραφικό

Η Νάγια Κοράλλη είναι Υποψήφια Διδάκτορας του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., με επιβλέποντα Καθηγητή τον κ. Δ.Ε. Μανωλάκο και εργαστηριακός συνεργάτης σε μαθήματα προπτυχιακού επιπέδου. Συνεργάζεται με το Εργαστήριο Τεχνικών & Εφαρμογών Laser του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών στα πλαίσια της διδακτορικής της διατριβής, καθώς και με επιστημονικές ομάδες του εξωτερικού, ιδίως με Τούρκους επιστήμονες.

Από το 2010 μέχρι σήμερα έχει συμμετάσχει σε εθνικά και διεθνή επιστημονικά συνέδρια (16^ο Εθνικό Συνέδριο Ενέργειας «Ενέργεια & Ανάπτυξη 2011» - Αθήνα, 28th International Physics Conference - Bodrum Turkey, 3rd International Symposium on Transparent Conductive Materials - Crete Greece κ.λ.π.), ενώ πρόσφατα δημοσίευσε επιστημονικό άρθρο στο περιοδικό «Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση».

Το 2011 εκλέχθηκε Δημοτική Σύμβουλος Πόρου και από το 2009 μέχρι σήμερα αποτελεί μέλος του Ελληνικού Δικτύου Μικρών Νησιών.