

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εναπόθεση διαφανών αγώγιμων οξειδίων πάνω σε περοβσκιτικά ηλιακά κελιά.»

Όνομα και Επώνυμο Συγγραφέα Σοφία Αντωνοπούλου

Επιβλέπων Καθηγητής: «Νίκος Πελεκάνος»

Ηράκλειο Νοέμβριος 2023

Δήλωση Συγγραφικής Ιδιότητας

Εγώ,η Σοφία Αντωνοπούλου, δηλώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία με τίτλο, «Εναπόθεση διαφανών αγώγιμων οξειδίων πάνω σε περοβσκιτικά ηλιακά κελιά.», και η δουλειά που παρουσιάζεται σε αυτή είναι δική μου. Επιβεβαιώνω ότι:

- Αυτή η δουλειά πραγματοποιήθηκε ολοκληρωτικά ή κυρίως κατά την υποψηφιότητά μου για τον τίτλο προπτυχιακών σπουδών σε αυτό το πανεπιστήμιο.
- Όπου οποιοδήποτε μέρος αυτής της πτυχιακής εργασίας έχει προηγουμένως κατατεθεί για την απόκτηση πτυχίου ή άλλου τίτλου σε αυτό ή άλλο πανεπιστήμιο, αυτό διατυπώνεται ξεκάθαρα.
- Όπου έχω συμβουλευτεί την δημοσιευμένη δουλειά τρίτων, αυτό αποδίδεται ορθώς.
- Όπου έχω παραθέσει από δουλειά τρίτων, η πηγή δίνεται πάντα. Με εξαίρεση αυτές τις παραθέσεις, αυτή η πτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου προσωπική μου δουλειά.
- Έχω παραθέσει όλες τις κύριες πηγές βοήθειας.
- Όπου αυτή η πτυχιακή εργασία είναι βασισμένη σε συνεργατική δουλειά δική μου και τρίτων, έχω καταστήσει ξεκάθαρο ποια κομμάτια έχουν πραγματοποιηθεί από άλλους και πως συνέβαλα εγώ.

Ημερομηνία: 30 Οκτωβρίου 2023

Υπογραφή: Σοφία Αντωνοπούλου

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον επιβλέπον καθηγητή μου κ. Νίκο Πελεκάνο που ήταν πάντα διαθέσιμος να λύνει τις απορίες μου και για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθόλη την διάρκεια διεξαγωγής αυτής της εργασίας. Επίσης ευχαριστώ όλη την εργαστηριακή ομάδα στην οποία έγινα μέλος, τον Μανώλη Μανιδάκη, την Τάνια Πίκου, την Χριστίνα Σιαϊτανίδου και τον Νίκο Χατζαράκη. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον διδακτορικό Μανώλη Μανιδάκη που διεξήγαμε μαζί τα πειράματα της εργασίας μου. Ευχαριστώ τον κ. Κωνσταντίνο Στούμπο για την βοήθειά του σε κάποια θεωρητικά συμπεράσματα. Ευχαριστώ την κ. Μαρία Ανδρουλιδάκη και την κ. Κατερίνα Τσαγκαράκη που με βοήθησαν στις μετρήσεις της PL και του SEM, αντίστοιχα, και τον κ. Δημήτρη Τσικριτζή που με βοήθησε με την ανάλυση του XPS. Ευχαριστώ τον Δρ. Ηλία Απεραθίτη για την εναπόθεση όλων των στρωμάτων με rf-sputtering και την ανόπτηση των δειγμάτων καθώς και τον κ. Θανάση Κωστόπουλο για την εναπόθεση του μολυβδαινίου με την τεχνική e-beam. Τέλος ευχαριστώ τους δικούς μου ανθρώπους που είναι πάντα δίπλα μου και με στηρίζουν με όλους τους δυνατούς τρόπους.

Περίληψη

Τα τελευταία γρόνια, η επιστημονική κοινότητα έγει επικεντρωθεί στα φωτοβολταϊκά (Φ/B) περοβσκίτη, δεδομένου ότι μπορούν να καταστούν φθηνότερα από αυτά του πυριτίου και ότι έχουν σημειώσει μεγάλη αύξηση στην απόδοσή τους μέσα σε λίγα γρόνια. Έτσι και σε αυτήν την έρευνα σε μία προσπάθεια να αυξήσουμε την απόδοση των Φ/Β περοβσκίτη μέσω της χρήσης τους σε διατάξεις tandem, εστιάσαμε στην εναπόθεση διάφαγων αγώνιμων οζειδίων όπως είναι το ITO πάνω σε Spiro-ΟΜεΤΑD. Το τελευταίο είναι το τυπικό στρώμα μεταφοράς οπών σε μία διάταξη περοβσκίτη το οποίο συγνά καταστρέφεται με τη βίαιη εναπόθεση του ΙΤΟ. Στα πρώτα πειράματα έγιναν απευθείας εναποθέσεις του ΙΤΟ με διαφορετικές συνθήκες πάνω σε Φ/Β διατάξεις περοβσκίτη, με σκοπό να βρεθούν οι βέλτιστες συνθήκες που είναι λιγότερο επιβλαβείς για το Spiro-OMeTAD. Διαπιστώθηκε σημαντική ελάττωση της Φ/Β απόδοσης σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός που μας προέτρεψε να αναζητήσουμε υποψήφια υλικά ως προστατευτικό στρώμα του Spiro-OMeTAD κατά την εναπόθεση του ΙΤΟ. Δοκιμάσθηκαν για αυτό το λόγο, λεπτά υμένια οξειδίου του μολυβδαινίου με διαφορετικές τεχνικές εναπόθεσης όπως η rf-αποδόμηση (rf-sputtering) και η εξάγνωση ηλεκτρονιακής δέσμης (ebeam). Μεταξύ των δύο τεγνικών, η e-beam εναπόθεση έδωσε καλύτερα αποτελέσματα, παρουσιάζοντας συνολικά έως και μικρή αύξηση της Φ/Β απόδοσης, με σημαντική αύξηση του φωτορεύματος αλλά και παράλληλα μείωση της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Ωστόσο τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά για μελλοντικές έρευνες.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοβολταϊκά, Ηλιακές κυψελίδες, περοβσκίτης, προστατευτικό στρώμα MoO_x, συνθήκες εναπόθεσης, sputtering, e-beam, ITO, Spiro-OMeTAD

Abstract

In recent years, the scientific community has focused on perovskite photovoltaics (PV), considering that they can be made cheaper than silicon ones and that they have seen a spectacular increase in their efficiency within the last few years. Thus, in this work, in an attempt to increase the efficiency of perovskite PVs through their use in tandem devices, we focused on the deposition of transparent conducting oxides such as ITO on Spiro-OMeTAD. The latter is the typical hole transport layer in a perovskite device, which is often destroyed by the ITO forcible deposition. In the first experiments, ITO was directly deposited on perovskite PV devices using different conditions, in order to find the optimal conditions that are the least harmful to Spiro-OMeTAD. A significant decrease in PV efficiency was found in all cases, which prompted us to search for candidate materials as a protective layer of Spiro-OMeTAD during ITO deposition. For this reason, thin films of molybdenum oxide were tested with different deposition techniques such as sputtering and e-beam sublimation. Between the two techniques, e-beam deposition gave better results, showing a significant increase in the photocurrent, with a parallel reduction however in the open circuit voltage. Overall, a small increase in the PV efficiency was observed and the results of this work are encouraging for future research.

Keywords: Photovoltaics, Solar cells, perovskite, MoOx protective layer, deposition conditions, sputtering, e-beam, ITO, Spiro-OMeTAD

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Περιεχόμενα	6
Κατάλογος Σχημάτων	7
Κατάλογος Πινάκων	9
1. Εισαγωγή	10
2. Πειραματικό Μέρος	13
2.1 Παρασκευή ηλιακών κυψελίδων	13
2.2. Τεχνικές χαρακτηρισμού	15
2.3. Ανάλυση χαρακτηρισμού	17
3. Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	
3.1. 1η παρτίδα δειγμάτων	20
3.2. Ανόπτηση των δειγμάτων της 1ης παρτίδας	25
3.3. 2η παρτίδα δειγμάτων	28
4. Ανάλυση XPS	
5. Συμπεράσματα	41
Βιβλιογραφία	

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Κρυσταλλική δομή περοβσκίτη ABX_3 10
Σχήμα 2. α) Ενεργειακές ζώνες ημιαγωγού. β) Προσπίπτον φωτόνιο στον ημιαγωγό με ενέργεια
μεγαλύτερη από το ενεργειακό του χάσμα. γ) Υπερπήδηση ενός ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους
στην ζώνη αγωγιμότητας10
Σχήμα 3. Μηχανισμός λειτουργίας της διόδου p-n
Σ χήμα 4. Tandem δομή
Σχήμα 5. α) Απεικόνιση δείγματος που η εναπόθεση του ΙΤΟ έχει γίνει με μάσκα εμβαδού 0.2x0.2cm ² και
η εναπόθεση του χρυσού με μάσκα εμβαδού τετραγώνων 0.1x0.1cm ² και β) απεικόνιση δείγματος που
η εναπόθεση του ΠΟ δεν έχει γίνει ή έχει γίνει χωρίς μάσκα και η εναπόθεση του χρυσού με μάσκα
εμβαδού τετραγώνων 0.1x0.1cm ²
Σχημα 6. α) Εξαρτημα με εννια ακιδες που χρησιμοποιησαμε στις photo IV μετρησεις απο την μερια
επαφων. Διαταζη κατα την μετρηση των photo IV μετρησεων β) απο την μερια του υποστρωματος. γ)
$\alpha \pi \sigma \tau \eta \nu \mu \epsilon \rho \iota \alpha \tau \omega \nu \epsilon \pi \alpha \phi \omega \nu$.
2χ ημα /. Απεικονίση διαταζης μετρησης φωτοφωταυγείας (PL)
$2\chi\eta\mu a$ 8. Are involving rule $\pi a = 1077$ r) A since $\pi a = 1077$ r) A since $\pi a = 1078$ s) A since $\pi a = 1076$ r) A since \pi a = 1076 r) A since \pi a =
2χ (μα 9. α) Δειγμα pv10/6 p) Δειγμα pv10/7 γ) Δειγμα pv10/8 σ) Δειγματα pv10/9 και pv108020
Σ_{χ} ήμα 10. Αναλογία Ιωσίου-Βρωμίου στο φασμά του AKD
2χ ημα 11. Οι καμπολές ARD όλων των δειγματών της της παρτισάς
Σ_{χ} Γ_{χ} Γ_{χ
2χ ημα 15.1 hoto 1 V με φωτισμό από την μερία του υπού ερωματός με εφαρμόγη α) αυζανόμενης τασης κατ β) μειούμενης τάσης στα δείνματα pv1076-pv1080
$\Sigma \gamma \hat{n} \mu a 14$ Cross-section SFM ton Scivillator pv1080.
Σ_{χ} ήμα 14. Closs-section SELVI του σειγματός pv1000
Σ γήμα 16. PL των δεινμάτων pv1076-pv1079 από την πλευρά των επαφών α) ποιν το ψήσιμο και β) μετά
το ψήσιμο
Σχήμα 17. PL των δειγμάτων pv1076-pv1079 από την πλευρά του υποστρώματος α) πριν το ψήσιμο και
β) μετά το ψήσιμο
Σχήμα 18. Τα δείγματα με το στρώμα του ΙΤΟ πριν και μετά το ψήσιμο α) στις μετρήσεις που πάρθηκαν
από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση β) στις μετρήσεις που
πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση γ) στις μετρήσεις
που πάρθηκαν από την πλευρά των επαφών όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση δ) στις μετρήσεις που
πάρθηκαν από την πλευρά των επαφών όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση . Το δείγμα αναφοράς πριν
και μετά το ψήσιμο ε) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν
εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση στ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος
όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση
Σχήμα 19. α) Δείγματα pv1115, pv1116 β) Δείγματα pv1117, pv1118 γ) Δείγματα pv1119, pv1120 δ)
Δ είγματα pv1121, pv1122 ε) Δ είγματα pv1123 και pv1124
Σ χήμα 20. Δείγμα α) s2019 β) s2020 γ) Mo_10nm δ) Mo_20nm ε) 1125 στ) 1126 ζ) 112728
Σ χήμα 21. Οι καμπύλες του XRD των δειγμάτων α) pv1116, pv1118, pv1120, pv1122, pv1124 β) 1125, 1126 rgu 1127
Σχήμα 22. Οι και πύλες της PL των δειγμάτων py1115- py1124 α) με διένερση από την πάνω και β) από
την κάτω πλευρά.
Σγήμα 23. ΡL με διένερση από την πάνω και από την κάτω πλευρά των δεινμάτων α) 1125 και β) 1126.
30
Σχήμα 24. Οι καμπύλες της PL των δειγμάτων 1127 και FTO α) με διέγερση από την πάνω και από την β)
κάτω πλευρά
Σχήμα 25. Cross-section SEM του δείγματος pv1121 σε δύο διαφορετικά σημεία κατά μήκος της τομής.
52 Σχήμα 26. Εικόνα SEM του δείγματος pv1121 υπό γωνία 85° όπου φαίνεται η επιφάνεια του δείγματος.

