

ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΝΑΝΟΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ ΜΕ Cu, Co ΚΑΙ Se ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΚΥΨΕΛΙΔΕΣ

Δ. Τσιχλές¹, Λ. Γκιβάλου^{1,2,*}, Α. Ντζιούνη¹, Μ. Τσαρπαλή¹, Π. Φαλάρας², Χ. Σ. Καραγιάννη¹, Κ. Κορδάτος^{1,*}

¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα

²Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», Αθήνα, Ελλάδα

(*kordatos@central.ntua.gr, l.givalou@inn.demokritos.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται η σύνθεση και ο χαρακτηρισμός νανοϋβριδικών υλικών οξειδίου του γραφενίου (GO) με χαλκό (Cu) ή/και κοβάλτιο (Co) ή/και σελήνιο (Se), καθώς και η χρήση των υλικών αυτών ως ηλεκτρόδια καθόδου σε φωτοβολταϊκά κελιά ευαισθητοποιημένα με κβαντικές τελείες. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η σύνθεση του GO, με την τροποποιημένη μέθοδο Hummers, κάνοντας χρήση ισχυρών οξειδωτικών αντιδραστηρίων και στη συνέχεια το GO τροποποιήθηκε με τη χρήση των επιφανειοδραστικών CTAB και PSS. Τα προκύπτοντα υλικά διακοσμήθηκαν με Cu ή/και Co ή/και Se, μέσω διαλυτοθερμικής κατεργασίας με τα αντίστοιχα χλωριόντα των μετάλλων Cu και Co, και το Se αυτοτελές, είτε σε αυτόκλειστο από ανοξειδωτο ατσάλι ή σε αντιδραστήρα μικροκυμάτων, με σκοπό την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων τόσο για τα τελικά προϊόντα όσο και για τις ίδιες τις μεθόδους. Έπειτα, εξετάστηκε η επίδραση της συγκέντρωσης των πρόδρομων μεταλλικών αλάτων στα χαρακτηριστικά του τελικού υλικού χρησιμοποιώντας αναλογίες μαζών 1/4,5 και 1/9 για τα υλικά GO/Cu και GO/Co και 1/4,5, 1/9 και 1/18 για τα GO/(Cu-Co) και GO/(Cu-Se), αντίστοιχα [1-5]. Τα παραγόμενα νανοϋβριδικά υλικά (GO/Cu, GO/Co, GO/(Cu-Co) και GO/(Cu-Se)) χαρακτηρίστηκαν μορφολογικά, δομικά και ηλεκτροχημικά με ενόργανες χημικές μεθόδους ανάλυσης, όπως Περίθλαση Ακτίνων-Χ (XRD), Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης – Εκπομπής Πεδίου (SEM-FESEM) καθώς και με ηλεκτροχημικές μεθόδους, όπως γραμμική βολταμετρία σάρωσης (LSV) και Φασματοσκοπία Ηλεκτροχημικής Εμπέδησης (EIS). Τέλος, τα υλικά αυτά ενσωματώθηκαν ως αντίθετα ηλεκτρόδια (CE) σε ηλιακές κυψελίδες ευαισθητοποιημένες με κβαντικές τελείες (CdS-ZnS/CdSe) με στόχο τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών τους. Τα ηλιακά κελιά λειτούργησαν αποτελεσματικά παρουσιάζοντας υψηλές τιμές πυκνότητας φωτορεύματος (J_{sc}) και τάσης ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) που οδηγούν σε αυξημένη απόδοση. Η βελτιστοποίηση της ηλεκτροκαταλυτικής δραστηριότητας ως συνάρτηση της αναλογίας μαζών GO/(Cu-Co) και GO/(Cu-Se) έχει ως αποτέλεσμα την παρασκευή φωτοβολταϊκών κελιών με μέγιστη απόδοση 8,73%.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το γραφένιο, το οποίο αποτελεί μια αλλοτροπική μορφή άνθρακα, είναι ένας δισδιάστατος κρύσταλλος αποτελούμενος αποκλειστικά από άτομα άνθρακα ισχυρώς συνδεδεμένα μεταξύ τους, τα οποία είναι τοποθετημένα πάνω στις κορυφές κανονικών εξαγώνων, δημιουργώντας κυψελοειδή δομή [6]. Διακρίνεται σε τρεις τύπους, ανάλογα με την πολυπλοκότητα του ηλεκτρονικού φάσματος που εμφανίζει: Στο μονοστρωματικό γραφένιο πάχους ενός ατόμου άνθρακα, στο διστρωματικό γραφένιο πάχους δύο ατόμων άνθρακα και στο πολυστρωματικό γραφένιο πάχους από τρία έως δέκα άτομα άνθρακα. Για πάχη μεγαλύτερα από 10 άτομα άνθρακα θεωρείται ότι έχουμε τρισδιάστατη δομή γραφίτη [7]. Το γραφένιο διακρίνεται για τις εξαιρετικές ιδιότητες που διαθέτει, οι οποίες είναι χημικές, ηλεκτρονικές, οπτικές, θερμικές και μηχανικές.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα νανοϋβριδικά υλικά του γραφενίου και των παραγώγων του, όπως το οξείδιο του γραφενίου, σε συνδυασμό με διάφορες μεταλλικές ενώσεις όπως οξείδια, νιτρίδια, ανόργανα υλικά και χαλκογενίδια. Μερικά χαλκογενίδια που έχουν αναφερθεί είναι ZnSe, CdSe, CdS και CuTe. Τα μαγνητικά και ημιαγώγιμα νανοϋλικά είναι αυτά που έχουν μεγαλύτερο

