

Τα Λεπτά Υμένια στη Νανοκλίμακα και οι Εφαρμογές τους. Παραγωγή Λεπτών Υμενίων στο Σχολικό Εργαστήριο

Κομετζόπουλος Λάζαρος¹, Λεοντής Παναγιώτης², Εφραιμίδης Γιώργος³

1^ο Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Θεσ/νίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

¹ klazaros1998@gmail.com, ² panosleo98@gmail.com, ³ georgeefraimid@yahoo.gr

Επιβλ. Καθ/τές: Δρ Κλαίρη Αχιλλέως¹, Δρ. Σταύρος Παπαδόπουλος²

Φυσικοί, 1^ο Πρότυπο Πειραματικό Λύκειο Θεσ/νίκης «Μανόλης Ανδρόνικος»

¹ cachtileosa@gmail.com, ² stpado@sch.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η νανοτεχνολογία ασχολείται με την κατανόηση και την γνώση των ιδιοτήτων της ύλης στη νανοκλίμακα δηλαδή σε διαστάσεις 1-100nm.. Ένα nm είναι το μήκος ενός μορίου. Οι ιδιότητες της ύλης στο επίπεδο αυτό πολλές φορές ερμηνεύουν τη μακροσκοπική συμπεριφορά των υλικών.

Στην εργασία μας αυτή ασχολούμαστε με ένα πολύ μικρό κομμάτι της νανοτεχνολογίας. Καταρχήν γνωρίζουμε τα «έξυπνα παράθυρα» (smart windows) και τους βιοαισθητήρες (biosensors). Στη συνέχεια κάνουμε μια προσπάθεια για παραγωγή ηλεκτροχρωμικών λεπτών υμενίων με τη μέθοδο της ηλεκτροαπόθεσης. Μελετούμε την απορρόφηση του φωτός από αυτά τα υμένια και την εξάρτηση της απορρόφησης από το πάχος των υμενίων. Τέλος ελέγχουμε τις ηλεκτροχρωμικές τους ιδιότητες.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: nanotechnology, nanoscale thin films, smart windows, biosensors.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα λεπτά υμένια είναι σχετικά καινούργια «υλικά» που παρουσιάζουν μεγάλο τεχνολογικό ενδιαφέρον. Για να δημιουργηθεί ένα λεπτό υμένιο χρησιμοποιείται μια βάση (π.χ. γυαλί) πάνω στην οποία γίνεται μια επίστρωση ή μερικές επιστρώσεις υλικών. Το πάχος των επιστρώσεων είναι από μερικά νανόμετρα έως και μερικά μικρόμετρα. Οι διάφοροι τύποι των λεπτών υμενίων βρίσκουν εφαρμογές στην Ιατρική (φάρμακα, βιοαισθητήρες), στην Ενέργεια (μπαταρίες, φωτοβολταϊκά), ακόμα και στην Μηχανική (εργαλεία, τμήματα μηχανών). Μια ιδιαίτερη κατηγορία λεπτών υμενίων είναι αυτά που παρουσιάζουν ηλεκτροχρωμικές, θερμοχρωμικές ή φωτοχρωμικές ιδιότητες. Τα υμένια αυτά ερευνώνται από τους επιστήμονες για εφαρμογή, μεταξύ άλλων, στα «έξυπνα παράθυρα» και στους βιοαισθητήρες.

Τα έξυπνα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα σκουραίνουν όταν υπάρχει ηλεκτρική τάση στα άκρα τους ενώ γίνονται διαφανή όταν η ηλεκτρική τάση μηδενιστεί. Η διαπερατότητα, των

παραθύρων αυτών, από το φως μπορεί να ρυθμιστεί. Στη πραγματικότητα η ηλεκτρική τάση ενεργοποιεί μια αντίδραση στα ηλεκτροχρωμικά υλικά με αποτέλεσμα να αλλάζει ο τρόπος με τον οποίο το υλικό ανακλά και απορροφά το φως.

Το ηλεκτροχρωμικό παράθυρο σχηματίζεται από ένα σάντουιτς υλικών που βρίσκονται ανάμεσα στα υαλοπετάσματα του παραθύρου. Το σάντουιτς αυτό μπορεί να αποτελείται από τα ακόλουθα υλικά: 1. Γυαλί 2. Οξείδιο επαφής 3. Ηλεκτροχρωμικό υμένιο 4. Ηλεκτρολύτης 5. Δεύτερο στρώμα οξειδίου επαφής 6. Γυαλί .