Σχήμα 27. Cross-section SEM του δείγματος 1125 α) κάθετα και στο κέντρο της τομής β) κ	άθετα και στην
άκρη της τομής γ) υπό γωνία όπου φαίνεται και η τομή και η επιφάνεια του δείγματος δ) υπό γωνία 85°
όπου φαίνεται η επιφάνεια του δείγματος	
Σχήμα 28. Cross-section SEM του δείγματος 1126 α) υπό γωνία όπου φαίνεται και η τομή κ	και η επιφάνεια
του δείγματος β) κάθετα στην τομή και γ) υπό γωνία 85° όπου φαίνεται η επιφάνεια του	ο δείγματος. 34
Σχήμα 29. Cross-section SEM του δείγματος 1127 α) κάθετα στην τομή και β) υπό γωνία 85	³ όπου φαίνεται
η επιφάνεια του δείγματος	
Σχήμα 30. α) Transmittance του υποστρώματος (Glass Reference) και των ηλιακών κυψε pv1118, pv1120, pv1122, pv1124, β) των δειγμάτων 1125, 1126, 1127 και γ) των τυαλιού με μολυβδαίνιο διαφορετικών παγών και τεγνικών εναπόθεσης	:λίδων pv1116, υποστρωμάτων 35
Σγήμα 31. Photo IV με φωτισμό από την μεριά του υποστρώματος με εφαρμογή α) αυξανόμ	ιενης τάσης και
β) μειούμενης τάσης στα δείγματα pv1115-pv1124.	
Σχήμα 32. Dark IV με φωτισμό από την μεριά του υποστρώματος με εφαρμογή α) αυξανόμ	ενης τάσης και
β) μειούμενης τάσης στα δείγματα pv1115-pv1124	
Σχήμα 33. Φάσματα του XPS στην περιοχή Mo3d των δειγμάτων α) 14nm Mo/Si και β) 32	2nm Mo/Si 39
Σχήμα 34. Φάσματα του XPS στην περιοχή Mo3d των δειγμάτων α) 10nm Mo/Si και β) 20	nm Mo/Si 39

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Στρώματα ηλιακού κυττάρου που αποτελούνται από δίοδο p-n11
Πίνακας 2. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της photo IV των δειγμάτων pv1076-pv1080.
Πίνακας 3. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της dark IV των δειγμάτων pv1076-pv1080.
Πίνακας 4. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της photo IV του καλύτερου δείγματος από
κάθε δυάδα όμοιων δειγμάτων
Πίνακας 5. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της dark IV, από την μεριά του
υποστρώματος, του καλύτερου δείγματος από κάθε δυάδα όμοιων δειγμάτων

1. Εισαγωγή

Στην έρευνά μας, μας απασχόλησαν τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) από περοβσκίτη καθώς έχουν σημειώσει πολύ μεγάλη αύξηση της απόδοσής τους μέσα σε λίγα χρόνια, καθιστώντας τα έτσι άξια προσοχής. Συγκεκριμένα μέσα σε 10 χρόνια από περίπου 14% απόδοση έχουν φτάσει στο 26% ^[1], σημειώνοντας μια από τις πιο ραγδαίες αυξήσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά που είναι υποψήφια για Φ/Β.

Εκτός των άλλων τα Φ/Β περοβσκίτη έχουν την δυνατότητα να κοστίζουν λιγότερο από αυτά του πυριτίου. Επίσης μπορόυν να κατασκευαστούν εύκολα, έχουν κατάλληλο και ρυθμιζόμενο ενεργειακό χάσμα, ισχυρή ηλιακή απορρόφηση, χαμηλό ρυθμό ανασυνδιασμού φορέων και υψηλότερη κινητικότητα φορέων από τα οργανικά ηλιακά κύτταρα ^{[2],[3]}. Όλα τα παραπάνω δημιουργούν ισχυρό κίνητρο για περισσότερη έρευνα αυτών των υλικών.



Η γενική δομή του περοβσκίτη είναι ABX₃, όπου A και B είναι κατιόντα ενώ το X είναι ανιόν^[4]. Τα ανιόντα BX₆ δημιουργούν οκτάεδρα γύρω από το ογκώδες κατιόν A όπως **A** φαίνεται στο Σχήμα 1 ^[5].Στα δικά μας δείγματα ο **B** περοβσκίτης που χρησιμοποιήσαμε έχει τρία κατιόντα το φορμαμιδίνιο, το μεθυλαμμώνιο και το καίσιο και ο χημικός **X** του τύπος είναι FA_{0.8}MA_{0.04}Cs_{0.16}Pb(I_{0.5}Br_{0.5})₃. Το ενεργειακό του χάσμα θεωρητικά είναι γύρω στα 1.82eV και είναι άμεσο ^[6].

Σχήμα 1. Κρυσταλλική δομή περοβσκίτη ABX₃.

Όπως είναι γνωστό για τους ημιαγωγούς, τα ηλεκτρόνια τους εύκολα μπορούν να μεταπηδήσουν από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας μέσω π.χ. φωτοβόλησης. Αν ένα φωτόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού τότε ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να απελευθερωθεί από την ζώνη σθένους και στην θέση του να δημιουργηθεί μια οπή. Μέσω της έκθεσης στο φως ένας ημιαγωγός μπορεί να συσσωρεύσει πολλά ηλεκτρόνια στην ζώνη σθένους, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ρεύματος ^[7].



Σχήμα 2. α) Ενεργειακές ζώνες ημιαγωγού. β) Προσπίπτον φωτόνιο στον ημιαγωγό με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του χάσμα. γ) Υπερπήδηση ενός ηλεκτρονίου από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας.

Στην περίπτωσή μας, ο περοβσκίτης είναι ο ημιαγωγός που με τα κατάλληλα στρώματα που θα τον πλαισιώνουν, θα μπορούν να συλλέγουν τα ηλεκτρόνια και τις οπές που θα δημιουργούνται. Αυτή η τεχνική είναι ευρέως γνωστή στα Φ/Β από περοβσκίτη και ονομάζεται n-i-p δομή ^[8]. Από την στιγμή που η επίδραση του φωτός δημιουργεί ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές, τα ηλεκτρόνια ολισθαίνουν στο στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων (TiO₂) καθώς βρίσκεται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη από αυτή που βρίσκονται τα διεγερμένα ηλεκτρόνια. Αντιθέτως οι οπές διαχέονται στο στρώμα μεταφοράς οπών, που στην περίπτωσή μας είναι το Spiro-OMeTAD. Οι φορείς από τα στρώματα μεταφοράς μεταφοράς



Σχήμα 3. Μηχανισμός λειτουργίας της διόδου p-n.

Τα στρώματα από τα οποία αποτελούνται οι ηλιακές κυψελίδες τέτοιου τύπου όπως και τα υλικά από τα οποία δημιουργήσαμε αυτά τα στρώματα στις ηλιακές κυψελίδες που φτιάξαμε φαίνονται στο Πίνακα 1.

Ονόματα στρωμάτων	Υλικά στρωμάτων
Υπόστρωμα	Γυαλί
Διαφανές αγώγιμο οξείδιο (TCO)	FTO (Οξείδιο του Κασσιτέρου με πρόσμιξη Φθορίου)
Στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETL), υλικό τύπου p	TiO ₂
Φωτοενεργός ημιαγωγός	Περοβσκίτης FA _{0.8} MA _{0.04} Cs _{0.16} Pb(I _{0.5} Br _{0.5}) ₃
Στρώμα μεταφοράς οπών (HTL), υλικό τύπου n	Spiro-OMeTAD
Διαφανές αγώγιμο οξείδιο (TCO)	ΙΤΟ (Οξείδιο του Κασσιτέρου του Ινδίου)
Επαφή	Au

Πίνακας 1. Στρώματα ηλιακού κυττάρου που αποτελούνται από δίοδο p-n.

Τα Φ/Β που φτιάχνουμε στο εργαστήριο κατασκευάζονται με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δομές tandem. Σε μια δομή tandem έχουμε δύο Φ/Β, το ένα πάνω από το άλλο ώστε το πάνω Φ/Β να απορροφά τα φωτόνια με μεγάλη ενέργεια και το κάτω Φ/Β να απορροφά τα φωτόνια με μεγάλη ενέργεια και το κάτω Φ/Β να απορροφά τα φωτόνια με μεγάλη ενέργεια και το κάτω Φ/Β. Αυτό το καταφέρνουμε αν το πάνω Φ/Β έχει υψηλό ενεργειακό χάσμα ενώ το κάτω Φ/Β χαμηλότερο ώστε να απορροφούν διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός το καθένα. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε μεγαλύτερη απόδοση από το να είχαμε μια μονολιθική δομή ^[10]. Ένα βασικό στοιχείο που έχουν οι δομές tandem είναι ότι πρέπει να λειτουργούν από την πάνω πλευρά και ότι το πάνω Φ/Β να είναι διαφανές ώστε το φως να φτάνει και στο Φ/Β που βρίσκεται από κάτω. Σε μία προσπάθεια να το καταφέρουμε αυτό χρεισημοποιήσαμε ως πάνω διαπερατό ηλεκτρόδιο το ΙΤΟ.





Αυτό που μας απασχόλησε σε αυτή την πτυχιακή είναι να μειώσουμε την ζημιά που δέχεται το Spiro-OMeTAD από την βίαιη εναπόθεση του ITO ^[11]. Στην πρώτη φάση των πειραμάτων εστιάσαμε στην απευθείας εναπόθεση του ITO στο Spiro-OMeTAD ώστε να βρούμε ποιά συνθήκη εναπόθεσης είναι η λιγότερο επιβλαβής. Στην συνέχεια δοκιμάσαμε να προστατεύσουμε το Spiro-OMeTAD μέσω ενός στρώματος MoO_x ^[12] χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά πάχη και δύο διαφορετικές τεχνικές εναπόθεσης. Από τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων εντοπίσαμε ποιο πάχος και ποια τεχνική εναπόθεσης προστάτευσε πιο αποτελεσματικά το Spiro-OMeTAD δημιουργώντας έτσι πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω έρευνα.

