

ΛΕΠΤΑ ΥΜΕΝΙΑ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ: ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ, ΑΝΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**Τ. Γιαννακοπούλου^{1*}, Α. Ερωτοκριτάκη², Ν. Τοντόροβα¹, Α. Τσετσέκου², Χ. Τράπαλης¹**¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», Αθήνα, Ελλάδα²Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων -Μεταλλουργών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα(*t.giannakopoulou@inn.demokritos.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία, παρασκευάστηκαν λεπτά υμένα οξειδίου του γραφενίου σε αγώγιμα υποστρώματα ΙΤΟ με ηλεκτροχημική εναπόθεση για διαφορετικές τιμές τάσης και χρόνου εναπόθεσης, και έγινε περαιτέρω ηλεκτροχημική αναγωγή τους με κυκλική βολταμετρία (CV). Τα ανηγμένα υμένα GO (rGO) χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή υπερπυκνωτών με στερεό ηλεκτρολύτη, με βάση την υδρογέλη PVA-Na₂SO₄. Τα υμένα GO και rGO εξετάστηκαν με τις τεχνικές SEM, XRD, RAMAN και XPS για συγκριτική ανάλυσή τους, καθώς και για επαλήθευση της ηλεκτροχημικής αναγωγής των τελευταίων. Η ειδική χωρητικότητα των ηλεκτροδίων και των υπερπυκνωτών εκτιμήθηκε με ηλεκτροχημικές μεθόδους. Από τις αναλύσεις XRD προέκυψε ότι, κατά τους πολλαπλούς κύκλους CV, τα φύλλα του οξειδίου του γραφενίου απομακρύνονται μεταξύ τους, λόγω της εισχώρησης και υποστυλώσής τους με ηλεκτρολυτικούς παράγοντες όπως τα ιόντα νατρίου του ηλεκτρολύτη. Τα φάσματα Raman έδειξαν ότι ο δείκτης I_D/I_G, που συνδέεται με τις ατέλειες του πλέγματος του γραφενίου, παρέμεινε αρκετά σταθερός ακόμα και μετά από αρκετούς CV κύκλους που σημαίνει ότι δεν προστίθενται καινούριες ατέλειες αλλά και δεν γίνεται αποκατάσταση των sp² υβριδικών δεσμών του πλέγματος. Η XPS ανάλυση ήταν αυτή που επιβεβαίωσε την αναγωγή των υμενίων GO σε rGO καθώς και την παρουσία του νατρίου στα υμένα rGO. Η βέλτιστη τιμή της χωρητικότητας του κατασκευασμένου πρότυπου υπερπυκνωτή με λεπτά ηλεκτρόδια από rGO και PVA-Na₂SO₄ ηλεκτρολύτη έφτανε 8.55 mF/cm².

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πρόσφατες τεχνολογικές τάσεις προς μείωση διαστάσεων των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας ενισχύουν την απαίτηση υψηλής απόδοσης των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας μικρής κλίμακας. Από αυτήν την άποψη, το γραφένιο μαζί με άλλα δισδιάστα υλικά, διαθέτοντας υψηλή αγωγιμότητα και μεγάλη ειδική επιφάνεια, προσελκύουν έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς βρίσκουν εφαρμογές σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως υπερπυκνωτές. Η χρήση του στερεού ηλεκτρολύτη ανοίγει καινούριες δυνατότητες για ενσωμάτωση των μικρο-υπερπυκνωτών σε φορητές ηλεκτρονικές μικροσυσκευές.

Μια από τις υποσχόμενες τεχνικές εναπόθεσης υμενίων γραφενίου είναι η ηλεκτροχημική εναπόθεση (ECD) που επιτρέπει δημιουργία λεπτών υμενίων σε διαφορετικά αγώγιμα υποστρώματα συμπεριλαμβανομένων και ΙΤΟ γυαλιά^[1-3]. Η ECD των υμενίων γραφενίου είναι δυνατή από εναιωρήματα του οξειδίου του γραφενίου εξαιτίας της παρουσίας των καρβοξυλικών ομάδων που προσδίδουν στις νιφάδες γραφενίου υδρόφιλες ιδιότητες και ως εκ τούτου συμβάλλουν στη δημιουργία σταθερών υδατικών αιωρημάτων. Επίσης, προωθούν φόρτιση των νιφάδων GO μέσω άμεσης αποπρωτονίωσης καρβοξυλικών ομάδων σε νερό. Ωστόσο, αυτές οι ομάδες μειώνουν την κινητικότητα των μεταφορέων φορτίου (ηλεκτρονίων) στα GO υμένα που καθιστά την αναγωγή τους υποχρεωτική.