Η χημική αντίδραση σε αυτό το σάντουιτς είναι αντίδραση οξειδωσης. Η πηγή τάσης συνδέεται με τα δύο οξείδια επαφής και η διαφορά δυναμικού οδηγεί τα ιόντα από τον ηλεκτρολύτη στο ηλεκτροχρωμικό υμένιο. Αυτό κάνει το γυαλί αδιαφανές. Αν διακοπεί η τάση τα ηλεκτρόνια οδηγούνται από το ηλεκτροχρωμικό υμένιο στην αποθήκη ιόντων με αποτέλεσμα το γυαλί να γίνει και πάλι διαφανές (L. Filipponi, D. Sutherland).

Το Πρωσικό Μπλε

Το Πρωσικό Μπλε ανακαλύφθηκε το 1704 και έγινε αμέσως πολύ δημοφιλές για το λαμπερό του χρώμα και τη μακρά διάρκειά του. Χρησιμοποιείται στη ζωγραφική, στη τυπογραφία αλλά και στην Ιατρική. Ο χημικός του τύπος είναι $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$.

Το υλικό αυτό περιέχει: α) άτομα σιδήρου με διαφορετικούς αριθμούς ηλεκτρονίων (δηλαδή κάποια περιέχουν περισσότερα ηλεκτρόνια και κάποια λιγότερα ηλεκτρόνια) και β) μια γέφυρα που επιτρέπει σε ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο σιδήρου που έχει περισσότερα (Fe^{+2}) να μεταβεί στο άτομο σιδήρου που έχει τα λιγότερα ηλεκτρόνια (Fe^{+3}). Την ενέργεια για να γίνει αυτή η μετάβαση τη δίνει το λευκό προσπίπτον φως. Η ενέργεια αυτή που απορροφάται από το υλικό είναι στη περιοχή του ερυθρού, με αποτέλεσμα να βλέπουμε το φωτεινό μπλε που ανακλάται.

Το Πρωσικό Μπλε είναι ένα ηλεκτροχρωμικό υλικό. Αν εφαρμοστεί τάση στα άκρα ενός υμενίου Πρωσικού Μπλε αυτό αλλάζει χρώμα. Το χρώμα που παίρνει εξαρτάται από τη τάση που εφαρμόζεται. Η ιδιότητά του αυτή το καθιστά κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτροχρωμικές συσκευές. Τοποθετείται ανάμεσα σε δύο οπτικά διαφανείς αγωγούς και όταν εφαρμοστεί αρνητικό δυναμικό δημιουργείται το Πρωσικό άσπρο ενώ όταν εφαρμοσθεί θετικό δυναμικό δημιουργείται αντίδραση οξειδωσης και προκύπτει το Πρωσικό Μπλε (L.Filipponi, D.Sutherland).

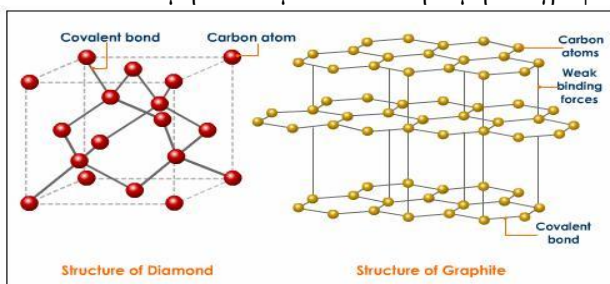
Βιοαισθητήρες

Αισθητήρας είναι μια συσκευή ικανή να αναγνωρίσει μια χημική ουσία και να καταδείξει την παρουσία της, την δραστηριότητα ή τη συγκέντρωσή της. Όταν αυτή η ανίχνευση βασίζεται σε μία βιομοριακή αναγνώριση (δηλαδή αναγνωρίζονται βιολογικά μόρια π.χ. πρωτεΐνες) τότε μιλάμε για βιοαισθητήρες. Υπάρχουν βιοαισθητήρες διαφόρων τύπων όπως είναι οι βιοαισθητήρες αντισώματος-αντιγόνου, ή οι βιοαισθητήρες που βασίζονται σε ένζυμα. Επίσης ανάλογα με την τεχνική ανίχνευσης υπάρχουν οι οπτικοί βιοαισθητήρες, οι ηλεκτροχημικοί, οι θερμικοί και άλλοι. Τα λεπτά υμένια στους αισθητήρες και βιοαισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη βιολογική αναγνώριση και ενίσχυση καθώς και για τη μετατροπή και επεξεργασία του ηλεκτρονικού σήματος. Όταν δημιουργούνται λεπτά υμένια για βιοαισθητήρες ειδικά βιομόρια παγιδεύονται στο υμένιο κατά τη διάρκεια της σύνθεσής του. Τα υμένια του πρωσικού μπλε χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία αμπερομετρικών ενζυμικών βιοαισθητήρων (L. Filipponi, D. Sutherland).