2. Πειραματικό Μέρος

2.1 Παρασκευή ηλιακών κυψελίδων

- Στο πείραμα χρησιμοποιούμε γυαλάκια που έχουν FTO στην επιφάνειά τους. Το πρώτο πράγμα που κάνουμε είναι να βρούμε την αγώγιμη πλευρά στα γυαλάκια χρησιμοποιώντας ένα πολύμετρο. Η πλευρά του δείγματος που με το πολύμετρο παίρνουμε ένδειξη ότι περνάει ηλεκτρικό ρεύμα, είναι η επιθυμητή. Εφόσον έχουμε κάνει αυτό το βήμα, τοποθετούμε την αγώγιμη πλευρά από πάνω και βάζουμε τα γυαλάκια υπό την επεξεργασία πλάσματος για να ενεργοποιηθεί η επιφάνειά τους. Σε κάθε δείγμα σε μία μικρή περιοχή κολλάμε kapton tape ώστε να μην εναποτεθεί κανένα από τα στρώματα πέρα από το τελευταίο του χρυσού ώστε να μπορέσουμε να πάρουμε μετρήσεις στην photo & dark IV.
- 2. Φτιάχνουμε το συμπαγές διοξείδιο του τιτανίου (TiO₂-compact). Σε ένα φιαλίδιο με τις κατάλληλες πιπέτες βάζουμε 50μL HCl (37%), 2.3mL αιθανόλης, ένα μαγνητάκι και τα βάζουμε να αναδευθούν για μερικά λεπτά. Στη συνέχεια προσθέτουμε 150μL ισοπροποξείδιο του τιτανίου και τα αφήνουμε να συνεχίσουν να αναδεύονται για μερικές ώρες. Αφότου είναι έτοιμο το διάλυμα και έχει γίνει το πλάσμα στα γυαλάκια παίρνουμε το κάθε γυαλάκι ξεχωριστά το βάζουμε στον spin-coater, του εναποθέτουμε με την πιπέτα 70μl TiO₂-compact και θέτουμε σε λειτουργία το spin-coater με λειτουργία στροφών 2000rpm για 30sec με 1000rpm/s. Τέλος ψήνουμε τα δείγματα στο φούρνο με ρυθμό θέρμανσης 5°C/min μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου.
- 3. Πριν εναποθέσουμε το επόμενο στρώμα επαναλαμβάνουμε την διαδικασία του πλάσματος στα δείγματα ενώ παράλληλα φτιάχνουμε το επόμενο διάλυμα, τετραχλωριούχο τιτάνιο (TiCl₄-treatment). Για να κάνουμε αυτό το διάλυμα πρέπει να φτιάζουμε ένα υδατικό διάλυμα με συγκέντρωση 0.05M TiCl₄, για αυτό το σκοπό βάζουμε σε ένα ογκομετρικό δοχείο 500mL νερό και 2.25mL TiCl₄ και τα αφήνουμε να αναδεύονται πάνω σε μια θερμαντική πλάκα. Όταν το διάλυμα φτάσει στους 70°C, βάζουμε μέσα στο δοχείο τα δείγματα για 30 λεπτά. Αφού περάσουν τα 30 λεπτά, βγάζουμε τα δείγματα και τα ζεπλένουμε με απιονισμένο νερό. Τέλος ψήνουμε τα δείγματα στο φούρνο με ρυθμό θέρμανσης 5°C/min μέχρι τους 500°C όπου μένει για 15 λεπτά και στη συνέχεια ψύχεται με ρυθμό 5°C/min μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου.
- 4. Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία του πλάσματος στα δείγματα και ετοιμάζουμε το επόμενο διάλυμα, μεσοπορώδες διοξείδιο του τιτανίου (TiO₂-mesoporous). Θέτουμε σε ανάδευση την αιθανόλη μαζί με την πάστα του διοξειδίου του τιτανίου μέχρι να διαλυθεί με αναλογία 1:7 όπου στην δική μας περίπτωση ήταν xml αιθανόλης και yg διοξειδίου του τιτανίου. Αφού φτιάξουμε το διάλυμα του μεσοπορώδους διοξειδίου του τιτανίου, παίρνουμε το κάθε δείγμα ξεχωριστά το βάζουμε στον spin-coater και του εναποθέτουμε με την πιπέτα 70μl TiO₂-mesoporous και θέτουμε σε λειτουργία το spin-coater με λειτουργία στροφών 2000rpm για 30sec με 1000rpm/s. Τέλος ψήνουμε πάλι τα δείγματα στο φούρνο με ρυθμό θέρμανσης 5°C/min μέχρι τους 500°C όπου μένει για 15 λεπτά και στη συνέχεια ψύχεται με ρυθμό 5°C/min μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου.
- 5. Επαναλαμβάνουμε για τελευταία φορά την διαδικασία του πλάσματος στα δείγματα ενώ παράλληλα φτιάχνουμε τα τελευταία διαλύματα που θα χρειαστούμε. Ξεκινάμε με την συνταγή του περοβσκίτη η οποία είναι η εξής FA_{0.8}MA_{0.04}Cs_{0.16}Pb(I_{0.5}Br_{0.5})₃. Επομένως ζυγίζουμε 0,17884gr FAI (0.8mmol), 0.054028gr CsI (0.16mmol), 0.0082654gr MAI (0.04mmol), 0.149825gr PbI₂ (0.25mmol), 0.35776gr PbBr₂ (0.75mmol), 0.01807gr PbCl₂ (0.05mmol) και τα βάζουμε όλα σε κοινό φιαλίδιο να αναδεύονται μέχρι να αποκτήσει σκούρο

χρώμα η σκόνη, καθώς τότε ξέρουμε ότι έχουμε την επιθυμητή αναλογία του περοβσκίτη που θέλουμε. Μετά την ανάδευση βάζουμε τον περοβσκίτη στο φούρνο για να φύγει η υγρασία. Στο τελικό στάδιο φτιάχνουμε το διάλυμα του περοβσκίτη οπότε μέσα στο φιαλίδιο με τις σκόνες προσθέτουμε 800μl DMF και 200μl DMSO (4:1 → DMF:DMSO) και τα θέτουμε σε ανάδευση μέχρι να διαλυθεί τελείως η σκόνη.

- 6. Συνεχίζουμε με την παρασκευή ενός διαλύματος που μειώνει τον ανασυνδυασμό φορτίου που προκαλείται από παγίδευση ^[13], ένα δισδιάστατο στρώμα παθητικοποίησης (passivation layer). Για να φτιάξουμε αυτό το διάλυμα χρησιμοποιούμε 9.9mg/ml PEA-I (ιωδιούχο φαιναιθυλαμμώνιο) σε ισοπροπανόλη.
- Το τελευταίο διάλυμα που θα φτιάξουμε είναι το Spiro-OMeTAD (1M) όπου σε ένα φιαλίδιο θα βάλουμε να αναδευθούν 144.6mg Spiro-OMeTAD, 57.6μl πυριδίνη, 35μl Li-TFSI/Acetonitrile (520mg/ml), 58μl FK209/Acetonitrile (320mg/ml) και 1ml άνυδρο χλωροβενζόλιο.
- 8. Εφόσον έχουμε φτιάξει τα τρία τελευταία διαλύματα, τα εναποθέτουμε με την βοήθεια του spin-coater πάνω στα δείγματά μας. Κάθε δείγμα ξεχωριστά το βάζουμε στο spin-coater που τον θέτουμε σε λειτουργία στροφών 3000rpm για 40sec με 1000rpm/sec και στο δέκατο δευτερόλεπτο εναποθέτουμε 70μl με την βοήθεια μιας πιπέτας από το διάλυμα του περοβσκίτη και αμέσως μετά με μια άλλη πιπέτα παίρνουμε 1ml από το διάλυμα του στρώματος παθητικοποίησης για να το εναποθέτουμε το εκάστοτε δείγμα πάνω σε μια θερμαντική πλάκα που έχει θερμοκρασία 65°C για 5 λεπτά. Τελευταίο προσθέτουμε το διάλυμα του Spiro-OMeTAD πάλι για κάθε δείγμα ξεχωριστά το βάζουμε στο spin-coater παίρνουμε 70μl με μια πιπέτα και το εναποθέτουμε στο εκάστοτε δείγμα.
- 9. Τέλος στα δείγματα αναφοράς (reference) με την βοήθεια του sputtering εναποθέτουμε χρυσό ενώ στα άλλα δείγματα εναποθέτουμε είτε ITO/χρυσό είτε MoO_x/ITO/χρυσό. Το ITO εναποτέθηκε με sputtering και δοκιμάστηκαν διάφορες συνθήκες εναπόθεσης ώστε να βρεθεί η πιο κατάλληλη. Το οξείδιο του μολυβδαινίου εναποτέθηκε είτε με sputtering είτε με θερμική εξάτμιση ώστε να συγκρίνουμε ποια τεχνική είναι πιο προσιτή για τα δείγματα. Σε κάποιες εναποθέσεις ITO χρησιμοποιήθηκαν μάσκες ώστε να σχηματιστούν εννιά τετράγωνα με εμβαδόν 0.2x0.2cm² πάνω στο δείγμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο χρυσός εναποτέθηκε με αντίστοιχη μάσκα ακριβώς πάνω από το ITO αλλά το εμβαδόν των τετραγώνων ήταν 0.1x0.1cm². Στις υπόλοιπες περιπτώσεις που είτε το ITO δεν εναποτέθηκε με μάσκα είτε δεν υπήρχε το στρώμα του ITO τότε ο χρυσός εναποτέθηκε με την μάσκα με τα τετράγωνα εμβαδού 0.2x0.2cm².



Σχήμα 5. α) Απεικόνιση δείγματος που η εναπόθεση του ΙΤΟ έχει γίνει με μάσκα εμβαδού 0.2x0.2cm² και η εναπόθεση του χρυσού με μάσκα εμβαδού τετραγώνων 0.1x0.1cm² και β) απεικόνιση δείγματος που η εναπόθεση του ΙΤΟ δεν έχει γίνει ή έχει γίνει χωρίς μάσκα και η εναπόθεση του χρυσού με μάσκα εμβαδού τετραγώνων 0.1x0.1cm².

2.2. Τεχνικές χαρακτηρισμού

Οι τεχνικές χαρακτηρισμού που χρησιμοποιήσαμε στα δείγματα ήταν η μέτρηση ρεύματοςτάσης υπό φωτισμό αλλά και σε σκοτάδι των διόδων των ηλιακών κυψελίδων (photo & dark IV), η φωτοφωταύγεια [(Photoluminescence (PL)], η περίθλαση ακτίνων X [X-Ray diffraction (XRD)], η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης [Scanning Electron Microscopy (SEM)], η φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίου ακτίνων X [X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)] και η διαπερατότητα (Transmittance). Παρακάτω παρουσιάζονται μία-μία οι τεχνικές χαρακτηρισμού:

Photo & Dark IV: Όσον αφορά την συνδεσμολογία συνδέουμε τις επαφές με ακίδες οι οποίες συνδέονται με καλώδια που καταλήγουν στο μηγάνημα (KEITHLEY). Το μηγάνημα μετράει το ρεύμα σε συνάρτηση με την τάση. Οι ακίδες που ακουμπούν στις χρυσές επαφές των δειγμάτων (p-περιοχή) τις συνδέουμε με το συν του μηγανήματος ενώ στην άκρη του δείγματος όπου υπάρχει μόνο γυαλί και χρυσός (n-περιοχή) συνδέουμε το πλην του μηχανήματος. Η δέσμη φωτός που πέφτει πάνω στα δείγματα είναι ρυθμισμένη να αντιστοιχεί με έναν ήλιο. Στην επαφή που γίνεται η μέτρηση κάθε φορά πρέπει να είναι συνδεδεμένη η ακίδα και όταν πρόκειται για photo IV πρέπει η δέσιη να πέφτει πάνω στην εκάστοτε επαφή. Στις photo IV, όπου φωτίζουμε μία επαφή κάθε φορά, παίρνουμε δύο ειδών μετρήσεις, αυτές που τα δείγματα φωτίζονται από την μεριά του υποστρώματος (bottom measurements) και αυτές που τα δείγματα φωτίζονται από την μεριά των επαφών (top measurements). Στις dark IV, τα δείγματα δεν φωτίζονται καθόλου. Στην συνέχεια, μέσω ενός προγράμματος που έχουμε εγκαταστήσει στον υπολογιστή του εργαστηρίου, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το ΚΕΙΤΗLΕΥ μπορούμε να διαχειριστούμε τις ρυθμίσεις του ΚΕΙΤΗLΕΥ. Το πρόγραμμα στις photo IV το ρυθμίζουμε συνήθως να μετρήσει το ρεύμα από την τάση 0.5Volt εώς 1Volt με βήμα 10mVolt ενώ στις dark IV το ρυθμίζουμε να μετρήσει το ρεύμα από την τάση -1 Volt εώς 1.5 Volt με βήμα 10m Volt. Στις αντίστροφες μετρήσεις (reverse measurements) ρυθμίζουμε το ΚΕΙΤΗLΕΥ να ξεκινάει πρώτα από την μεγάλη τιμή της τάσης και να καταλήγει στην μικρή τιμή της τάσης.