Αναφέρεται ότι η υπολογισμένη θεωρητική χωρητικότητα του μονού στρώματος γραφενίου φτάνει 550 F/g^[4]. Στην πραγματικότητα, τέτοιες τιμές χωρητικότητας για λεπτά ηλεκτρόδια γραφενίου ή για υπερπυκνωτή από λεπτά υμένα γραφενίου δεν έχουν επιτευχθεί μέχρι τώρα και κυμαίνονται αναλόγως με τις συνθήκες παρασκευής και ιδιότητες των υμενίων και ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούνται^[1-5].

Η παρούσα εργασία αφορά στην παρασκευή και αναγωγή των υμενίων οξειδίου του γραφενίου με ηλεκτροχημική εναπόθεση, την περαιτέρω συγκριτική ανάλυση της χωρητικότητας των παρασκευασμένων ηλεκτροδίων και των κατασκευασμένων από αυτά υπερπυκνωτών χρησιμοποιώντας υδατικό ηλεκτρολύτη Na_2SO_4 και στερεό ηλεκτρολύτη PVA- Na_2SO_4 , αντίστοιχα.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Παρασκευή υμενίων οξειδίου του γραφενίου / ανηγμένου οξειδίου του γραφενίου

Η δημιουργία των υμενίων γραφενίου πάνω σε αγώγιμα υποστρώματα ITO πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια που περιελάμβαναν την παρασκευή σταθερών διαλυμάτων οξειδίου του γραφενίου και την ηλεκτροχημική εναπόθεση των φύλλων οξειδίου του γραφενίου πάνω σε υποστρώματα ITO με ακόλουθη αναγωγή τους υποβάλλοντας τα υμένια σε πολλούς κύκλους CV. Έτσι, υδατικά διαλύματα οξειδίου του γραφενίου με συγκέντρωση 1 mg/ml παρασκευάστηκαν από φύλλα οξειδίου του γραφενίου που συντέθηκαν προηγουμένως μέσω τροποποιημένης μεθόδου Hummers^[6] από φυσικό γραφίτη (100 mesh, Alfa Aesar). Τα διαλύματα υποβλήθηκαν σε κατεργασία με υπερήχους για 2 ώρες, ώστε να επιτευχθεί η ομοιογένειά τους. Η τάση και ο χρόνος της εναπόθεσης ήταν +4 και +6 V για 150 και 300 s, αντίστοιχα. Στην αναγωγή των υμενίων GO εφαρμόστηκαν 100 κύκλοι CV και 0.5 M Na_2SO_4 ηλεκτρολύτης. Τα υμένια GO που υποβλήθηκαν στην ηλεκτροχημική αναγωγή, χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν στην κατασκευή υπερπυκνωτών με στερεό ηλεκτρολύτη, με βάση την υδρογέλη PVA- Na_2SO_4 . Για τη σύνθεση του ηλεκτρολύτη ακολουθήθηκε συνταγή που περιγράφεται στη βιβλιογραφία ^[4,7]. Παρασκευάστηκαν αυτοτελή (freestanding) φύλλα PVA- Na_2SO_4 ηλεκτρολύτη με συγκέντρωση Na_2SO_4 10% και 20%, χρησιμοποιώντας δειγματοφορείς από τεφλόν. Τα δείγματα GO πριν την αναγωγή ονομάστηκαν GO4-150, GO4-300, GO6-150 και GO6-300, αντίστοιχα, στην ονομασία των οποίων μετά την αναγωγή προστέθηκε επιπλέον κατάληξη RED (π.χ. GO4-150RED, κλπ.).