Η αγωγιμότητα του Γραφίτη

Ο άνθρακας στη φύση βρίσκεται σε διάφορες αλλοτροπικές μορφές που έχουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο που συνδέονται τα άτομα του άνθρακα σε κάθε αλλοτροπική μορφή. Από τις πιο γνωστές αλλοτροπικές μορφές του άνθρακα είναι ο γραφίτης, το διαμάντι και το κάρβουνο. Ο γραφίτης άγει το ηλεκτρικό ρεύμα αντίθετα με το διαμάντι και το κάρβουνο. Η αγωγιμότητα του γραφίτη οφείλεται στη νανοδομή του που φαίνεται στην εικόνα 1 (L.Filipponi, D. Sutherland).

Εικόνα 1: Η δομή του διαμαντιού και η δομή του γραφίτη

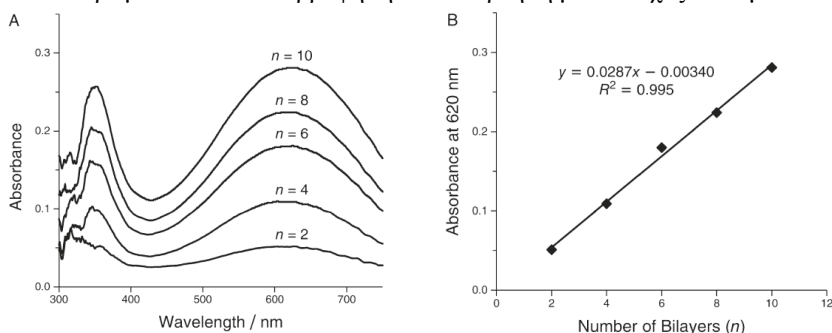


Ο Νόμος του Lambert-Beer για τα Λεπτά Υμένια

Η απορρόφηση ενός έγχρωμου λεπτού υμενίου για δοσμένο μήκος κύματος αυξάνεται καθώς το λεπτό υμένιο γίνεται πιο χοντρό.

Στην εικόνα 2 φαίνεται η σχέση της απορρόφησης του φωτός στα 620nm (μέγιστο απορρόφησης για το συγκεκριμένο υλικό) με το πάχος του υλικού (Schmidt et al). Ουσιαστικά πρόκειται για τον νόμο Lambert-Beer, ο οποίος προβλέπει ότι η απορροφητικότητα βρίσκεται σε γραμμική σχέση με το πάχος του υλικού. Η απορροφητικότητα A , μπορεί να βρεθεί από τον δεκαδικό λογάριθμο του πηλίκου I_0/I όπου I_0 είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα υλικό και I η ένταση της εκπεμπόμενης από αυτό. Είναι δηλαδή : $A = \log(I_0/I)$

Εικόνα 2: Φάσματα απορρόφησης λεπτών υμενίων με αυξανόμενο αριθμό διαστρωματώσεων. Απορρόφηση σε συνάρτηση με το πάχος του υμενίου.



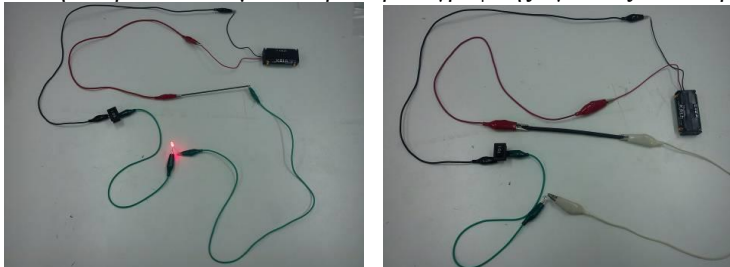
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Πρώτη Πειραματική Διάταξη

Σκοπός του πειράματος είναι να δείξουμε ότι ο γραφίτης άγει ενώ το κάρβουνο δεν άγει. Θα χρησιμοποιήσουμε τα ακόλουθα υλικά : τέσσερα καλώδια με κροκοδειλάκια, ένα διακόπτη, δύο μπαταρίες των 1,5V, ένα λαμπάκι LED και μία μύτη γραφίτη.