Σχήμα 6. α) Εξάρτημα με εννιά ακίδες που χρησιμοποιήσαμε στις photo IV μετρήσεις από την μεριά επαφών. Διάταξη κατά την μέτρηση των photo IV μετρήσεων β) από την μεριά του υποστρώματος. γ) από την μεριά των επαφών.

Photoluminescence (**PL**): Στις μετρήσεις PL χρησιμοποιήσαμε λέιζερ ηλίου-καδμίου(He-Cd) με μήκος κύματος 325nm και ισχύ 25mW. Πριν πέσει η ακτίνα του λέιζερ στο δείγμα μεσολεί ένα φίλτρο τύπου ND1 με αποτέλεσμα η ισχύ της δέσμης να μειώνεται δια δέκα. Η δέσμη που πέφτει πάνω στο

δείγμα φροντίζουμε να είναι σε σημείο που βρίσκονται όλα τα στρώματα που έχουμε εναποθέσει για να φτιάζουμε την ηλιακή κυψελίδα, εκτός του χρυσού. Η εκπομπή από το δείγμα καταλήγει σε ένα φασματογράφο εξοπλισμένο με μία κάμερα CCD, μέσω ενός φακού εστιακής απόστασης, 15cm, σε γεωμετρία 2f-2f. Ένα φίλτρο στην είσοδο του φασματογράφου κόβει τις σκεδαζόμενες ακτίνες του laser στα 325nm. Ο χρόνος έκθεσης που είχαμε θέσει στην κάμερα για την κάθε μέτρηση ήταν 500msec.



Σχήμα 7. Απεικόνιση διάταξης μέτρησης φωτοφωταύγειας (PL).

X-Ray diffraction (XRD): Στις μετρήσεις XRD τοποθετούμε το δείγμα στο μηχάνημα ώστε η λεπίδα του μηχανήματος να βρίσκεται ανάμεσα στις επαφές του χρυσού και παίρνουμε μετρήσεις για τις γωνίες 2θ από 5° εώς 60°.

Scanning Electron Microscopy (SEM): Στο SEM είτε βγάζαμε φωτογραφίες την κάτοψη ενός δείγματος για να δούμε με λεπτομέρεια πως είχε διαμορφωθεί η επιφάνεια του δείγματος είτε κόβαμε το δείγμα κάθετα (cross-section) για να δούμε όλα τα στρώματα σε διατομή και να εκμαιεύσουμε πληροφορίες όπως για παράδειγμα το πάχος του κάθε στρώματος.

X-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Το μηχάνημα του XPS το χειρίζονται μόνο λίγα άτομα που είναι εξειδικευμένα οπότε εμείς το μόνο που πρέπει να ξέρουμε είναι ποιά στοιχεία περιμένουμε να βρούμε από την μέτρηση του XPS ώστε το μηχάνημα να πάρει μετρήσεις με πιο αργό βήμα στις κατάλληλες ενέργειες. Στην δική μας περίπτωση κάναμε μετρήσεις σε δείγματα που ήταν σκέτο πυρίτιο και σε δείγματα πυριτίου που από πάνω είχαν οξείδιο του μολυβδαινίου σε διάφορα πάχη. Επομένως τα αναμενόμενα υλικά είναι το πυρίτιο (Si), το μολυβδαίνιο (Mo), το οξυγόνο (O) και ο άνθρακας (C).

Transmittance: Για τις μετρήσεις της transmittance ανοίγουμε το μηχάνημα UV-Vis και τον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με αυτό, πατάμε το connect και ανοίγουμε το UV probe ώστε να γίνουν όλα τα τεστ για να μπορούμε να προχωρήσουμε με τις μετρήσεις, τέλος ελέγχουμε αν μέσα στην σφαίρα ολοκλήρωσης είναι το "Barium-Sulfate-100%" για να μπορέσουμε να πάρουμε το υπόβαθρο του μηχανήματος. Στην συνέχεια τοποθετούμε το δείγμα που θέλουμε να μετρήσουμε μέσα στο μηχάνημα και ρυθμίζουμε από τον υπολογιστή πως θα γίνει η μέτρηση δηλαδή σε ποια μήκη κύματος, με τι βήμα κτλ. Στις μετρήσεις που έγιναν στις ηλιακές κυψελίδες η δέσμη έπεφτε στην κάτω πλευρά δηλαδή από την μεριά του γυαλιού.

2.3. Ανάλυση χαρακτηρισμού

Από τις παραπάνω μετρήσεις συλλέξαμε δεδομένα τα οποία με την κατάλληλη ανάλυση μας οδήγησαν στον χαρακτηρισμό των δειγμάτων. Στις μετρήσεις του SEM δεν έκανα κάποια παραπάνω ανάλυση, οι εικόνες ήταν έτοιμες με τα πάχη σημειωμένα και στις μετρήσεις του XPS έφτιαξα μόνο τα διαγράμματα στο περιβάλλον του Origin 2021. Παρακάτω όμως βρίσκονται βήμα προς βήμα οι υπόλοιπες μέθοδοι χαρακτηρισμού που ανέλυσα στο Origin 2021.

Photo IV:

- 1. Αφού βάλω τα δεδομένα του ρεύματος-τάσης στον πίνακα του Origin πατάω δεξί κλικ στην B(Y) στήλη του πίνακα και δημιουργώ το διάγραμμα του ρεύματος-τάσης πατώντας τα εξής: Plot \rightarrow Line + Symbol \rightarrow Line + Symbol. Στη συνέχεια βρίσκω με το screen reader το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) και την τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc) δηλαδή το σημείο που η καμπύλη ρεύματος-τάσης τέμνει τον άξονα y και τον άξονα x αντίστοιχα. Όταν βρω το ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) το μετατρέπω σε πυκνότητα ρεύματος (J_{sc}) με τον εξής τύπο: $J_{sc} = \frac{I_{sc}*1000}{Area (cm^2)}$, $[mA/cm^2]$, όπου Area η ενεργή περιοχή που αντιδρά στον φωτισμό της λάμπας.
- 2. Δημιουργώ την στήλη της πυκνότητας ρεύματος (J[mA/cm²]) βάζοντας στο κελί της F(x)= την συνάρτηση $\frac{col(b)*1000}{Area~(cm^2)}$.
- 3. Δημιουργώ την στήλη της ισχύος (P=J*V [mA*V/cm²]) βάζοντας στο κελί της F(x)= την συνάρτηση col(c)*col(a) και φτιάχνω το διάγραμμα ισχύς-τάσης όπως και στο βήμα 1.
- 4. Βάζω τον άξονα του y να ξεκινάει από το 0 του άξονα x και το αντίστροφο (δεξί κλικ σε κάποιον από τους άξονες του διαγράμματος → Line and Ticks → Left → At Position → 0 και μετά Bottom → At Position → 0). Μεγεθύνω στα σημεία που βρίσκονται κάτω από τον άξονα x ώστε να βρω το σημείο με την μικρότερη τιμή του y, αυτό το σημείο αντιπροσωπεύει την μέγιστη τιμή της ισχύος δηλαδή το Pmax.
- 5. Βρίσκω την απόδοση με τον τύπο $\eta = \frac{P_{max}}{P_{sun}}$, όπου $P_{sun}=100$ mW/cm² και τον συντελεστή πλήρωσης με τον τύπο $FF(\%) = \frac{P_{max}}{V_{ac}*I_{sc}}$, και τα δύο μεγέθη είναι αδιάστατα.

Dark IV:

- Βάζω τα δεδομένα του ρεύματος-τάσης στον πίνακα του Origin και δημιουργώ το διάγραμμα I-V.
- 2. Με το data selector διαλέγω τρία σημεία κοντά στο μηδέν για να βρω την ευθεία που εφαρμόζει καλύτερα σε αυτά (Analysis \rightarrow Fitting \rightarrow Fit Linear). Η κλίση της ευθείας πρέπει να βγει θετικά, αν βγει αρνητική διαλέγω περισσότερα σημεία ή τρία διαφορετικά σημεία κοντά στο μηδέν. Από την κλίση (slope) αυτής της ευθείας βρίσκω την παράλληλη αντίσταση (R_{shunt}) με τον τύπο $R_{sunt} = \frac{1}{slope} \sim$ GOhm.
- Δημιουργώ την στήλη του φυσικού λογαρίθμου του ρεύματος (lnl) βάζοντας στο κελί της F(x)= την συνάρτηση ln(abs(col(b))) και δημιουργώ το διάγραμμα lnI-V.
- 4. Με το data selector διαλέγω μια γραμμική περιοχή πριν η καμπύλη χάσει την ιδανική της συμπεριφορά (δηλαδή πριν χάσει την γραμμικότητά της) και εφαρμόζω πάλι μια ευθεία σε αυτά τα σημεία όπως και στο βήμα 2. Το σημείο που η ευθεία τέμνει τον άξονα y (intercept) και η κλίση της ευθείας (slope) αντιστοιχεί με τον εξής τρόπο στην παρακάτω εξίσωση: $lnI = lnI_o + \frac{q}{k*T*n} * V$, intercept=lnI_o και $slope = \frac{q}{k*T*n}$ άρα από την κλίση της ευθείας βρίσκω τον παράγοντα ιδανικότητας $n = \frac{1}{25*slope} \Rightarrow n = \frac{40}{slope}$.

- 5. Διαλέγω τρία σημεία όπου τα πειραματικά δεδομένα αρχίζουν να αποκλίνουν από τα θεωρητικά. Με αυτά τα τρία σημεία φτιάχνω έναν καινούργιο πίνακα με τις εξής στήλες:
 - col(a) = ρεύμα = I(A)
 - ✤ col(b)=lnI
 - col(c)=τάση=V(V)
 - col(c) tash (t, t)
 col(d)=θεωρητική τάση=V_{theoretical} = $\frac{lnI-intercept}{slope}$, όπου lnI=col(b)
 - col(e)=πειραματική τάση μείων την θεωρητική=DV=col(c)-col(d)
- 6. Φτιάχνω το διάγραμμα DV-Ι και εφαρμόζω μια ευθεία της οποίας η κλίση είναι η αντίσταση σε σειρά του "κυκλώματος" (R_{series}=slope [Ohm]).



Σχήμα 8. Απεικόνιση κυκλώματος που αντιστοιχεί στον τρόπο που λειτουργεί μια ηλιακή κυψελίδα.

Photoluminescence (PL):

- Βάζω στον πίνακα του Origin τα δεδομένα των μετρήσεων της μπροστινής και της πίσω πλευράς του δείγματος και μετά τα βάζω σε ένα κοινό διάγραμμα. Για να τα βάλω σε κοινό διάγραμμα πρέπει να δημιουργήσω ένα καινούργιο διάγραμμα και να πατήσω δεξί κλικ πάνω αριστερά του διαγράμματος που απεικονίζεται ένα κουτάκι που έχει μέσα το νούμερο 1, εκεί πέρα μπορώ να διαλέξω τις στήλες B από τη μέτρηση της μπροστινής και της πίσω πλευράς του δείγματος. Έτσι μπορώ εύκολα να συγκρίνω τις δύο μετρήσεις που αφορούν το ίδιο δείγμα.
- 2. Για κάθε μέτρηση σημειώνω το μήκος κύματος και την ένταση που βρίσκεται η κορυφή της καμπύλης ώστε να μπορώ να συγκρίνω όλες αυτές τις τιμές στο τέλος. Μετά που βρω το μέγιστο σε μία καμπύλη βρίσκω το πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο (FWHM). Όσο πιο μεγάλη ένταση έχουμε στο μέγιστο της καμπύλης τόσο χαμηλότερη είναι η πυκνότητα ατελειών στο δείγμα ενώ όσο πιο μεγάλο είναι το πλήρες πλάτος στο μισό μέγιστο της καμπύλης τόσο πιο μεγάλη ανομοιογένεια έχει το υλικό. Σε περίπτωση που σε μία καμπύλη υπάρχουν περισσότερες κορυφές από μία, τις σημειώνω για να ψάξω από που προέρχονται.
- 3. Στο τέλος βάζω σε κοινό διάγραμμα όλες τις μπροστινές μετρήσεις των δειγμάτων και αντίστοιχα κάνω και για τις πίσω μετρήσεις με τον τρόπο που το έκανα και στο βήμα 1. Αυτό με βοηθάει να συγκρίνω τα δείγματα μεταξύ τους.