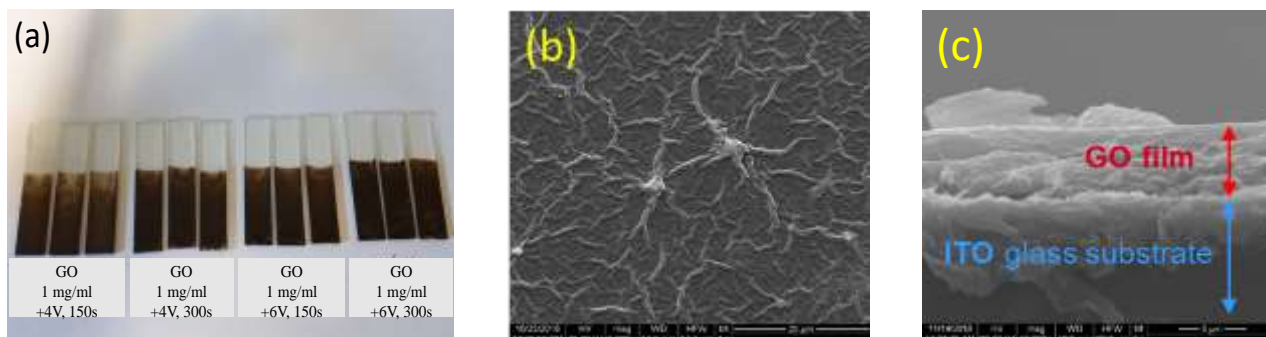
2.2 Τεχνικές χαρακτηρισμού

Οι εικόνες μικροσκοπίας ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM) καταγράφηκαν με μικροσκόπιο FEI Inspect εξοπλισμένο με νήμα βολφραμίου που λειτουργεί στα 25 kV και δευτερεύοντα ανιχνευτή για τον σχηματισμό εικόνας. Τα διαγράμματα περίθλασης XRD καταγράφηκαν με περιθλασίμετρο Siemens D500 και $\text{CuK}\alpha$ πηγή ακτινοβολίας σε Bragg-Bretano διάταξη. Η φασματοσκοπία φωτηλεκτρονίων ακτίνων X (XPS) διεξήχθη με φασματόμετρο VG EXCALAB 210 υψηλού κενού χρησιμοποιώντας $\text{MgK}\alpha$ (1253,6 eV) ως πηγή ακτινοβολίας. Η καταγραφή των φασμάτων RAMAN έγινε με τη χρήση του μικροσκοπίου inVia Raman (Renishaw) εξοπλισμένο με laser Ar^+ (514.5 nm). Για εκτίμηση της ειδικής χωρητικότητας των παρασκευασμένων υμενίων και υπερπυκνωτών χρησιμοποιήθηκε ποτενσιόμετρο Metrohm Autolab PGSTAT302 πραγματοποιώντας μετρήσεις CV, ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας εμπέδησης και φόρτισης-εκφόρτισης σε διάταξη τριών ή δύο ηλεκτροδίων, αντίστοιχα. Σε περίπτωση τριών ηλεκτροδίων, η διάταξη συμπεριλάμβανε ηλεκτρόδιο αναφοράς Ag/AgCl και βοηθητικό ηλεκτρόδιο από πλακίδιο Pt ενώ τα υμένια GO/rGO πάνω σε ITO υποστρώματα χρησιμοποιήθηκαν ως ηλεκτρόδια εργασίας. Υδατικό διάλυμα 0.5 M Na_2SO_4 χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτρολύτης. Σε περίπτωση υπερπυκνωτών, χρησιμοποιήθηκαν δύο ηλεκτρόδια από GO/rGO πάνω σε ITO υποστρώματα και PVA- Na_2SO_4 υδρογέλη ως ηλεκτρολύτης και διαχωριστικό μέσο, ταυτόχρονα. Οι μετρήσεις CV έγιναν σε ένα παράθυρο δυναμικού από -1 V έως 1 V με διαφορετικούς ρυθμούς σάρωσης (0.1, 0.2, 0.3 και 0.5V/s). Οι ηλεκτροχημικές μετρήσεις εμπέδησης πραγματοποιήθηκαν σε εύρος συχνοτήτων από 0.1 Hz έως 100 kHz με ημιτονοειδές σήμα των 10 mV. Οι μετρήσεις φόρτισης-εκφόρτισης διεξήχθησαν σε σταθερές τιμές ρεύματος των 0.05 mA και 0.1 mA.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι φωτογραφίες των εναποτιθέμενων υμενίων για διαφορετική τάση και χρόνο εναπόθεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1a. Πρέπει να σημειωθεί, ότι πιο υψηλή τάση και μεγαλύτερος χρόνος