Πραγματοποιούμε το απλό ηλεκτρικό κύκλωμα της εικόνας 3. Παρατηρούμε ότι όταν στο κύκλωμα περιλαμβάνεται η μύτη γραφίτη το λαμπάκι LED ανάβει. Αντίθετα όταν στο κύκλωμα αντικαταστήσουμε τη μύτη γραφίτη με μύτη από κάρβουνο το λαμπάκι LED δεν ανάβει.

Εικόνα 3: Τα ηλεκτρικά κυκλώματα. Αριστερά ο γραφίτης άγει, δεξιά το κάρβουνο όχι.



Δεύτερη Πειραματική Διάταξη

Σκοπός: α) η παρασκευή ηλεκτροχρωμικών λεπτών υμενίων Πρωσικού Μπλε, σε διαφορετικά πάχη, μέσω ηλεκτροαπόθεσης και β) η μελέτη της φωτοαπορρόφησης των λεπτών υμενίων σε συνάρτηση με το πάχος τους.

A. Διάταξη και Διαδικασία Ηλεκτροαπόθεσης Λεπτών Υμενίων (University of Wisconsin-Madison). Απαιτούμενα υλικά:

1) Ηλεκτρόδιο από γραφίτη : Κατασκευάζεται από μύτες μηχανικού μολυβιού πάχους 2mm και μήκους 12cm. Τέσσερα κομμάτια των τριών εκατοστών και ένα των τεσσάρων εκατοστών, στο κέντρο, ενώνονται με αγωγή ταινία (εικόνα 4α).

2) Πρωσικό Μπλε $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$. Για τη παρασκευή του πρωσικού μπλε απαιτούνται:
α. Διάλυμα $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.05M β. Διάλυμα $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.05M γ. Διάλυμα HCl 1M. Τα διαλύματα αναμειγνύονται σε αναλογία 10:10:5 (εικόνα 4β).

Εικόνα 4: α. Το ηλεκτρόδιο γραφίτη, β. τα διαλύματα και το πρωσικό μπλε. γ. η κυψελίδα ηλεκτροαπόθεσης στην αρχική της μορφή και τα άλλα υλικά.



3) Κυψελίδα ηλεκτροαπόθεσης: Χρειάζονται: α. ένα γυάλινο δοχείο και β. μπλέ πολυστερίνη κομμένη κατάλληλα ώστε να χρησιμοποιηθεί σαν καπάκι στο δοχείο. Στο καπάκι αυτό δημιουργούνται δύο οπές ώστε να περάσουν από αυτές δύο ηλεκτρόδια.

4) Επίσης χρειάζονται : Ηλεκτρικά καλώδια, Διακόπτης, Αμπερόμετρο, Μπαταρία 6V, Ποτενσιόμετρο 50KΩ και 10 στροφών.

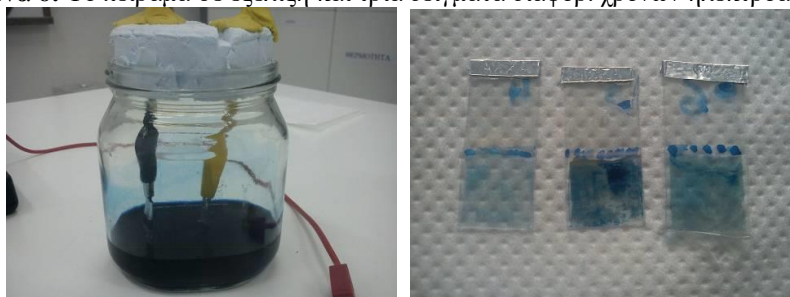
Στη κυψελίδα ηλεκτροαπόθεσης εισέρχονται δύο καλώδια με κροκοδειλάκια. Τα καλώδια αυτά «δένονται» σε δύο ξυλαράκια ώστε να παραμένει σταθερή η απόσταση τους. Στο ένα καλώδιο συνδέεται το ηλεκτρόδιο γραφίτη και στο άλλο, ηλεκτρόδιο-κομμάτι, ιδίων διαστάσεων με το ηλεκτρόδιο γραφίτη, από την διαφανή μεμβράνη PET-ITO. Το ηλεκτρόδιο του γραφίτη συνδέεται με το διακόπτη, αυτός με τη μπαταρία, η οποία συνδέεται με το ποτενσιόμετρο. Σε σειρά με το ποτενσιόμετρο συνδέεται το Αμπερόμετρο και αυτό με το ηλεκτρόδιο της αγώγιμης μεμβράνης PET-ITO.