X-Ray diffraction (XRD):

- 1. Στους πίνακες του Origin βάζω τα δεδομένα των μετρήσεων και τα δεδομένα τον υλικών που περιέχει η συνταγή του περοβσκίτη.
- Στη συνέχεια σε κάθε πίνακα δημιουργώ μια επιπλέον στήλη κανονικοποίησης με τον εξής τρόπο: επιλέγω την στήλη B → Analysis → Mathematics → Normalize Columns → Open Dialog

 \rightarrow Normalize Methods \rightarrow Normalize to [0,1]. Με αυτό τον τρόπο όλες οι καμπύλες θα έχουν το ίδιο ύψος και θα είναι πιο εύκολο να τις συγκρίνω.

- 3. Μετά από αυτό φτιάχνω το διάγραμμα κάθε μέτρησης και από πάνω βάζω τις καμπύλες των υλικών που περιέχει η συνταγή του περοβσκίτη για να τις συγκρίνω με τις καμπύλες των μετρήσεων μου. Για να στοιχίσω με αυτόν τον τρόπο τις καμπύλες, πατάω το πέμπτο εικονίδιο από τα αριστερά προς τα δεξιά στο κάτω μέρος του παραθύρου του Origin και επιλέγω το Stacked Lines by Y Offsets.
- 4. Τέλος πάλι βάζω την μία πάνω από την άλλη όλες τις καμπύλες από τις μετρήσεις των δειγμάτων σε ένα κοινό διάγραμμα για να τις συγκρίνω.

Transmittance:

Από την transmittance των δειγμάτων βρίσκουμε το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στην μέση της περιοχής της καμπύλης που είναι ευθεία. Απ' αυτό το μήκος κύματος (λ) βρίσκουμε το ενεργειακό χάσμα (Ε) του περοβσκίτη κάνοντας την μετατροπή με τον τύπο $E = \frac{hc}{\lambda}$, όπου hc≈1240eV*nm.

3. Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

3.1. 1η παρτίδα δειγμάτων

Στην πρώτη παρτίδα δειγμάτων φτιάξαμε πέντε δείγματα εκ των οποίον τα τρία έχουν ITO πριν από τις επαφές του χρυσού ενώ τα άλλα δύο δεν έχουν ITO. Πώς εναποτέθηκαν οι χρυσές επαφές στα δείγματα με και χωρίς ITO περιγράφεται στην ενότητα "Παρασκευή ηλιακών κυψελίδων" στο βήμα 9.

Τα δείγματα που δεν έχουν ΙΤΟ είναι τα δείγματα αναφοράς καθώς με βάση αυτά κάνουμε τις απαραίτητες συγκρίσεις. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δειγμάτων αναφοράς είναι ότι το δείγμα pv1079 είχε μείνει στο κενό μέχρι να γίνει η εναπόθεση του Au ενώ το δείγμα pv1080 είχε μείνει στο άζωτο.

Στα δείγματα που έχουν ITO, το ITO εναποτέθηκε με διαφορετικές συνθήκες sputtering κάθε φορά ώστε να εντοπίσουμε την λιγότερο επιβλαβή συνθήκη για το στρώμα του Spiro-OMeTAD.

Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά τα στρώματα που φτιάξαμε στο κάθε δείγμα με τα ονόματά τους και τις συνθήκες εναπόθεσης του ΙΤΟ. Ο περοβσκίτης που φτιάξαμε και χρησημοποιήσαμε όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή είναι ο FA_{0.8}MA_{0.04}Cs_{0.16}Pb(I_{0.5}Br_{0.5})₃.



Σχήμα 9. α) Δ είγμα pv1076 β) Δ είγμα pv1077 γ) Δ είγμα pv1078 δ) Δ είγματα pv1079 και pv1080.

Από την ανάλυση που κάναμε στα δεδομένα του **XRD** βρήκαμε ότι έχουμε πετύχει την αναλογία της συνταγής του περοβσκίτη 50% ιωδίου και 50% βρωμίου. Αυτό διαπιστώθηκε καθώς όλα τα δείγματα είχαν κορυφή στις ~14.4° όπου είναι το κέντρο μεταξύ των κορυφών του ιωδίου 13.9° και του βρωμίου 14.9°. Επίσης οι XRD καμπύλες μεταξύ των δειγμάτων δεν έχουν διαφορές εκτός από τα δύο δείγματα αναφοράς που επειδή έχουν πιο μεγάλες επαφές χρυσού έχουν πιο έντονη την κύρια κορυφή που εμφανίζει ο χρυσός στις 38.1° ^[14]. Επειδή η κορυφή του περοβσκίτη 14.4° έχει μείνει ίδια σε όλα τα δείγματα καταλαβαίνουμε ότι δεν έχει υποστεί ζημία από την εναπόθεση του ΙΤΟ.



Σχήμα 10. Αναλογία Ιωδίου-Βρωμίου στο φάσμα του XRD.



Σχήμα 11. Οι καμπύλες XRD όλων των δειγμάτων της 1ης παρτίδας.

Στη συνέχεια από την ανάλυση της **PL** παρατηρούμε ότι ο περοβσκίτης εκπέμπει γύρω στα 700nm από την πλευρά υποστρώματος (back) ενώ από την πλευρά των επαφών (front) εκπέμπει γύρω στα 695nm. Αυτή η μικρή ασυμφωνία μας δείχνει ότι ο περοβσκίτης έχει διαφορετική δομή από την πλευρά που έρχεται σε επαφή με το m-TiO₂ σε σχέση με την πλευρά που έρχεται σε επαφή με το Spiro-OMeTAD. Μια πιθανή απάντηση σε αυτό είναι, ότι ο περοβσκίτης κρυσταλλώνει με λίγο διαφορετική ποσόστωση I-Br κατά μήκος του άξονα εναπόθεσης.

Ωστόσο εκτός από την κορυφή του περοβσκίτη παρατηρούμε άλλη μία έντονη κορυφή γύρω στα 420nm στην περίπτωση διέγερσης από την "πάνω" μεριά, η οποία πιθανότατα οφείλεται σε εκπομπή του στρώματος Spiro-OMeTAD. Εκπομπή στα 380-410nm ανιχνεύεται και όταν διεγείρουμε από "κάτω", η οποία μάλλον οφείλεται σε εκπομπή της τιτανίας ή/και του FTO.

Όσον αφορά την ένταση της PL του περοβσκίτη, είναι αισθητή η μείωση της όταν διεγείρουμε από μπροστά τα δείγματα. Η μόνη πιθανή απάντηση εκ πρώτης όψεως είναι ότι το Spiro-OMeTAD απορροφά μεγάλο ποσοστό του λέιζερ 325nm και έτσι η εκπομπή που βλέπουμε από τον περοβσκίτη είναι πολύ πιο ασθενής.



Σχήμα 12. Το φάσμα της PL των δειγμάτων με διέγερση από την α) πάνω και την β) κάτω μεριά.

Ακολουθεί η ανάλυση της **photo και dark IV** που από εκεί εύκολα διαπιστώσαμε ότι τα δείγματα που έχουν ITO υπέστησαν μεγάλη ζημιά από την διαδικασία εναπόθεσης του sputtering.



Σχήμα 13. Photo IV με φωτισμό από την μεριά του υποστρώματος με εφαρμογή α) αυξανόμενης τάσης και β) μειούμενης τάσης στα δείγματα pv1076-pv1080.

Παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης της photo IV των δειγμάτων, απ' όπου βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

- 1. Τα δείγματα **αναφοράς** (pv1079, pv1080) έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τα υπόλοιπα δείγματα. Η απόδοσή τους, μάλιστα, υπερτερεί κατά μία τάξη μεγέθους τουλάχιστον.
- 2. Οι μετρήσεις της photo IV από την μεριά του υποστρώματος (bottom) έχουν υψηλότερες αποδόσεις από τις μετρήσεις της photo IV από την μεριά των επαφών (top).
- 3. Οι μετρήσεις που πάρθηκαν με αυξανόμενη τάση (forward) έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τις μετρήσεις που πάρθηκαν με μειούμένη τάση (reverse).

contact	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	J _{sc} (mA/cm ²)	P _{max} (mW/cm ²)	Απόδοση η (%)	FF%
1sun_pv1076_bott_3f	0,766	8,455*10-6	0,211	0,032	0,032	19,799

1sun_pv1076_top_3f	0,775	5,454*10 ⁻⁷	0,018	0,005	0,005	35,842
1sun_pv1077_bott_6f	0,826	1,723*10 ⁻⁵	0,431	0,076	0,076	21,348
1sun_pv1077_bott_6r	0,619	1,495*10 ⁻⁵	0,374	0,070	0,070	30,237
1sun_pv1077_top_6f	0,894	1,207*10-6	0,040	0,010	0,010	27,964
1sun_pv1077_top_5r	0,890	1,297*10-6	0,043	0,016	0,016	41,808
1sun_pv1078_bott_7f	0,689	4,927*10-6	0,123	0,015	0,015	17,700
1sun_pv1078_bott_4r	0,378	4,722*10-6	0,118	0,012	0,012	26,903
1sun_pv1078_top_7f	0,629	4,733*10 ⁻⁷	0,016	0,003	0,003	29,809
1sun_pv1078_top_1r	0,566	3,284*10-7	0,011	0,002	0,002	32,123
1sun_pv1079_bott_8f	0,830	1,178*10 ⁻⁴	2,945	0,870	0,870	35,592
1sun_ pv1079_bott_ 7 r	0,910	1,014*10 ⁻⁴	2,535	0,671	0,671	29,087
1sun_ pv1080_bott _1f	0,920	1,179*10 ⁻⁴	2,947	0,693	0,693	25,560
1sun_ pv1080_bott_ 3 r	0,885	8,858*10 ⁻⁵	2,214	0,449	0,449	22,915

Πίνακας 2. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της photo IV των δειγμάτων pv1076pv1080.

Αντίστοιχα βλέπουμε παρακάτω τα αποτελέσματα της ανάλυσης της dark IV των δειγμάτων, απ' όπου βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

- 1. Τα δείγματα **αναφοράς** (pv1079, pv1080) έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά κυκλώματος από τα υπόλοιπα δείγματα.
- 2. Τα χαρακτηριστικά του κυκλώματος στις μετρήσεις που πάρθηκαν όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση (reverse) είναι καλύτερα από αυτά όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση (forward).
- 3. Se óla ta deígmata η R_{series} eívai polú megalúter η apó to epibumitó.

Δεδομένα	R _{shunt} (KΩ*cm ²)	Παράγοντας ιδανικότητας n	R _{series} (KΩ*cm ²)
dark_pv1077_top_8f	570	14,337	16,660
dark_pv1077_top_8r	4620	7,990	1,557
dark_pv1078_bott_4f	480	14,296	7,946
dark_pv1078_bott_4r	3040	8,372	6,552
dark_ pv1079 _bott_6f	317	4,217	0,207

dark_ pv1079 _bott_6r	2152	3,289	2,421
dark_pv1080_bott_1f	68	8,480	3,814
dark_ pv1080 _bott_4r	68	4,024	0,200

Πίνακας 3. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της dark IV των δειγμάτων pv1076pv1080.

Στην συνέχεια υποβάλαμε σε **cross-section** SEM το δείγμα pv1080. Παρακάτω φαίνονται τα πάχη που βρέθηκαν σε όσα στρώματα ήταν εφικτό.



Σχήμα 14. Cross-section SEM του δείγματος pv1080.

Κλείνοντας με την μελέτη της πρώτης παρτίδας των δειγμάτων συμπεραίνουμε ότι το ITO προκαλεί μεγάλη ζημιά στο αμέσως προηγούμενο στρώμα του, δηλαδή στο Spiro-OMeTAD. Αυτό το συμπέρασμα άλλωστε μας ωθεί στην δεύτερη παρτίδα των δειγμάτων να αναζητήσουμε ένα προστατευτικό στρώμα ανάμεσα στο ITO και στο Spiro-OMeTAD.