ενδιαφέρον από το μεγάλο εύρος των μεταλλικών ενώσεων που προαναφέρθηκαν. Αυτό το ενδιαφέρον οφείλεται στο γεγονός ότι πραγματοποιείται μεταφορά φορτίου μεταξύ των γραφενικών επιπέδων και των ημιαγωγών ή μαγνητικών νανοσωματιδίων καθώς και στις ηλεκτρονικές ή μαγνητικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν. Στις μέρες μας, τα υβριδικά υλικά που είναι βασισμένα στο γραφένιο ή στο οξειδίο του γραφενίου θεωρούνται ως μια λύση με πολλές προοπτικές για υλικά ηλεκτροδίων σε διάφορες συσκευές που σχετίζονται με την ενέργεια. Αυτό συμβαίνει επειδή τα υλικά αυτά έχουν υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα, υψηλή ειδική επιφάνεια, χημική σταθερότητα και πολύ καλές μηχανικές αντοχές. Πρόσφατες μελέτες ερεύντησαν την εφαρμογή των νανοϋβριδικών υλικών σε συσκευές μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας. Τέτοιες συσκευές είναι υπερπυκνωτές, μπαταρίες Li ιόντων, κελιά καυσίμου και φωτοβολταϊκά πάνελ [6,8,9,10].

Τα νανοσωματίδια των μετάλλων μετάπτωσης έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως αντίθετα ηλεκτρόδια (CEs) σε ηλιακές κυψελίδες ευαισθητοποιημένες με κβαντικές τελείες. Τα νανοσύνθετα υλικά μετάλλου-άνθρακα είναι πολύ αποδοτικοί καταλύτες στις αντιδράσεις αναγωγής, με ενισχυμένη ηλεκτροκαταλυτική απόδοση η οποία σχετίζεται με τη ζώνη d των μετάλλων μετάπτωσης. Παρουσιάζουν επίσης μια εξάρτηση της αντίδρασης αναγωγής από τη σύσταση των ενσωματωμένων μετάλλων [11]. Λαμβάνοντας υπόψη τη σταθερότητα και την υψηλή δραστηριότητα των ηλεκτροδίων που αποτελούνται από μέταλλα και υλικά γραφενίου [12,13], το οξειδίο του γραφενίου (GO) έχει χρησιμοποιηθεί στην εργασία μας ως υπόστρωμα για διακόσμηση με μέταλλα (Cu, Co) ή διμεταλλικά υλικά (Cu-Co), τα οποία προσδίδουν τη χημική αντοχή και επομένως τη σταθερότητα που είναι απαραίτητη στα ηλεκτρόδια καθόδου.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Παραγωγή Οξειδίου του Γραφενίου