Εικόνα 5: α. Η κυψελίδα και το ηλεκτρικό κύκλωμα, β. η διαφανής μεμβράνη PET-ITO και γ. τα δύο ηλεκτρόδια γραφίτη και PET-ITO όπου θα γίνει η ηλεκτροαπόθεση.



Η ηλεκτροαπόθεση γίνεται σε ηλεκτρόδιο από διαφανή μεμβράνη PET-ITO (εικ. 5) που έχει διαστάσεις 2cm x 1cm. Η μία πλευρά του φιλμ είναι αγώγιμη. Μετρώντας την αντίσταση με ωμόμετρο μπορούμε να βρούμε την αγώγιμη πλευρά την οποία και σημειώνουμε ώστε να «βλέπει» το ηλεκτρόδιο γραφίτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Πρέπει να αναφέρουμε ότι η αντίσταση στα ηλεκτρόδια PET-ITO είναι 90Ω για το Δ1, 267Ω για το Δ2 και 1048 Ω για το Δ3. Φαίνεται ότι οι μεμβράνες PET-ITO δεν είναι ομοιογενείς. Στο ηλεκτρόδιο PET-ITO σημειώνουμε πόσο τμήμα του θα βυθιστεί μέσα στο διάλυμα του πρωσικού μπλε. Τα δύο ηλεκτρόδια βυθίζονται στο πρωσικό μπλε όπως φαίνεται στην εικόνα 6.

Εικόνα 6: Το πείραμα σε εξέλιξη και τρία δείγματα διαφορ. χρόνων ηλεκτροαπόθεσης



Το τμήμα των ηλεκτροδίων που βυθίζεται έχει εμβαδόν περίπου 2cm^2 . Οι ηλεκτροαποθέσεις που έγιναν ήταν τριών ειδών. Η πρώτη χρονικής διάρκειας 20 λεπτών, η δεύτερη διάρκειας 30 λεπτών και οι τρίτη διάρκειας 40 λεπτών. Το ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν περίπου $320\mu\text{A}$. Τα δείγματα μετά την ηλεκτροαπόθεση ξεπλένονται σε απεσταγμένο νερό και αφήνονται να στεγνώσουν. Η φωτογραφία των τριών δειγμάτων φαίνεται στην εικόνα 6 όπου είναι και ορατή η ανομοιογένεια στην απόθεση κάτι που οφείλεται μάλλον στην ανομοιογένεια της μεμβράνης PET-ITO.

Β. Μετρήσεις Απορροφητικότητας

Η κλασσική μέθοδος για τη μέτρηση της απορροφητικότητας είναι με τη χρήση του φασματοφωτόμετρου. Για τα λεπτά υμένα όμως χρειάζονται εξειδικευμένα όργανα που δεν διαθέτει ένα σχολικό εργαστήριο. Μια απλή μέθοδος για να μετρήσει κανείς την απορροφητικότητα των λεπτών υμενίων είναι η χρήση σκάνερ για τη λήψη της εικόνας του υμενίου και η περαιτέρω ανάλυση της με ένα πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνας.

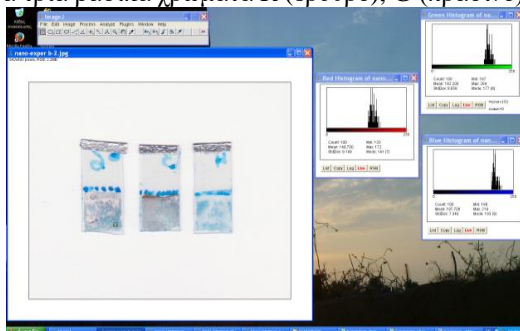
Εικόνα 7: Το σκάνερ και τα PET-ITO έτοιμα για την λήψη της εικόνας