Ενώ ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι **η πιο ευνοϊκή συνθήκη εναπόθεσης του ΙΤΟ** είναι αυτή του δείγματος pv1077, δηλαδή αυτή που μεσολαβούν τα περισσότερα βήματα εναπόθεσης μέχρι την τελική ισχύ (50W+100W+200W+400W).

3.2. Ανόπτηση των δειγμάτων της 1ης παρτίδας

Στη συνέχεια ψήσαμε τα δείγματα (εκτός από το δείγμα pv1080), στους 100°C για 15 λεπτά σε άζωτο, ώστε να ελέγζουμε αν ο παράγοντας της θερμοκρασίας βοηθάει τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων. Σημειώνεται ότι δεν δοκιμάσαμε υψηλότερη θερμοκρασία ανόπτησης, διότη ο περοβσκίτης καταστρέφεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 100°C.

Εφόσον ξανακάναμε **XRD** στα δείγματα παρατηρήσαμε ότι οι κορυφές που υπήρχαν πριν το ψήσιμο υπάρχουν και μετά, με την διαφορά ότι έχει μειωθεί η ένταση τους και έχουν μετακινηθεί σε λίγο μικρότερα μήκη κύματος.

Επίσης εμφανίστηκαν τέσσερις καινούργιες κορυφές, στις 11.33°, 22.75°-22.80°, 34.41°-34.49°, 46.48°-46.59°, όπου μάλλον είναι η κίτρινη φάση του φορμαμιδινίου (FAPbI₃).



Σχήμα 15. XRD των δειγμάτων pv1076-pv1079 α) πριν το ψήσιμο και β) μετά το ψήσιμο

Από την ανάλυση της PL παρατηρήσαμε ότι:

- Στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την μεριά των επαφών (front) και από την μεριά του υποστρώματος (back) έχει εξαφανιστεί η 1^η κορυσή στα ~423nm.
- Στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την μεριά των επαφών (front) έχει εξαφανιστεί η διπλή κορυφή του περοβσκίτη που υπήρχε πριν το ψήσιμο.
- 3. Στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την μεριά του υποστρώματος (back) η ένταση μετά το ψήσιμο μειώθηκε 2-5 φορές ενώ από την μεριά των επαφών η αλλαγές είναι ανεπαίσθητες.
- Το μήκος κύματος που παρουσιάζονται οι κορυφές έχει μετακινηθεί προς τα δεξιά σχεδόν σε όλα τα δείγματα (~695 nm→~742nm).
- 5. Το πλάτος των κορυφών έχει αυξηθεί σχεδόν σε όλα τα δείγματα.
- 6. Οι μετρήσεις από την μεριά των επαφών και του υποστρώματος έχουν πολύ κοντινές τιμές και στην ένταση και στο μήκος κύματος σε αντίθεση με πριν το ψήσιμο που είχαν πολύ μεγάλες διαφορές.



Σχήμα 16. PL των δειγμάτων pv1076-pv1079 από την πλευρά των **επαφών** α) πριν το ψήσιμο και β) μετά το ψήσιμο.



Σχήμα 17. PL των δειγμάτων pv1076-pv1079 από την πλευρά του **υποστρώματος** α) πριν το ψήσιμο και β) μετά το ψήσιμο.

Από την ανάλυση της **photo IV** των δειγμάτων μετά το ψήσιμο διαπιστώσαμε ότι σε όλα τα δείγματα με ITO (pv1076-pv1078) υπήρξε μικρή αύξηση στο ρεύμα και σε κάποιες περιπτώσεις και στην τάση ενώ στο δείγμα αναφοράς (pv1079) υπήρξε πτώση. Το αντίθετο συνέβη με το συντελεστή πλήρωσης (fill factor), δηλαδή μειώθηκε σε όλα τα δείγματα με ITO (pv1076-pv1078) ενώ αυξήθηκε στο δείγμα αναφοράς (pv1079).

Στα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζονται με ψυχρές αποχρώσεις οι καμπύλες των δειγμάτων πριν το ψήσιμο ενώ με τις θερμές αποχρώσεις οι καμπύλες των δειγμάτων μετά το ψήσιμο. Η ίδια ένταση της απόχρωσης αντιστοιχεί στο ίδιο δείγμα πριν και μετά το ψήσιμο (π.χ. το έντονο ροζ και το έντονο μπλε αντιστοιχούν στο δείγμα pv1078 πριν και μετά το ψήσιμο).



Σχήμα 18. Τα δείγματα με το στρώμα του ΙΤΟ πριν και μετά το ψήσιμο α) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση β) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση γ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση γ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά των επαφών όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση δ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά των επαφών όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση δ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά των επαφών όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση. Το δείγμα αναφοράς πριν και μετά το ψήσιμο ε) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά των υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση. Το δείγμα του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε αυξανόμενη τάση στ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στ) στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος σταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στο στις μετρήσεις που πάρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος σταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος σταν εφαρμάρηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος σταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος του παρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος στα το μαρθηκαν από την πλευρά του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση στος στα του παρθηκαν από την πλευρα του υποστρώματος όταν εφαρμόζαμε μειούμενη τάση.

Στο συνολό τους οι αλλαγές που υπέστησαν τα δείγματα λόγω της θερμοκρασίας στους 100°C δεν ήταν αρκετά αξιόλογες. Γι' αυτό κιόλας δεν επαναλάβαμε αυτή την διαδικασία στην δεύτερη παρτίδα των δειγμάτων.

3.3. 2η παρτίδα δειγμάτων

Στην δεύτερη φάση των πειραμάτων φτιάζαμε δέκα ηλιακές κυψελίδες εκ των οποίων οι δύο είναι δείγματα αναφοράς όπως και στην πρώτη παρτίδα. Τα υπόλοιπα δείγματα έγουν ως επιπλέον στρώματα, ανάμεσα στο Spiro-OMeTAD και στις επαφές του χρυσού, το προστατευτικό στρώμα του μολυβδαινίου και το ITO. Σε όλα τα δείγματα το ITO εναποτέθηκε με sputtering με τον ρυθμό εναπόθεσης που αποδείγθηκε 0 πιο ευνοϊκός στην προηγούμενη παρτίδα (50W+100W+200W+400W+500W). Το μολυβδαίνιο εναποτέθηκε με διαφορετικά πάγη και με διαφορετικές συνθήκες εναπόθεσης σε κάθε δείγμα. Στο Σχήμα 19 απεικονίζονται τα στρώματα του κάθε δείγματος που φτιάξαμε με τα ονόματά τους. Όλες τις ηλιακές κυψελίδες τις φτιάξαμε δύο φορές γι' αυτό είναι συνολικά δέκα. Εκτός από τις ηλιακές ηλιακές κυψελίδες φτιάξαμε άλλα εφτά δείγματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 19. α) Δείγματα pv1115, pv1116 β) Δείγματα pv1117, pv1118 γ) Δείγματα pv1119, pv1120 δ) Δείγματα pv1121, pv1122 ε) Δείγματα pv1123 και pv1124.



Σχήμα 20. Δείγμα α) s2019 β) s2020 γ) Mo_10nm δ) Mo_20nm ε) 1125 στ) 1126 ζ) 1127.

Από την ανάλυση του **XRD** που κάναμε στα δεδομένα των ηλιακών κυψελίδων παρατηρήσαμε ότι οι καμπύλες τους είναι οι ίδιες με τις καμπύλες της 1ης παρτίδας. Επομένως καταλαβαίνουμε ότι και σε αυτήν την παρτίδα πετύχαμε την αναλογία του ιωδίου-βρωμίου να είναι 50%-50%, όπως ορίζεται από την συνταγή του περοβσκίτη που ακολουθήσαμε.

Μόνο οι ηλιακές κυψελίδες με τα επιπλέον στρώματα του μολυβδαινίου και του ΙΤΟ είχαν μια επιπλέον κορυφή στις ~39.39°, η οποία δεν προσδιορίσαμε από που προκύπτει.

Επίσης το δείγμα pv1122 είχε πέντε λιγότερες κορυφές από τα υπόλοιπα δείγματα, οι οποίες είναι στις ~26.46°, ~33.65°, ~51.45°, ~61.48° και στις ~65.46°. Από αυτό το δεδομένο και ότι από τις μετρήσεις της ΙV δεν περνάει ρεύμα, ίσως μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι είχε γίνει κάποιο λάθος κατά την παρασκευή του δείγματος και κατά συνέπεια δεν παίρνουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες των ηλιακών κυψελίδων από το XRD. Επειδή κάθε ηλιακή κυψελίδα έχει από μια όμοια της, πήραμε μέτρηση σε μόνο μια από τις δύο όμοιες. Επίσης φαίνονται και οι καμπύλες του XRD από τα δείγματα πάνω σε γυαλί 1125, 1126 και 1127.



Σχήμα 21. Οι καμπύλες του XRD των δειγμάτων α) pv1116, pv1118, pv1120, pv1122, pv1124 β) 1125, 1126 και 1127.

Ακολουθούν οι μετρήσεις της **PL** στις οποίες υποβάλαμε τα δείγματα με κωδικούς από pv1115 εώς pv1127 καθώς και ένα κομμάτι γυαλιού με FTO, δηλαδή ένα κομμάτι υποστρώματος από αυτό που έχουν οι ηλιακές κυψελίδες που φτιάξαμε. Να σημειωθεί ότι τα δείγματα 1125,1126 και 1127 είχαν ως υπόστρωμα μόνο γυαλί, χωρίς FTO.

Από την ανάλυση της PL του Σχήματος 22 παρατηρούμε ότι η γενική τάση των δειγμάτων στα οποία έχει εναποτεθεί MoO_x ή Mo και ITO είναι ότι η κορυφή του περοβσκίτη τείνει να εκπέμπει κατά μέσο όρο σε μεγαλύτερα μήκη κύματος. Αυτό μπορεί να είναι τυχαίο και να οφείλεται στις αρχικές συνθήκες κρυστάλλωσης του περοβσκίτη ή και να προκαλείται κατά τις προσθήκες εναπόθεσεις MoO_x, Mo και ITO που πιθανόν να αλλοιώνουν τον περοβσκίτη. Με τα παρόντα δεδομένα δεν μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποιο βέβαιο συμπέρασμα. Εάν συγκρίνουμε τις εντάσεις της PL μεταξύ "μπρος" και "πίσω" γεωμετρικής διέγερσης, για τα περισσότερα δείγματα δεν υπάρχει μια συστηματική διαφορά. Αυτό περιλαμβάνει τα δείγματα αναφοράς αλλά και αυτά με MoO_x/ITO και σημαίνει ότι είτε το στρώμα Spiro-OMeTAD είτε τα στρώματα MoO_x/ITO δεν δημιουργούν προβλήματα απορρόφησης στην διέγερση από την πάνω πλευρά. Αντίθετα, για τα δείγματα με Mo, που εναποτέθηκε με e-beam, παρατηρούμε ότι η μπροστινή διέγερση δίνει σημαντικά μικρότερη Ι_{PL} σε σχέση με την πίσω. Αυτό πιθανό να οφείλεται σε οπτική απορρόφηση λόγω του στρώματος Mo (βλ. παρακάτω φάσματα διαπερατότητας που φαίνεται να επιβεβαιώνουν).

Επίσης είτε τα δείγματα διεγείρονται από πάνω είτε από κάτω εκπέμπουν μια επιπλέον κορυφή στην περιοχή των 360nm εώς 430nm. Όπως βλέπουμε από το Σχήμα 24 το Spiro-OMeTAD (δείγμα 1127) αλλά και το FTO εκπέμπουν σε αυτές τις περιοχές. Οπότε όταν βλέπουμε εκπομπή στην περιοχή των 400nm, όταν διεγείρουμε το δείγμα από πάνω ευθύνεται το Spiro-OMeTAD, ενώ όταν διεγείρουμε το δείγμα από κάτω ευθύνεται το FTO.

Το FTO εκτός από την κορυφή κοντά στα 400nm, έχει μία επιπλέον κορυφή κοντά στα 700nm, δηλαδή κοντά στην εκπομπή του περοβσκίτη.