Η παραγωγή του οξειδίου του γραφενίου έγινε από καθαρή σκόνη γραφίτη σύμφωνα με την τροποποιημένη μέθοδο Hummers, η οποία περιλαμβάνει την ανάμιξη του γραφίτη σε διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4), νιτρικού νατρίου ($NaNO_3$) και υπερμαγγανικού καλίου ($KMnO_4$) [14].

Παραγωγή Νανοϋβριδικών υλικών

Το οξειδίο του γραφενίου (GO) ενεργοποιήθηκε με την προσθήκη δύο πολυηλεκτρολυτών, του CTAB (κατιονικός) και του PSS (ανιονικός). Ακολούθησε η δημιουργία διαφορετικών διαλυμάτων καθένα από τα οποία περιελάμβανε διαφορετική ποσότητα πρόδρομων μεταλλικών αλάτων, με τη χρήση υπερήχων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε θέρμανση σε αυτόκλειστο Teflon ή σε αντιδραστήρα μικροκυμάτων και παραλαβή των τελικών υλικών ύστερα από διήθηση και ξήρανση.

Σχηματισμός των κβαντικών τελειών CdS-ZnS μέσω της μεθόδου SILAR

Οι κβαντικές τελείες CdS-ZnS προσροφήθηκαν στις μεμβράνες TiO_2 με τη μέθοδο της διαδοχικής προσρόφησης και αντίδρασης (SILAR), βελτιστοποιώντας την προσέγγιση που αναφέρεται στη βιβλιογραφία [15].

Σχηματισμός των κβαντικών τελειών CdSe με τη μέθοδο της χημικής απόθεσης σε λουτρό (CBD)

Οι κβαντικές τελείες CdSe εναποτέθηκαν στις κβαντικές τελείες CdS-ZnS, χρησιμοποιώντας μια τροποποίηση της τεχνικής της χημικής απόθεσης σε λουτρό (CBD), που περιγράφεται στη βιβλιογραφία [16].

Σχηματισμός του στρώματος παθητικοποίησης ZnS

Το στρώμα παθητικοποίησης ZnS προστέθηκε πάνω από τις κβαντικές τελείες χρησιμοποιώντας 4 κύκλους SILAR [17].

Κατασκευή των ηλιακών κελιών

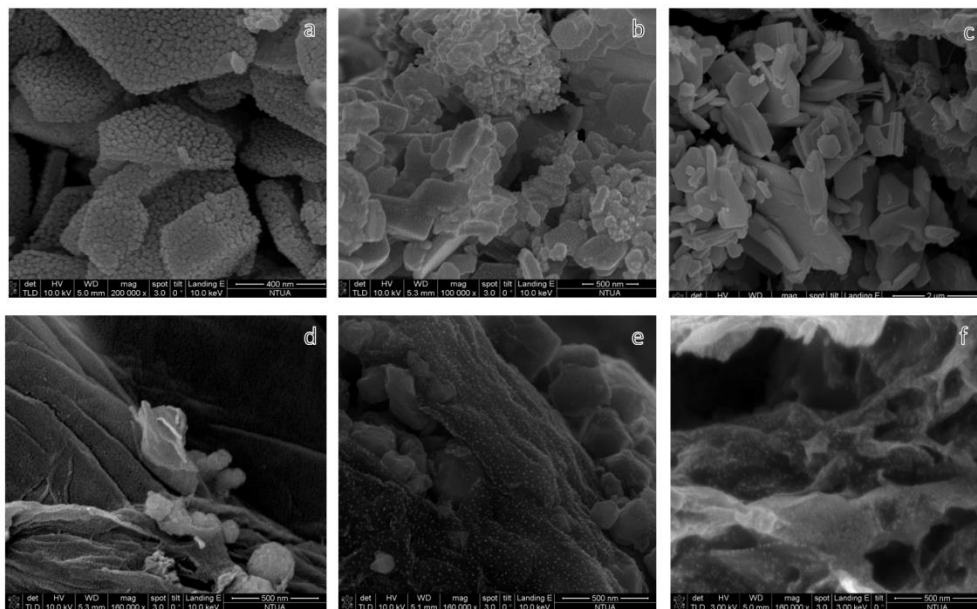
Τα προκύπτοντα υλικά με βάση το GO (GO/Cu ή GO/Co ή GO/(Cu-Co) ή GO/(Cu-Se)) αναμείχθηκαν με PVDF (10% κ.β.) και σε διαλύτη 1-μεθυλο 2-πυρρολιδινόνη και το μίγμα τοποθετήθηκε με τη μέθοδο doctor blade σε γυαλί FTO. Τα υλικά ηλεκτροδίων ξηράθηκαν σε φούρνο στους $120^\circ C$ υπό κενό για 12 ώρες [18]. Τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου συναρμολογήθηκαν σε ένα ηλιακό κελί