εναπόθεσης οδήγησε σε δημιουργία υμενίων με μεγαλύτερες ατέλειες (πιο έντονα τσαλακώματα, περισσότερα σπασίματα) εξαιτίας του έντονου σχηματισμού φυσαλίδων οξυγόνου κατά τη διάσπαση του νερού, που λαμβάνει χώρα παράλληλα με τη διαδικασία της ηλεκτροχημικής εναπόθεσης. Οι μορφολογικές λεπτομέρειες είναι εμφανείς από τις εικόνες SEM των GO υμενίων (Σχήμα 1b). Το πάχος των υμενίων κυμαίνεται στα 5-8 μm (Σχήμα 1c), ανάλογα με την τάση και χρόνο εναπόθεσης.

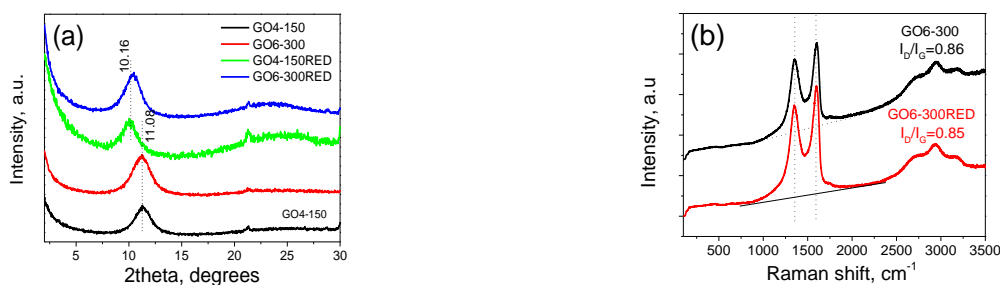


Σχήμα 1. Φωτογραφίες παρασκευασμένων υμενίων GO σε υπόστρωμα ITO (a) και εικόνες SEM του υμενίου GO4-150 παρασκευασμένου με εφαρμογή τάσης +4 V για 150 s (5000x) (b) καθώς και εγκάρσια τομή του (1000x) (c).

Τα υμένια του οξειδίου του γραφενίου που παρασκευάστηκαν, καθώς και αυτά που υποβλήθηκαν σε περαιτέρω πολλαπλούς κύκλους CV, εξετάστηκαν με τις τεχνικές XRD, RAMAN και XPS για συγκριτική ανάλυση, καθώς και για την επαλήθευση της ηλεκτροχημικής αναγωγής των τελευταίων.