Όσον αφορά το δείγμα **1125** στο Σχήμα 23 η **εκπομπή** του περοβσκίτη είναι σχεδόν η **ίδια είτε** το δείγμα διεγείρεται **από πάνω είτε από κάτω**. Αντιθέτως στο δείγμα **1126** η κορυφή του περοβσκίτη έχει πολύ μεγάλη ένταση όταν διεγείρεται το δείγμα από πίσω ενώ **όταν διεγείρεται από πάνω η ένταση πέφτει 40 φορές**. Το τελευταίο θα μπορούσε να αποδοθεί σε υπερβολική απορρόφηση του Spiro-OMeTAD στο δείγμα 1126. Όμως τα αποτελέσματα cross-section SEM σε αυτό και άλλα δείγματα δεν συνηγορούν σε αυτό. Με άλλα λόγια, το πάχος Spiro-OMeTAD στο δείγμα 1126 φαίνεται αντίστοιχο αυτών στα άλλα δείγματα. Επομένως, αυτή τη στιγμή, δεν έχουμε κάποια προφανή εξήγηση για τον παράγοντα x40, και χρειάζονται πρόσθετα πειράματα.

Front x325 ND1.5 Back x325 ND1.5 600 pv1115 700 pv1115 . pv1116 pv1116 500 pv1117 600 pv1117 . pv1118 pv1118 . pv1119 500 pv1119 400 PL Intensity (a.u) PL Intensity (a.u) . pv1120 pv1120 . pv1121 pv1121 400 300 pv1122 pv1122 . pv1123 pv1123 300 pv1124 pv1124 200 200 100 100 0 600 λ (nm) 400 500 700 800 900 400 500 600 700 800 900 λ (nm) B) α)

Όλα τα σχετικά σχήματα βρίσκονται παρακάτω.

Σχήμα 22. Οι καμπύλες της PL των δειγμάτων pv1115- pv1124 α) με διέγερση από την πάνω και β) από την κάτω πλευρά.



Σχήμα 23. PL με διέγερση από την πάνω και από την κάτω πλευρά των δειγμάτων α) 1125 και β) 1126.



Σχήμα 24. Οι καμπύλες της PL των δειγμάτων 1127 και FTO α) με διέγερση από την πάνω και από την β) κάτω πλευρά.

Από το **cross-section** SEM που υποβάλαμε τα δείγματα pv1121, 1125,1126 και 1127 βρήκαμε τα πάχη για τα στρώματα που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

Στο δείγμα **pv1121** παρατηρούμε ότι το στρώμα του περοβσκίτη έχει ανομοιομορφία στο πάχος του ενώ τα υπόλοιπα στρώματα δεν εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις.

Στο δείγμα **1125** ο περοβσκίτης έχει μεγάλη ανομοιομορφία στο πάχος του κατά μήκος όλου του δείγματος. Αυτή η ανομοιομορφία όμως μένει ίδια και στο κέντρο και στην άκρη του δείγματος.

Στο δείγμα **1126** δεν ήταν ευκρινές που διαχωρίζεται το στρώμα του περοβσκίτη από το στρώμα του Spiro-OMeTAD γι' αυτό είναι σημειωμένο το συνολικό πάχος τους. Παρ' όλα αυτά καταλαβαίνουμε ότι ο περοβσκίτης έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε αντίθεση με το δείγμα 1125.

Στο δείγμα **1127** το πάχος του Spiro-OMeTAD είναι πολύ λεπτό, καθώς όπως φαίνεται το γυαλί δεν είναι η κατάλληλη επιφάνεια για να συγκρατήσει την ποσότητα του Spiro-OMeTAD που του εναποθέσαμε.

Τα πάχη του Μο στα δείγματα Mo_10nm και Mo_20nm μετρήθηκαν με A step και βρήκαμε ότι το δείγμα Mo_10nm έχει 13nm Mo ενώ το δείγμα Mo_20nm έχει 22nm Mo. Αντίστοιχα μετρήσαμε το πάχος του ITO που είχε εναποτεθεί σε ένα κομμάτι πυριτίου και βρήκαμε ότι ήταν 145nm. Τέλος με A step μετρήσαμε στα δείγματα s2019 και s2020 το συνολικό πάχος του MoO_x και του ITO, στο δείγμα s2019 βρήκαμε το πάχος του 200nm ενώ στο δείγμα s2020 βρήκαμε το πάχος του 160nm. Εφόσον ξέρουμε πόσο περίπου είναι το πάχος του ITO και το συνολικό πάχος του MoO_x και του ITO μπορούμε να εκτιμήσουμε πόσο είναι το πάχος του MoO_x. Επομένως το δείγμα s2019 έχει περίπου 55nm MoO_x ενώ το δείγμα s2020 περίπου 15nm MoO_x.



Σχήμα 25. Cross-section SEM του δείγματος pv1121 σε δύο διαφορετικά σημεία κατά μήκος της τομής.



Σχήμα 26. Εικόνα SEM του δείγματος pv1121 υπό γωνία 85° όπου φαίνεται η επιφάνεια του δείγματος.



Σχήμα 27. Cross-section SEM του δείγματος 1125 α) κάθετα και στο κέντρο της τομής β) κάθετα και στην άκρη της τομής γ) υπό γωνία όπου φαίνεται και η τομή και η επιφάνεια του δείγματος δ) υπό γωνία 85° όπου φαίνεται η επιφάνεια του δείγματος.





Σχήμα 28. Cross-section SEM του δείγματος 1126 α) υπό γωνία όπου φαίνεται και η τομή και η επιφάνεια του δείγματος β) κάθετα στην τομή και γ) υπό γωνία 85° όπου φαίνεται η επιφάνεια του δείγματος.



Σχήμα 29. Cross-section SEM του δείγματος 1127 α) κάθετα στην τομή και β) υπό γωνία 85° όπου φαίνεται η επιφάνεια του δείγματος.

Στην συνέχεια από την ανάλυση της **transmittance** βρήκαμε ότι το ενεργειακό χάσμα του περοβσκίτη κυμαίνεται στα 1.86eV.

Κατά την μέτρηση της transmittance στις μετρήσεις του Σχήματος 30 α) και β) η δέσμη χτυπούσε τα δείγματα από την μεριά του υποστρώματος ενώ στο Σχήμα 30 γ) η δέσμη χτυπούσε τα δείγματα από την μεριά του υλικού.

Παρατηρούμε ότι στα δείγματα που εναποτέθηκε το στρώμα του μολυβδαινίου με την τεχνική της e-beam εξάχνωσης υπέστησαν μεγάλη μείωση στην διαπερατότητα. Συγκεκριμένα η διαπερατότητα μειώνεται από 70% στα 750nm στο δείγμα pv1116 σε τιμές που φτάνουν το 20% στο δείγμα pv1122, κάτι που εξηγεί και τις μειωμένες εντάσεις της PL σε διεγέρσεις που έγιναν από πάνω στα δείγματα που περιέχουν Mo. Η υψηλή απορρόφηση του Mo, φαίνεται και στα δείγματα Mo/glass στο Σχήμα 30 γ).



Σχήμα 30. α) Transmittance του υποστρώματος (Glass Reference) και των ηλιακών κυψελίδων pv1116, pv1118, pv1120, pv1122, pv1124, β) των δειγμάτων 1125, 1126, 1127 και γ) των υποστρωμάτων γυαλιού με μολυβδαίνιο διαφορετικών παχών και τεχνικών εναπόθεσης.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα από τις photo IV μετρήσεις των καλύτερων καμπυλών από κάθε δείγμα, που μετρήθηκαν από την μεριά του υποστρώματος (bottom) σε αυξανόμενη (forward) και μειωμένη (reverse) τάση:



Σχήμα 31. Photo IV με φωτισμό από την μεριά του υποστρώματος με εφαρμογή α) αυξανόμενης τάσης και β) μειούμενης τάσης στα δείγματα pv1115-pv1124.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται ενδεικτικά οι καμπύλες από τις dark IV μίας διόδου αναφοράς (1115) και μίας διόδου Mo (1123).



Σχήμα 32. Dark IV με φωτισμό από την μεριά του υποστρώματος με εφαρμογή α) αυξανόμενης τάσης και β) μειούμενης τάσης στα δείγματα pv1115-pv1124.

Ακολουθούν πίνακες με την σύνοψη των αποτελεσμάτων της photo IV και dark IV. Στον πίνακα υπάρχουν τα δεδομένα μόνο του ενός από τα δύο όμοια δείγματα. Από κάθε δυάδα όμοιων δειγμάτων επιλέξαμε να δείξουμε αυτό με τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

contact	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	J _{sc} (mA/cm ²)	P _{max} (mW/cm ²)	Απόδοση η (%)	FF%
1sun_pv1115_bott_5f	0,929	1,882*10 ⁻⁵	1,882	0,952	0,952	54,450
1sun_pv1115_bott_5r	0,945	1,935*10 ⁻⁵	1,935	0,994	0,994	54,359
1sun_pv1117_bott_5f	0,076	1,818*10-6	0,182	0,003	0,003	21,689
1sun_pv1117_bott_5r	0,677	6 , 971*10 ⁻⁶	0,697	0,086	0,086	18,225
1sun_pv1119_bott_5f	0,111	2,503*10-6	0,250	0,007	0,007	25,225
1sun_pv1119_bott_5r	0,700	8,670*10 ⁻⁶	0,867	0,136	0,136	22,409
1sun_pv1121_bott_5f	0,534	5,241*10-5	5,241	0,820	0,820	29,299
1sun_pv1121_bott_5r	0,597	5,337*10 ⁻⁵	5,337	0,987	0,987	30,977
1sun_pv1123_bott_5f	0,652	5,140*10-5	5,14	1,376	1,376	41,059
1sun_pv1123_bott_5r	0,659	4,748*10-5	4,748	1,184	1,184	37,840

Δεδομένα	R _{shunt} (KΩ*cm ²)	Παράγοντας ιδανικότητας n	R _{series} (Ω*cm ²)
dark_pv1115_bott _3f	10,14	4,542	22,98
dark_pv1115_bott_3r	6,8	5,290	109,01
dark_pv1117_bott_6f	1,33	27,643	86,68
dark_pv1117_bott_6r	1,39	7,587	28,68
dark_pv1119_bott _5f	0,904	8,818	34,59
dark_pv1119_bott_5r	5,96	9,485	17,97
dark_pv1121_ bott _5f	0,11	6,225	0,83
dark_pv1121_bott_5r	0,11	9,625	1,30
dark_pv1123_bott_4f	0,288	4,814	0,58
dark_pv1123_bott_4r	0,572	5,714	1,27

Πίνακας 4. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της photo IV του καλύτερου δείγματος από κάθε δυάδα όμοιων δειγμάτων.

Πίνακας 5. Σύνοψη της ανάλυσης των καλύτερων μετρήσεων της dark IV, από την μεριά του υποστρώματος, του καλύτερου δείγματος από κάθε δυάδα όμοιων δειγμάτων.

Από την ανάλυση της ΙV των δειγμάτων διαπιστώνουμε τα παρακάτω:

- 1. Τα δείγματα δεν δούλεψαν από την μεριά των επαφών (front) με αποτέλεσμα να μην είναι ικανά να χρησιμοπιηθούν σε tandem δομές.
- 2. Οι διόδοι αναφοράς έχουν χαμηλό φωτόρευμα και απόδοση περίπου 1%.
- Στα δείγματα που το MoOx εναποτέθηκε με sputtering, οι δίοδοι έπαθαν ζημιά καθώς η απόδοσή τους έπεσε εώς και τρεις τάξεις μεγέθους.
- 4. Η εναπόθεση MoO_x με sputtering εκτός από τις αποδόσεις, χαλάει όλα τα χαρακτηριστικά των διόδων κατεβάζοντας τα R_{shunt} μία τάξη μεγέθους, ενώ οι τιμές R_{series} παραμένουν υψηλές. Επίσης οι παράγοντες ιδανικότητας "εκτοξεύτικαν".
- 5. Στα δείγματα που το Μο εναποτέθηκε με e-beam evaporation φαίνεται να προστατεύεται το Spiro-OMeTAD. Επίσης αυτά τα δείγματα απέδωσαν το ίδιο, και σε κάποιες περιπτώσεις (pv1123) καλύτερα από τα δείγματα αναφοράς, παρά το γεγονός της αυξημένης απορρόφησης του Mo.
- 6. Στις διόδους με "προστασία" Μο, έχουν επέλθει μεταβολές παρά το γεγονός ότι η απόδοση τους έχει κρατηθεί στα ίδια ή και καλύτερα επίπεδα (~1.4%). Όμως παρατηρήθηκαν αντίρροπα φαινόμενα τόσο στις photo IV όσο και στις dark IV. Παρατηρούμε μείωση του V_{oc} περίπου στο 60%, και αύξηση του J_{sc} έως και 2.5 φορέ. Παράλληλα, το FF% μειώνεται από 40-50% σε 25-30%.
- Με βάση τις dark IV, η μέτρια απόδοση των διόδων αναφοράς οφείλεται κυρίως στις υψηλές σειριακές αντιστάσεις (R_{series}) των δειγμάτων αναφοράς.