τύπου σάντουιτς. Ο χώρος στο εσωτερικό του κελιού πληρώθηκε με υδατικό ηλεκτρολύτη πολυσουλφιδίων που περιείχε $2,0 \text{ mol L}^{-1} \text{ Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $2,0 \text{ mol L}^{-1} \text{ S}$ και $0,2 \text{ mol L}^{-1} \text{ KCl}$, αντίστοιχα. Το διάλυμα παρασκευάστηκε με συνεχή ανάδευση του μίγματος στους $70\text{-}80^\circ\text{C}$ για περίπου 20 λεπτά. Ως εκ τούτου, η δομή των ηλιακών κυψελίδων ευαισθητοποιημένων με κβαντικές τελείες (QDSCs) είναι η ακόλουθη: ZnS / CdSe / CdS-ZnS / TiO_2 // ηλεκτρολύτης // GO (Cu-Co) ή GO/(Cu-Se)

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μορφολογικός Χαρακτηρισμός

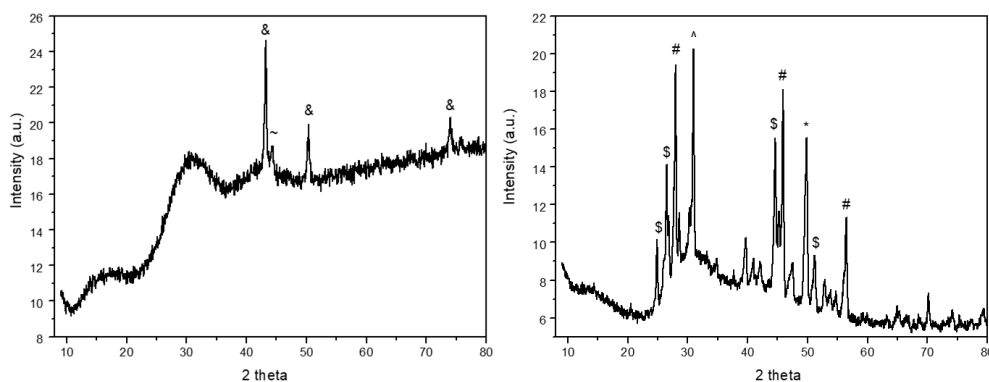
Η μορφολογία των υλικών GO/Cu, GO/Co, GO/(Cu-Co) και GO/(Cu-Se) εξετάστηκε με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης εκπομπής πεδίου (FESEM). Η Εικόνα 1 παρουσιάζει τις εικόνες SEM του υλικού GO/(Cu-Se) στις αναλογίες 1/4,5 (a) και 1/9 (b) σε αυτόκλειστο και στην αναλογία 1/4,5 (c) σε αντιδραστήρα μικροκυμάτων. Η εικόνα 1(d) παρουσιάζει το δείγμα GO/Cu σε αναλογία 1/4,5, η 1(e) το δείγμα GO/Co σε αναλογία 1/4,5 και η 1(f) το δείγμα GO/(Cu-Co) σε αναλογία 1/4,5 όλα παρασκευασμένα σε αυτόκλειστο. Στις εικόνες 1(a), (b) και (c) πιστοποιείται ο επιτυχής σχηματισμός των νανοσωματιδίων CuSe πάνω στα νανοφύλλα του GO. Στα δείγματα που παρασκευάστηκαν με τη χρήση αυτόκλειστου δοχείου παρατηρείται μεγαλύτερη ανάπτυξη νανοσωματιδίων. Σημαντικό ρόλο φαίνεται να παίζει η ποσότητα της πρόδρομης ουσίας CuSe τόσο στον αριθμό των σχηματιζόμενων νανοσωματιδίων όσο και στην μορφολογία τους. Όπως προκύπτει από τα δείγματα (a) και (b) παρατηρείται ο πυκνότερος σχηματισμός νανοσωματιδίων πάνω στη γραφενική επιφάνεια του GO με την αύξηση της ποσότητας της πρόδρομης ουσίας. Στις εικόνες 1(d), (e) και (f) πιστοποιείται ο επιτυχής σχηματισμός των νανοσωματιδίων Cu, Co και Cu-Co πάνω στα νανοφύλλα του GO. Η εναπόθεση νανοσωματιδίων Cu και Co στο GO συνεπάγεται την περαιτέρω σταθεροποίηση της δομής του GO, η οποία αποτελείται από λεπτά στρώματα με μη συσσωματωμένα νανοφύλλα που έχουν κενά μεταξύ τους. Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν νανοσωματίδια με σφαιρικό ελλειψοειδές σχήμα που διατηρούν τη μορφολογία και την κατανομή τους. Η ανάλυση SEM δείχνει ότι το μέγεθος σωματιδίων κυμαίνεται από 5 έως 30 nm.