Γ. Επεξεργασία της εικόνας

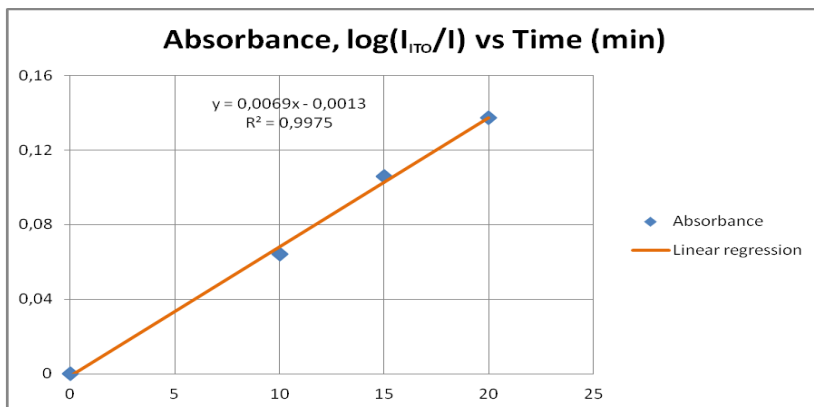
Για την επεξεργασία της σκαναρισμένης εικόνας των δειγμάτων των λεπτών υμενίων χρησιμοποιήθηκε το ImageJ που είναι λογισμικό ελεύθερης χρήσης σε Java. Το λογισμικό αυτό έχει τα πλεονεκτήματα ότι τρέχει παντού, είναι ανοιχτού κώδικα και ίσως είναι το γρηγορότερο στο είδος του. Επεξεργάζεται 40 εκατομμύρια pixels το δευτερόλεπτο (δηλ. μία εικόνα 2048×2048 σε 0,1s) (Kohl et al).

Εικόνα 8: Τα σκαναρισμένα δείγματα και τα φάσματα απορρόφησης, επιλεγμένης περιοχής, στα τρία βασικά χρώματα R (ερυθρό), G (πράσινο) και B (μπλε).



Η εικόνα που πήραμε με το σκάνερ, διαβάστηκε με το ImageJ. Επιλέξαμε τις περιοχές που θέλαμε να αναλυθούν και πήραμε ιστογράμματα για κάθε βασικό χρώμα ερυθρό, πράσινο και μπλέ. Εισάγαμε τις μετρήσεις φωτεινότητας σε υπολογιστικό φύλλο Excel με σκοπό να υπολογίσουμε την απορροφητικότητα κάθε δείγματος.

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα απορροφητικότητας σε συνάρτηση με το χρόνο ηλεκτροαπόθεσης. Για να δείξουμε την συσχέτιση των πειραματικών μας σημείων χαράξαμε και την γραμμή τάσης. Στο διάγραμμα φαίνεται επιπλέον και η εξίσωση της γραμμής τάσης. Το R^2 είναι πολύ ικανοποιητικό (πολύ κοντά στο 1).



Άρα τα σημεία βρίσκονται με καλή προσέγγιση σε μια ευθεία δηλαδή ικανοποιείται ο νόμος του Lambert. Η απορρόφηση του φωτός έχει γραμμική εξάρτηση από το χρόνο ηλεκτροαπόθεσης επιφάνειας δηλαδή από το πάχος του λεπτού υμενίου.

Τρίτη Πειραματική Διάταξη

Σκοπός : Επιβεβαίωση των ηλεκτροχρωμικών ιδιοτήτων του Προσικού Μπλε.

A) Υλικά :

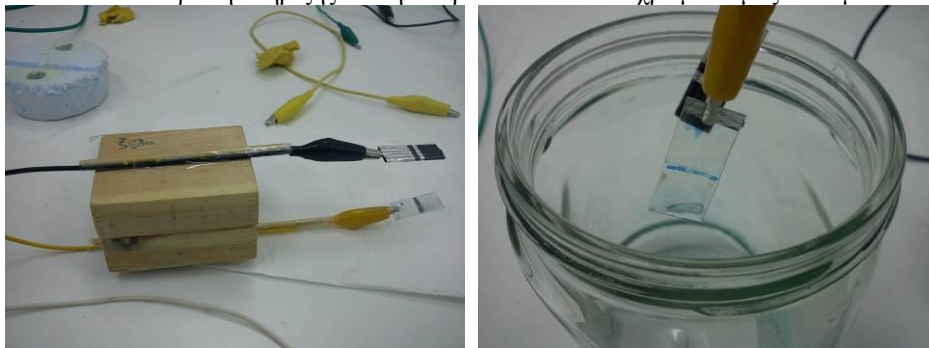
Το δοχείο ηλεκτροαπόθεσης, 25ml διάλυμα KCl 1M και μερικές σταγόνες HCl 0.05M ώστε να γίνει το διάλυμα KCl οξικό. Ξύλινη βάση στήριξης για τα καλώδια των ηλεκτροδίων (εικόνα 9). Μία μπαταρία 1.5V .