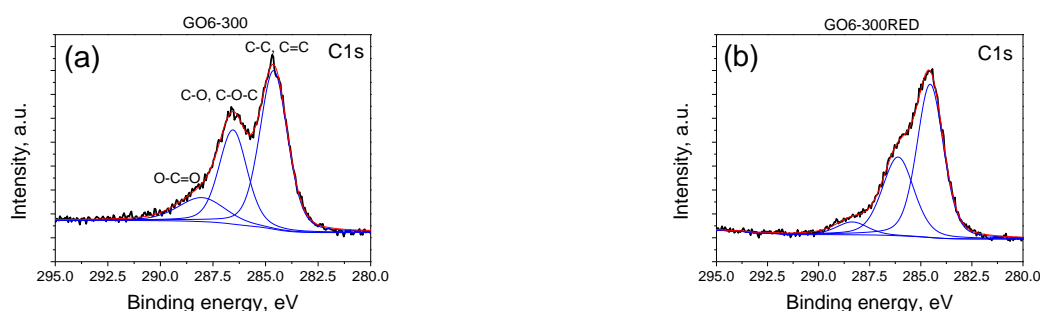
Τα αποτελέσματα της XRD ανάλυσης απεικονίζονται στο Σχήμα 2a. Παρατηρείται η μετατόπιση της βασικής κορυφής (002) στα παρασκευασμένα υμένια από $2\theta=11.08^\circ$ σε μικρότερες γωνίες $2\theta=10.16^\circ$, στα υμένια που υπέστησαν πολλαπλούς κύκλους CV μετά από την παρασκευή τους. Η μετατόπιση αυτή συνδέεται με την αύξηση της απόστασης d_{sp} μεταξύ των φύλλων του οξειδίου του γραφενίου. Σύμφωνα με το νόμο του Bragg, το d_{sp} μεταβάλλεται από τα 0.799 nm στα 0.871 nm. Τα αποτελέσματα της XRD, συνεπώς, δεν παρέχουν αποδείξεις για την αναγωγή του οξειδίου του γραφενίου. Από τις αναλύσεις φαίνεται ότι, κατά την διαδικασία της κυκλικής βολταμετρίας, γίνεται εισχώρηση και υποστύλωση των φύλλων του οξειδίου του γραφενίου με παράγοντες, που, υποθετικά, μπορεί να είναι ιόντα νατρίου του ηλεκτρολύτη.

Τα φάσματα Raman (Σχήμα 2b) των υμενίων GO, παρασκευασμένων με διαφορετική τάση και διαφορετικό χρόνο εναπόθεσης, δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία αλλαγή. Ο δείκτης I_D/I_G , που συνδέεται με ατέλειες του πλέγματος γραφενίου, παραμένει αρκετά σταθερός ακόμα και μετά από πολλαπλούς κύκλους CV ($I_D/I_G \sim 0.86-0.88$). Αυτό σημαίνει ότι δεν προστίθενται καινούριες ατέλειες αλλά και δεν γίνεται αποκατάσταση των sp^2 υβριδικών δεσμών του πλέγματος.



Σχήμα 2. Φάσματα XRD (a) και Raman (b) των επιλεγμένων υμενίων GO πριν και μετά την ηλεκτροχημική αναγωγή.

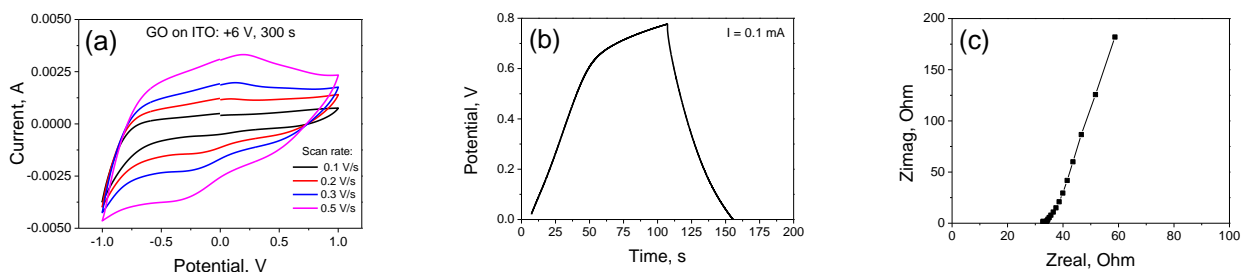
Η χημική σύσταση της επιφάνειας των παρασκευασμένων υμενίων μελετήθηκε με την τεχνική XPS. Τα φάσματα όλων των υμενίων οξειδίου του γραφενίου στην περιοχή C1s εμφανίζουν μια διπλή κορυφή, η οποία αναλύεται με τρεις κορυφές, με ενέργειες δέσμευσης στα ~ 284.5 , 286.6 και 287.5 - 288.0 eV (Σχήμα 3). Η πρώτη κορυφή, στα 284.5 eV, αντιπροσωπεύει τους δεσμούς C-C και C=C του γραφιτικού πλέγματος. Η κορυφή με ενέργεια δέσμευσης στα 286.6 eV οφείλεται στις κετονομάδες (C=O), καθώς και στις εποξειδικές (C-O-C) λειτουργικές ομάδες. Τέλος, η κορυφή με ενέργεια δέσμευσης που κυμαίνεται στα 287.5-288.0 eV αντιστοιχεί στις καρβοξυλικές (O=C=O) ομάδες (Σχήμα 3a). Παρατηρείται ότι στα υμένια GO4-150RED και GO6-300RED (Σχήμα 3b), που έχουν υποβληθεί σε πολλαπλούς κύκλους CV, η ένταση των κορυφών, συνεπώς και το ποσοστό των οξυγονούχων ομάδων, μειώνεται. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει την αναγωγή του οξειδίου του γραφενίου, που δεν μπορούσε να αποδειχθεί με άλλες τεχνικές που αναφέρθηκαν νωρίτερα (XRD και Raman).