Εικόνα 1. Εικόνες SEM του υλικού GO/(Cu-Se) στις αναλογίες 1/4,5 (a) και 1/9 (b) σε αυτόκλειστο και στην αναλογία 1/4,5 (c) σε αντιδραστήρα μικροκυμάτων και των υλικών GO/Cu σε αναλογία 1/4,5 (d), GO/Co σε αναλογία 1/4,5 (e) και GO/(Cu-Co) σε αναλογία 1/4,5 (f).

Δομικός Χαρακτηρισμός

Για την κατανόηση των ιδιοτήτων των σύνθετων υβριδικών υλικών, τα δείγματα εξετάστηκαν με περίθλαση ακτίνων Χ (XRD). Στο Σχήμα 1 στην αριστερή εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα XRD για το υλικό GO/(Cu-Co) και στη δεξιά εικόνα το διάγραμμα XRD για το υλικό GO/(Cu-Se). Στην αριστερή εικόνα, οι κορυφές στις 43,26, 50,42 και 74,04° μοίρες αντιστοιχούν στο Cu ενώ η κορυφή στις 44,29° μοίρες αντιστοιχεί στο Co. Στη δεξιά εικόνα, οι κορυφές στις 24,87, 26,54, 44,50 και 51,16° μοίρες αντιστοιχούν στη β φάση του CuSe. Οι κορυφές στις 28,10, 45,91 και 56,42° μοίρες αντιστοιχούν στο CuSe, η κορυφή στις 30,10° μοίρες στη γ φάση του CuSe και η κορυφή στις 49,88° μοίρες στο Cu₃Se₂.