- 8. Επίσης από τις dark IV,στα δείγματα που το Mo εναποτέθηκε με e-beam evaporation παρατηρούμε, περαιτέρω μείωση του R_{shunt} σε ενοχλητικά χαμηλές τιμές, αλλά από την άλλη βλέπουμε μία αισθητή μείωση του R_{series} σε επίπεδα καλών κυψελίδων.
- 9. Σε γενικές γραμμές οι μετρήσεις που πάρθηκαν με μειούμενη τάση (reverse) έχουν καλύτερη απόδοση από τις μετρήσεις που πάρθηκαν με αυξανόμενη τάση (forward).

4. Ανάλυση XPS

Σε μετρήσεις **XPS** υποβάλαμε δείγματα πυριτίου που από πάνω έχει εναποτεθεί Μο με την τεχνική e-beam evaporation. Το κάθε δείγμα έχει διαφορετικό πάχος Mo.

Από την ανάλυση του XPS μπορέσαμε να βρούμε αν το μέταλλο του μολυβδαινίου έχει οξειδωθεί και σε τι ποσοστό το συναντάμε στα δείγματά μας, σε σχέση με το σκέτο μέταλλο που δεν έχει οξειδωθεί.

Συνολικά φτιάξαμε τέσσερα δείγματα με πάχη 14nm, 32nm, 10nm και 20nm μολυβδαινίου. Όταν γινόταν η εναπόθεση του Μο στα δείγματα με πάχος 14nm και 32nm Μο στον θάλαμο στον οποίο γινόταν η εναπόθεση είχε γίνει προσπάθεια να απομακρυνθεί το οξυγόνο. Αντιθέτως στα δείγματα με πάχος 10nm και 20nm Μο δεν είχε γίνει κάποια τέτοια διεργασία στον θάλαμο.



Παρακάτω βλέπουμε την ανάλυση των φασμάτων του XPS:

Σχήμα 33. Φάσματα του XPS στην περιοχή Mo3d των δειγμάτων α) 14nm Mo/Si και β) 32nm Mo/Si.



Σχήμα 34. Φάσματα του XPS στην περιοχή Mo3d των δειγμάτων α) 10nm Mo/Si και β) 20nm Mo/Si.

Από τα φάσματα των δειγματών βρήκαμε ότι το R (επί τις εκατό κλάσμα οξειδωμένου Mo) είναι 46.4% και 34.9% για τα δείγματα 14 nm Mo/Si και 32 nm Mo/Si, αντίστοιχα. Ενώ για τα δείγματα 10 nm Mo/Si και 20 nm Mo/Si είναι 2.5% και 27.4%, αντίστοιχα. Αυτά τα δεδομένα μας προκαλούν έκπληξη, καθώς φαίνεται ότι η πρώτη δυάδα δειγμάτων που φτιάξαμε έχει οξειδωθεί περισσότερο από την δεύτερη ενώ περιμέναμε το αντίθετο, από την στιγμή που είχε γίνει προσπάθεια να μειωθεί το οξυγόνο που βρισκόταν μέσα στον θάλαμο.

Επίσης στην πρώτη δυάδα δειγμάτων βλέπουμε ότι το πιο λεπτό στρώμα του μολυβδαινίου (14nm) έχει οξειδωθεί περισσότερο ενώ στην δεύτερη δυάδα δειγμάτων παρατηρούμε ακριβώς το αντίθετο.

Από την στιγμή που τα δεδομένα αντιφάσκουν μεταξύ τους δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα. Είναι φανερό ότι το συγκεκριμένο πείραμα πρέπει να επαναληφθεί για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε αν υπάρχει κάποια επαναληψιμότητα ή αν υπάρχει τυχαιότητα στο ποσοστό οξείδωσης του μολυβδαινίου.

5. Συμπεράσματα

Στην αρχή της διπλωματικής εργασίας φτιάξαμε τρία δείγματα με διαφορετικές συνθήκες εναπόθεσης sputtering του ITO ώστε να βρούμε την λιγότερο επιβλαβή συνθήκη για το στρώμα του Spiro-OMeTAD. Ολοκληρώνοντας την ανάλυση της 1ης παρτίδας των δειγμάτων διαπιστώσαμε ότι η **ιδανική συνθήκη sputtering του ITO** είναι όταν η ισχύ μεταβάλλεται σταδιακά **από 50W σε 100W** μετά σε 200W σε 400W και τέλος στα 500W. Αυτό σημαίνει ότι όταν εναποθέτονται τα πρώτα νανόμετρα του ITO πάνω από το Spiro-OMeTAD η ισχύς είναι μικρή και όσο αυξάνεται το πάχος του ITO ολοένα και αυξάνεται. Παρ' όλα αυτά ήταν εμφανές ότι το **ITO προκάλεσε ζημιά στα δείγματα** καθώς η απόδοσή τους έπεσε έως και δύο τάξεις μεγέθους.

Στην συνέχεια ψήσαμε τα δείγματα στους 100°C για να εξετάσουμε αν θα βελτιωθούν υπό μία τέτοια συνθήκη, αλλά δεν υπήρξε κάποια αξιοσημείωτη διαφορά.

Ακολούθησε η 2η παρτίδα των δειγμάτων όπου το αντικείμενο έρευνας ήταν το προστατευτικό στρώμα του μολυβδαινίου. Εξετάσαμε δύο διαφορετικά πάχη μολυβδαινίου (10nm, 20nm) με δύο διαφορετικές τεχνικές εναπόθεσης (sputtering, e-beam evaporation). Διαπιστώσαμε ότι **στα δείγματα** που το MoOx εναποτέθηκε με sputtering επέδρασε αρνητικά. Αντιθέτως στα δείγματα που το Mo εναποτέθηκε με e-beam evaporation λειτούργησε ως προστασία για τα προηγούμενα στρώματα. Το δείγμα pv1123, μάλιστα, απέδωσε συνολικά καλύτερα από τα δείγματα αναφοράς. Παρατηρήθηκαν, όμως, και αντίρροπες τάσεις από την επίδραση του "Mo". Ενώ μειώθηκε το R_{series} έως και μία τάξη μεγέθους και αυξήθηκε το φωτόρευμα των διόδων κατά ένα παράγοντα x2.5, από την άλλη, το R_{shunt} μειώθηκε εξίσου πολύ σε ενοχλητικά για το Φ/Β φαινόμενο επίπεδα, αλλά και το V_{oc} κατά ένα παράγοντα δύο. Συνολικά, παρατηρήσαμε οριακή αύξηση της απόδοσης από ~1% σε ~1.4%.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καταλαβαίνουμε ότι δεν ευθύνεται τόσο το υλικό που έρχεται σε επαφή με το Spiro-OMeTAD για την "καταστροφή" των δειγμάτων όσο η βίαιη τεχνική εναπόθεσης του sputtering.

Ένα από τα αρνητικά που διαπιστώσαμε ότι έχει το στρώμα του μολυβδαινίου όταν εναποτέθηκε με sputtering αλλά ιδιαιτέρως όταν εναποτέθηκε με e-beam evaporation είναι ότι η διαπερατότητα μειώθηκε κατακόρυφα. Κάτι το οποίο θα ήταν απαγορευτικό σε εφαρμογή tandem όπου ο συνδιασμός Mo/ITO οφείλει να είναι οπτικά διαπερατός.

Βιβλιογραφία

- 1. Best Research-Cell Efficiency Chart. (n.d.). Retrieved July 6, 2023, from https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html
- Rong, Y., Hu, Y., Mei, A., Tan, H., Saidaminov, M. I., Seok, S. I., McGehee, M. D., Sargent, E. H., & Han, H. (2018). Challenges for commercializing perovskite solar cells. *Science*, 361(6408), eaat8235. <u>https://doi.org/10.1126/science.aat8235</u>
- Green, M. A., Ho-Baillie, A., & Snaith, H. J. (2014). The emergence of perovskite solar cells. *Nature Photonics*, 8(7), 506–514. <u>https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.134</u>
- Akkerman, Q. A., & Manna, L. (2020). What Defines a Halide Perovskite? ACS Energy Letters, 5(2), 604–610. <u>https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c00039</u>
- Hoefler, S. F., Trimmel, G., & Rath, T. (2017). Progress on lead-free metal halide perovskites for photovoltaic applications: A review. *Monatshefte Für Chemie - Chemical Monthly*, 148(5), 795–826. <u>https://doi.org/10.1007/s00706-017-1933-9</u>
- Chen, X., Jia, Z., Chen, Z., Jiang, T., Bai, L., Tao, F., Chen, J., Chen, X., Liu, T., Xu, X., Yang, C., Shen, W., Sha, W. E. I., Zhu, H., & Yang, Y. (Michael). (2020). Efficient and Reproducible Monolithic Perovskite/Organic Tandem Solar Cells with Low-Loss Interconnecting Layers. *Joule*, 4(7), 1594–1606. <u>https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.06.006</u>
- 7. *Band Gap / PVEducation*. (n.d.). Retrieved October 18, 2023, from <u>https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/band-gap</u>
- Bett, A. J., Winkler, K. M., Bivour, M., Cojocaru, L., Kabakli, Ö. Ş., Schulze, P. S. C., Siefer, G., Tutsch, L., Hermle, M., Glunz, S. W., & Goldschmidt, J. C. (2019). Semi-Transparent Perovskite Solar Cells with ITO Directly Sputtered on Spiro-OMeTAD for Tandem Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *11*(49), 45796–45804. https://doi.org/10.1021/acsami.9b17241
- Hong, S., & Lee, J. (2023). Recent Advances and Challenges toward Efficient Perovskite/Organic Integrated Solar Cells. *Energies*, 16(1), Article 1. <u>https://doi.org/10.3390/en16010266</u>
- Bremner, Levy, M. Y., & Honsberg, C. B. (2008). Analysis of tandem solar cell efficiencies under {AM1.5G} spectrum using a rapid flux calculation method. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16, 225–233. <u>https://doi.org/10.1002/pip.799</u>
- Kanda, H., Uzum, A., Baranwal, A. K., Peiris, T. A. N., Umeyama, T., Imahori, H., Segawa, H., Miyasaka, T., & Ito, S. (2016). Analysis of Sputtering Damage on *I V* Curves for Perovskite Solar Cells and Simulation with Reversed Diode Model. *The Journal of Physical Chemistry C*, *120*(50), 28441–28447. <u>https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b09219</u>
- Madani, S., Tesfamichael, T., Motta, N., & Wang, H. (2022). Simulation of perovskite solar cells using molybdenum oxide thin films as interfacial layer for enhancing device performance. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00426. <u>https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00426</u>
- Jiang, Q., Zhao, Y., Zhang, X., Yang, X., Chen, Y., Chu, Z., Ye, Q., Li, X., Yin, Z., & You, J. (2019). Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells. *Nature Photonics*, 13(7), 460–466. <u>https://doi.org/10.1038/s41566-019-0398-2</u>
- Sneha, K., Esterle, A., Sharma, N., & Sahi, S. (2014). Yucca-derived synthesis of gold nanomaterial and their catalytic potential. *Nanoscale Research Letters*, 9, 627. <u>https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-627</u>