Σχήμα 3. Φάσματα XPS στην περιοχή C1s των υμενίων GO6-300 (a) και GO6-300RED (b).

Επιπλέον, τα φάσματα XPS στην περιοχή Na1s έδειξαν παρουσία Na στα δείγματα GO4-150RED και GO6-300RED, που πέρασαν πολλαπλούς κύκλους CV. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι η ηλεκτροχημική αναγωγή σε ηλεκτρολύτη Na_2SO_4 συνοδεύεται με εισχώρηση ιόντων Na στο πλέγμα του οξειδίου του γραφενίου, που μπορεί να θεωρηθεί ως θετικό αποτέλεσμα, εφόσον τα ιόντα του Na, υποστυλώνοντας το πλέγμα, αποτρέπουν την επανασυσσώματωση φύλλων ανηγμένου οξειδίου του γραφενίου.

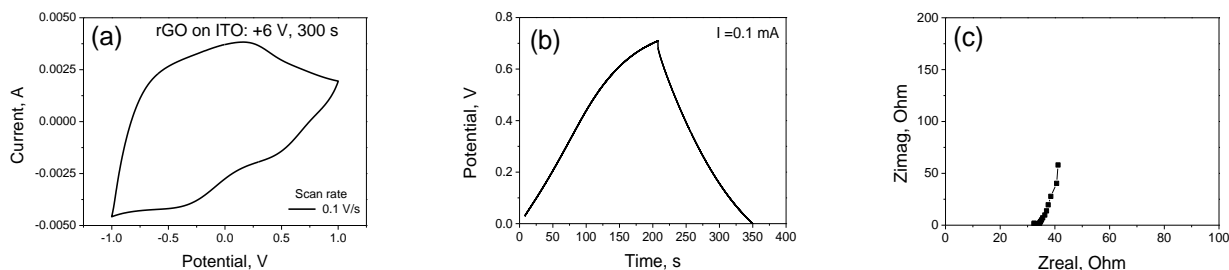
Τα GO υμένια, υποβλήθηκαν σε ηλεκτροχημικά τεστ για την εκτίμηση της χωρητικότητάς τους. Όλα τα υμένια είχαν χαρακτηριστική συμπεριφορά υπερπυκνωτή. Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4, για υμένιο παρασκευασμένο με εφαρμογή τάσεως +6 V για 300 s. Οι τιμές της ειδικής (ανά επιφάνεια) χωρητικότητας, υπολογισμένες χρησιμοποιώντας την καμπύλη κυκλικής βολταμετρίας (CV), αναγράφονται στον Πίνακα 1.



Σχήμα 4. Καμπύλες CV για διαφορετικούς ρυθμούς σάρωσης (a), διάγραμμα φόρτισης/εκφόρτισης (b) και φάσμα ηλεκτροχημικής εμπέδησης Nyquist (c) του ηλεκτροδίου GO6-300 πάνω σε υπόστρωμα ITO και 0.5 M Na_2SO_4 ηλεκτρολύτη, πριν την εφαρμογή πολλαπλών κύκλων ηλεκτροχημικής αναγωγής.