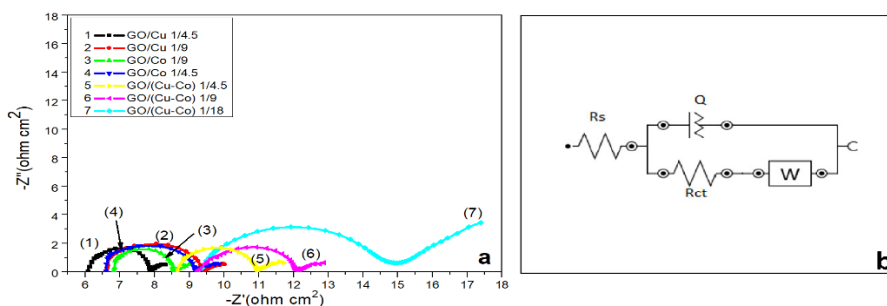
Σχήμα 1. Διάγραμμα XRD για το υλικό GO/(Cu-Co) (αριστερά) και διάγραμμα XRD για το υλικό GO/(Cu-Se) (δεξιά).

Ηλεκτροχημικός Χαρακτηρισμός

Ο χαρακτηρισμός των κατασκευασμένων ηλεκτροδίων έγινε με την ενσωμάτωση όμοιων υβριδικών υλικών GO/Co-Cu και στις τρεις αναλογίες καθώς και GO/Co και GO/Cu στις δύο αναλογίες το καθένα (ενεργή περιοχή 0,24 cm²) σε συμμετρικές φ/β κυψελίδες τύπου: FTO/GO-Cu-Co//ηλεκτρολύτης//GO-Cu-Co/FTO, που περιέχουν τον ίδιο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιήθηκε στις ευαίσθητοποιημένες ηλιακές κυψελίδες (QDSSCs), έναν υδατικό πολυσουλφιδικό ηλεκτρολύτη που περιέχει 2,0 mol L⁻¹ Na₂S·9H₂O, 2,0 mol L⁻¹ S και 0,2 mol L⁻¹ KCl.

Τα δείγματα παρουσιάζουν υψηλές τιμές φωτορεύματος (J_{lim}) και χαμηλές τιμές συνολικής αντίστασης κυψελίδας (R_{cell}).

Πληροφορίες για την ηλεκτροκαταλυτική δραστηριότητα των κατασκευασμένων ηλεκτροδίων και για τη συμβατότητά τους με τον πολυσουλφιδικό ηλεκτρολύτη λήφθηκαν με τις **μετρήσεις εμπέδησης** χρησιμοποιώντας ένα κελί με τρία ηλεκτρόδια που αποτελούνταν από τα υβριδικά υλικά GO/Co, GO/Cu και GO/Co-Cu σαν ηλεκτρόδια εργασίας, από Pt σαν αντίθετο ηλεκτρόδιο και το Ag/AgCl σαν ηλεκτρόδιο αναφοράς.

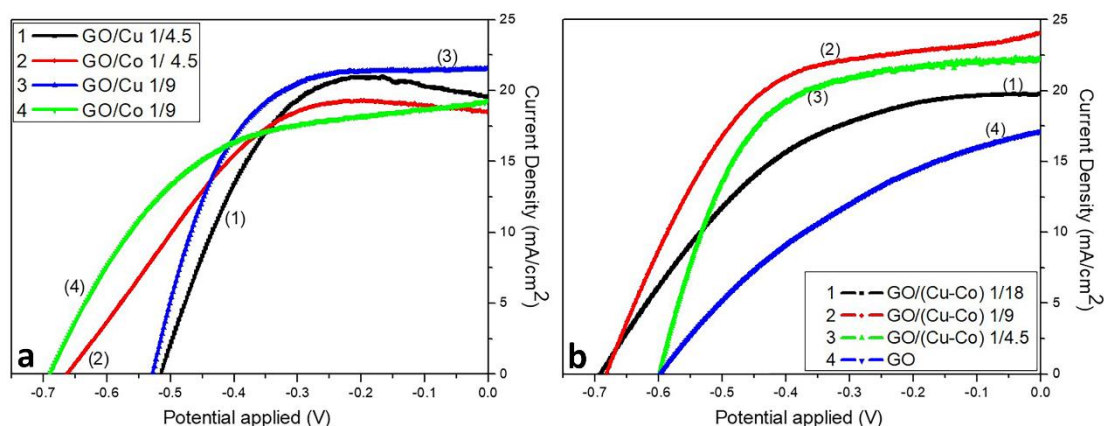


Σχήμα 2. Διαγράμματα Nyquist των υλικών GO/Cu, GO/Co και GO/(Cu-Co) σε αναλογία 1/4,5 (a) και το ισοδύναμο κύκλωμα (b).