B) Διαδικασία

Ρίχνεται στο δοχείο ηλεκτροαπόθεσης το οξικό διάλυμα KCl και τοποθετούνται στα καλώδια ένα δείγμα λεπτού υμενίου και ένα ηλεκτρόδιο γραφίτη. Τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται με την μπαταρία. Το ηλεκτρόδιο PET-ITO με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας και το ηλεκτρόδιο γραφίτη με το θετικό πόλο της μπαταρίας. Βραχυκυκλώνονται τα δύο ηλεκτρόδια. Αυτό γίνεται για να σταθεροποιηθεί το υμένιο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 2-3 φορές.

Στη συνέχεια ο θετικός πόλος της μπαταρίας συνδέεται με το PET-ITO και ο αρνητικός πόλος με το γραφίτη. Με το θετικό δυναμικό, το λεπτό υμένιο γίνεται από μπλε διαφανές. Στην εικόνα 9 φαίνεται ο αποχρωματισμός του υμενίου. Βραχυκυκλώνοντας τα ηλεκτρόδια το υμένιο πρέπει να επανέλθει στο αρχικό του μπλε χρώμα κάτι που δεν έγινε στα δικά μας δείγματα.

Εικόνα 9: Η βάση στήριξης των ηλεκτροδίων και ο αποχρωματισμός του υμενίου



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρχικά, με δύο απλά πειράματα μπορέσαμε να διαπιστώσουμε ότι ο γραφίτης είναι αγωγίμος αντίθετα με το κάρβουνο που δεν είναι. Στην συνέχεια με ένα πείραμα ηλεκτροαπόθεσης μεταξύ δύο ηλεκτροδίων γραφίτη και PET-ITO, υπολογίσαμε τις τιμές της απορροφητικότητας λεπτού υμενίου Πρωσικού Μπλε σε συνάρτηση με το χρόνο ηλεκτροαπόθεσης και επιβεβαιώσαμε τον νόμο του Lambert (η απορρόφηση του φωτός έχει γραμμική εξάρτηση από το χρόνο ηλεκτροαπόθεσης επιφάνειας). Προφανώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος ηλεκτροαπόθεσης τόσο πιο παχύ είναι το λεπτό υμένιο.

Τέλος εκτελέσαμε πείραμα αποχρωματισμού των λεπτών υμενίων που παρασκευάσαμε. Ενώ τα υμένια αποχρωματίστηκαν, στη συνέχεια δεν επανήλθε το μπλε χρώμα. Αυτό είναι ένα θέμα που συνεχίζουμε να διερευνούμε. Πιθανά να οφείλεται στην ανομοιογένεια που παρουσιάζουν τα φιλμ των PET-ITO που χρησιμοποιήθηκαν ως βάσεις εναπόθεσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τους υπεύθυνους του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής «NANOPINION» και τον Εθνικό Συντονιστή του Προγράμματος για την Ελλάδα, Διευθυντή του Σχολείου μας κ. Στυλιανό Φριλίγκο για την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια της εργασίας. Ευχαριστούμε επίσης θερμά τους κ. Χ. Πολάτογλου, Αν. Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ και τον κ. Γ. Μεμετζίδη, Υποδιευθυντή του σχολείου μας, για την πολύπλευρη βοήθειά τους ώστε να δοθούν λύσεις σε όποια προβλήματα είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας μας αυτής. Ακόμη ευχαριστούμε το Εργαστήριο Νανοτεχνολογίας του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. για την προσφορά των PET-ITO.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

L. Filippini, D. Sutherland “Nanotechnologies, Principles, Applications, Implications and Hands-on Activities, A compendium for educators” 2013.

Schmidt et al, “Layer-by-Layer Assembly of a pH-Responsive and Electrochromic Thin Film” J. Chem.Edu.2010, 87(2), 207-211.

Kohl et al, “Demonstration of Absorbance Using Digital Color Image Analysis and Colored Solutions”, J. Chem. Edu. 2006, 83(4), 644-646.