Παρατηρήθηκε σταδιακή αλλαγή του χρώματος των υμενίων από καφέ σε σκούρο γκρι κατά την εκτέλεση των μετρήσεων, που συνοδεύτηκε με ορισμένες αλλαγές στις μετρήσεις (π.χ. με αύξηση του εμβαδού της καμπύλης CV). Το εύρημα αυτό αποδεικνύει την αναγωγή του οξειδίου του γραφενίου. Για να μελετηθεί το φαινόμενο ηλεκτροχημικής αναγωγής του GO, επιλεγμένα υμένια

υποβλήθηκαν σε επιπλέον κύκλους CV, μέχρι να σταθεροποιηθεί η συμπεριφορά τους. Τα ηλεκτροχημικά τεστ για το ηλεκτρόδιο GO6-300RED, μετά από 100 κύκλους CV, παρουσιάζονται για σύγκριση στο Σχήμα 5 και οι τιμές ειδικής χωρητικότητας στον Πίνακα 1. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ηλεκτροχημική αναγωγή με τη χρήση κυκλικής βολταμετρίας οδήγησε σε πενταπλάσια αύξηση της ειδικής χωρητικότητας των GO υμενίων.

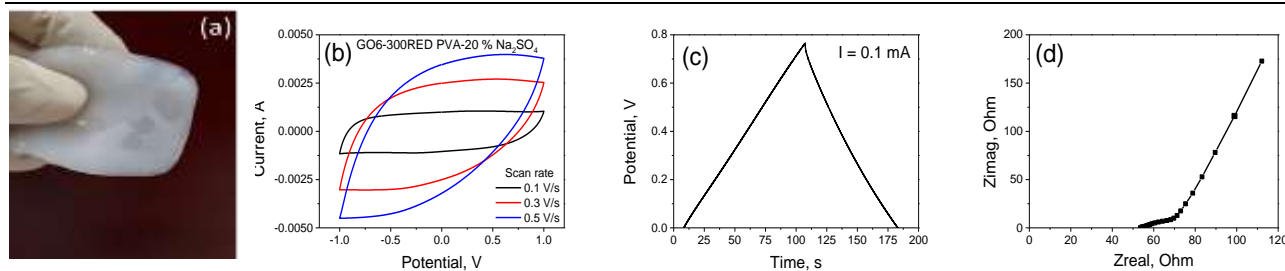


Σχήμα 5. Καμπύλες CV για το ρυθμό σάρωσης 0.1 V/s (a), διάγραμμα φόρτισης/εκφόρτισης (b) και φάσμα ηλεκτροχημικής εμπέδησης Nyquist (c) του ηλεκτροδίου GO6-300RED πάνω σε ITO υπόστρωμα και 0.5 M Na₂SO₄ ηλεκτρολύτη, μετά από 100 κύκλους CV.

Πίνακας 1. Ειδική χωρητικότητα των παρασκευασμένων ηλεκτροδίων (υμενίων) πάνω σε ITO υπόστρωμα και των κατασκευασμένων υπερπυκνωτών

Δείγμα	Ταχύτητα σάρωσης (V/s)	Ειδική χωρητικότητα (mF/cm ²)
ELECTRODE, 0.5M Na ₂ SO ₄		
GO4-150	0.1	1.77
	0.5	1.72
GO4-300	0.1	2.03
	0.5	1.96
GO6-150	0.1	1.87
	0.5	1.88
GO6-300	0.1	1.86
	0.5	1.86
GO6-300RED	0.1	10.67
SUPERCAPACITOR, PVA/0.5M Na ₂ SO ₄		
GO6-300RED-PVA10%Na	0.1	6.48
	0.5	3.98
GO6-300RED-PVA20%Na	0.1	8.55
	0.5	4.88