Τα δείγματα παρουσιάζουν χαμηλές τιμές αντίστασης μεταφοράς φορτίου (R_{ct}), η οποία αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας του πρόδρομου μετάλλου. Στα δείγματα με χαμηλότερη R_{ct} , η αναγωγή του ζεύγους οξειδοαναγωγής στην διεπιφάνεια CE/ηλεκτρολύτη είναι πιο αποτελεσματική, γεγονός που οδηγεί στην αναγέννηση των κβαντικών τελειών (QDs) στην διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη/φωτοανόδου και βελτιώνει τη μέγιστη τιμή της πυκνότητας του ρεύματος για μηδενική τάση (J_{sc}). Έτσι, τα υλικά με αναλογία 1/4,5 παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές R_{ct} : 1,737, 1,825 και 2,309 ohm/cm^2 για τα υλικά GO/Co, GO/Cu και GO/(Cu-Co), αντίστοιχα. Στη συνέχεια, υψηλότερες τιμές R_{ct} παρουσιάζουν τα υλικά με αναλογία 1/9: 2,568, 2,833 και 2,869 ohm/cm^2 για τα υλικά GO/Co, GO/Cu και GO/(Cu-Co), αντίστοιχα. Τέλος, το δείγμα GO/(Cu-Co) με αναλογία 1/18 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή R_{ct} (5,679 ohm/cm^2).

Φωτοβολταϊκή απόδοση

Τα χαρακτηριστικά διαγράμματα J-V καταγράφηκαν με γραμμική βολταμετρία σάρωσης (LSV) σε λειτουργία δύο ηλεκτροδίων με ρυθμό σάρωσης στα 20 mVs^{-1} . Τα νανοϋβριδικά υλικά χρησιμοποιήθηκαν ως αντίθετα ηλεκτρόδια σε ευαίσθητοποιημένες ηλιακές κυψελίδες κβαντικών τελειών (QDSSCs) με φωτοηλεκτρόδια ZnS/CdSe/CdS-ZnS/TiO₂. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3 και στον Πίνακα 1.



Σχήμα 3. Διαγράμματα J-V για δείγματα GO/Cu, GO/Co (a) και GO/(Cu-Co) (b)

Τα αντι-ηλεκτρόδια λειτουργούν αποτελεσματικά σε όλες τις αναλογίες τόσο για το Co όσο και για το Cu αλλά και για τον συνδυασμό τους. Όλες οι ηλιακές κυψελίδες έχουν παρόμοιες υψηλές τιμές πυκνότητας φωτορεύματος (μεγαλύτερη των 19mA/cm^2). Επιπλέον, παρατηρείται ότι με την αύξηση της ποσότητας των μετάλλων, αυξάνονται οι τιμές των ηλεκτρικών παραμέτρων των αντίστοιχων ηλιακών κελιών.

Πίνακας 1. Υπολογιζόμενες ηλεκτρικές παράμετροι για δείγματα GO-Cu, GO-Co και GO/(Co-Cu)

	J_{sc} (mAcm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	η (%)
GO	17.14	0.60	0.36	3.72
GO/Cu 1/4.5	19.54	0.51	0.60	5.97
GO/Cu 1/9	21.55	0.53	0.60	6.80
GO/Co 1/4.5	18.38	0.66	0.51	6.19
GO/Co 1/9	19.29	0.69	0.51	6.80
GO/(Cu-Co) 1/4.5	22.29	0.60	0.51	6.80
GO/(Cu-Co) 1/9	24.10	0.68	0.53	8.73
GO/(Cu-Co) 1/18	19.77	0.69	0.46	6.31

Η μεγαλύτερη απόδοση (8,73%) επιτεύχθηκε για το δείγμα GO/(Cu-Co) με αναλογία 1/9, η οποία μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή πυκνότητα φωτορεύματος αλλά επίσης και στην τιμή του παράγοντα πλήρωσης FF.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, πραγματοποιήθηκε η επιτυχημένη οξείδωση του γραφίτη μέσω της τροποποιημένης μεθόδου Hummers με αποτέλεσμα τη δημιουργία οξειδίου του γραφενίου και πιστοποιήθηκε η επιτυχής ενσωμάτωση των νανοσωματιδίων πάνω στα νανόφυλλα του GO ανεξαρτήτως της πρόδρομης ένωσης του Co, του Cu και του Se και της ποσότητάς τους. Τα νανοϋβριδικά υλικά παρουσιάζουν βέλτιστη ηλεκτροκαταλυτική δραστηριότητα με χαμηλές Rct που υποδεικνύουν μια αποτελεσματική αναγωγή του ζεύγους οξειδωαναγωγής στην διεπιφάνεια CE/ηλεκτρολύτη. Με την αύξηση των συγκεντρώσεων των μετάλλων, αυξάνονται επίσης και οι τιμές όλων των συντελεστών. Το ηλεκτρόδιο GO/Co-Cu (1/9) παρουσιάζει τη μέγιστη απόδοση της τάξεως του 8,73%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] V. Chakrapani, D. Baker, P.V. Kamat. *J. Am. Chem. Soc.* 133 (2011) 9607.
- [2] I. Mora-Seró, S. Giménez, F. Fabregat-Santiago, R. Gómez, Q. Shen, T. Toyoda, J. Bisquert. *Acc.Chem.Res.* (2009) 421848.
- [3] L. Givalou, M. Antoniadou, D. Perganti, M. Giannouri, C.S. Karagianni, A.G. Kontos, P. Falaras. *Electrochimica Acta* 210 (2016) 630.
- [4] N. Ahn, D.Y. Son, I.H. Jang, S.M. Kang, M. Choi, N.G. Park. *J.Am.Chem.Soc.* 27 (2015) 137.
- [5] M.M. Stylianakis, G.D. Spyropoulos, E. Stratakis, E. Kymakis. *Carbon.* 50 (2012) 5554.
- [6] A.K. Geim, K.S. Novoselov. *Nature Materials.* 6 (2007) 183.
- [7] K.S. Novoselov et al. *Science.* 306 (2004)666.
- [8] P.Avouris, Z.Chen, V.Perebeinos. *Nature Nanotechnology.* 2 (2007) 605.
- [9] H. Zhang et al. *Optics Letters.* 37 (11): 1856-1858 (2012).
- [10] A.A. Balandin et al. *Nano Letters.* 8 (2008) 902.
- [11] T.F. Li, H.J. Deng, J.J. Liu, C. Jin, Y. Song, F. Wang. *Carbon.* 143 (2019) 859-868.
- [12] M. Seol, D.H. Youn, J.Y. Kim, J.W. Jang, M. Choi, J.S. Lee, K. Yong. *Adv. Energy Mater.* 4 (2013) 1300775.
- [13] D. Ghosh, G. Halder, A. Sahasrabudhe, S. Bhattacharyya, *Nanoscale.* 8 (2016) 10632.
- [14] F. Bonaccorso, A. Lombardo, T. Hasan, Z. Sun, L. Colombo, A.C. Ferrari. *Materials Today.* 15 (2012) 564.
- [15] S. Sfaelou, A.G. Kontos, L. Givalou, P. Falaras, P. Lianos. *Catalysis Today.* 230 (2014) 221.
- [16] Q. Shen, J. Kobayashi, L.J. Diguna, T. Toyoda. *J. Appl. Phys.* 103 (2008) 084304.
- [17] E.M. Barea, M. Shalom, S. Giménez, I. Hod, I. Mora-Sero, A. Zaban, J. Bisquert. *J. Am. Chem. Soc.* 132 (2010) 6834.
- [18] J.G. Radich, R. Dwyer, P.V. Kamat. *J. Phys. Chem. Lett.* 2 (2011) 2453.