Τα υμένια GO που υποβλήθηκαν στην ηλεκτροχημική αναγωγή, χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή υπερπυκνωτών με στερεό ηλεκτρολύτη, με βάση την υδρογέλη PVA-Na₂SO₄. Ένα από αυτοτελή φύλλα ηλεκτρολύτη παρουσιάζονται στο Σχήμα 6a. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 6b-d, ο υπερπυκνωτής εμφανίζει συμπεριφορά πρακτικά ιδανικού υπερπυκνωτή (η καμπύλη CV είναι σχεδόν τετράγωνη, η καμπύλη φόρτισης/εκφόρτισης έχει σχήμα ισοσκελούς τριγώνου και η καμπύλη εμπέδησης είναι σχεδόν παράλληλη στον άξονα OY). Σύμφωνα με τον Πίνακα 1, οι τιμές της ειδικής χωρητικότητας του ηλεκτροδίου του υπερπυκνωτή στην περίπτωση του ηλεκτρολύτη με 20 % Na₂SO₄ (δείγμα GO6-300RED-PVA20%Na) πλησιάζουν τις τιμές χωρητικότητας του ηλεκτροδίου από ανηγμένο GO (δείγμα GO6-300RED), που μετρήθηκε σε Na₂SO₄ ηλεκτρολύτη.



Σχήμα 6. Φύλλο στερεού ηλεκτρολύτη (a) και καμπύλες CV για διαφορετικούς ρυθμούς σάρωσης (b), διάγραμμα φόρτισης/εκφόρτισης (c) και φάσμα ηλεκτροχημικής εμπέδησης Nyquist (d) του υπερπυκνωτή με ηλεκτρόδια GO6-300RED και στερεό ηλεκτρολύτη PVA-20 % Na_2SO_4 .

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, η ηλεκτροχημική αναγωγή των ηλεκτροδίων GO μέσω κυκλικής βολταμετρίας οδήγησε σε πενταπλάσια αύξηση της ειδικής χωρητικότητάς τους, φτάνοντας τιμές $\sim 10 \text{ mF/cm}^2$ και είχε ως επιπλέον θετικό αποτέλεσμα την εισχώρηση ιόντων νατρίου στο πλέγμα του οξειδίου του γραφενίου, προστατεύοντάς το από την επανασυσσωμάτωση. Αποδείχτηκε ότι ποσοστό 20 % Na_2SO_4 στον ηλεκτρολύτη είναι ικανοποιητικό, ώστε οι τιμές της ειδικής χωρητικότητας του ηλεκτροδίου του υπερπυκνωτή από ανηγμένο GO να πλησιάζουν τις τιμές χωρητικότητας του υμενίου που μετρήθηκε σε υδατικό ηλεκτρολύτη Na_2SO_4 .

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της Πράξης MIS 5002567, που εντάσσεται στη «Δράση Στρατηγικής Ανάπτυξης Ερευνητικών και Τεχνολογικών Φορέων» και χρηματοδοτείται από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα και Καινοτομία» (ΕΣΠΑ 2014-2020), με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης) και στο πλαίσιο της Δράσης ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ) (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-05545).



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. Ma, J. Han, M. Wang, X. Chen, S. Jia. *J Materiomics* 4 (2018) 108-120.
- [2] S.Y. Toh, K.S. Loh, S.K. Kamarudin, W.R.W. Daud. *Chem. Eng. J.* 251 (2014) 422–434.
- [3] V. Marcelina, H. Addini, N. Syakir, A. Bahtiar, S. Wyantuti, Y. W. Hartati, Fitrilawati. *IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series* 1080 (2018) 012028.
- [4] Q. Chena, X. Li, X. Zang, Y. Cao, Y. Hea, P. Li, K. Wang, J. Wei, D. Wu, H. Zhu. *RSC Adv.* (4) (2014) 36253-36256.
- [5] N. Syakir, H. Addini, V. Marcelina, A. Bahtiar, Y. W. Hartati, S. Wyantuti, Fitrilawati. *IOP Conf. Series: J. Phys.: Conf. Series* 1080 (2018) 012044.
- [6] N. Todorova, T. Giannakopoulou, N. Boukos, E. Vermisoglou, C. Lekakou, C. Trapalis. *Appl. Surf. Sci.* 391 (2017) 601-608.
- [7] D.I. Abouelamaiem, L. Rasha, G. He, T.P. Neville, J. Millichamp, T.J. Mason, A.B. Jorge, I.P. Parkin, M.-M. Titirici, R. Wange, S. Jif, P.R. Shearing, D.J.L. Brett. *J. Energy Storage* 19 (2018) 28–34.