

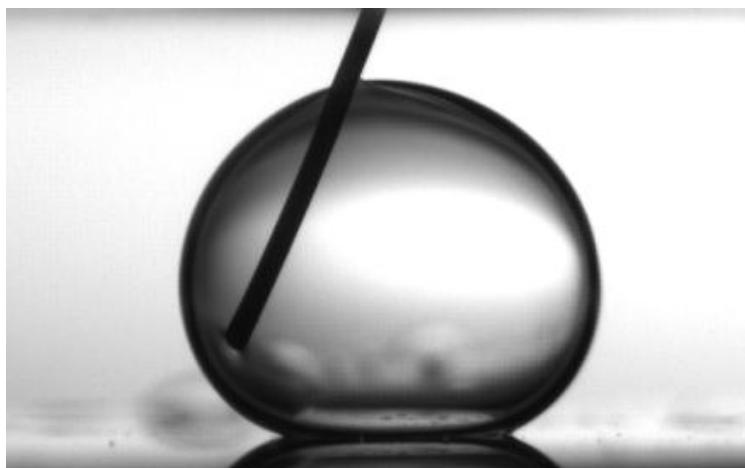


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ : ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ &
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συρίγου Αδαμαντία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ**



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ Γ. ΜΠΟΥΝΤΟΥΒΗΣ

ΑΘΗΝΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Ανδρέα Γ. Μπουντουβή για την ευκαιρία που μου έδωσε να πραγματοποιήσω τη διπλωματική μου εργασία σε συνεργασία με την ερευνητική του ομάδα. Τον ευχαριστώ για το χρόνο που διέθεσε αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές και διορθώσεις κατά τη συγγραφή της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρα Αθανάσιο Παπαθανασίου για την καθημερινή του συνεργασία και την καθοδήγηση του για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο Παπαγεωργίου για την συνεχή βοήθεια που μου παρείχε, την υπομονή του στην καθημερινή συνεργασία που είχαμε αλλά και γιατί μοιράστηκε μαζί μου τις γνώσεις του, την εμπειρία του και το χρόνο του.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, τους γονείς μου Παύλο και Γαλήνη, τον αδερφό μου Σωτήρη αλλά και τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους και την στήριξη τους όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλεκτροδιαβροχή σε διηλεκτρικό (electrowetting on dielectric, EWOD) αφορά στην ενίσχυση της διαβροχής διηλεκτρικών επιφανειών από αγώγιμο υγρό, συνήθως σε μορφή μικρο-σταγόνων, με την επιβολή ηλεκτρικής τάσης μεταξύ του υγρού και ηλεκτροδίου επικαλυμμένου με το διηλεκτρικό. Με την εφαρμογή τάσης, φορτία συσσωρεύονται στο τοίχωμα του ηλεκτροδίου ενώ αντίθετα φορτία συσσωρεύονται στη διεπιφάνεια υγρού/στερεού στο αγώγιμο υγρό. Η συσσωρευμένη ηλεκτροστατική ενέργεια μειώνει τη διεπιφανειακή ενέργεια υγρού/διηλεκτρικού και έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της διαβροχής του στερεού που συνοδεύεται από μείωση της φαινόμενης γωνίας επαφής μεταξύ υγρού και διηλεκτρικού. Μετά από κάποια κρίσιμη τάση (κρίσιμη τάση κορεσμού, V_s) η γωνία επαφής δεν μειώνεται περαιτέρω και παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την αύξηση της τάσης. Η γωνία επαφής αυτή ονομάζεται γωνία κορεσμού, θ_c . Συνέπεια του κορεσμού είναι αρκετές φορές η κατάρρευση του διηλεκτρικού που εμφανίζεται στις υπο μελέτη σταγόνες με τη μορφή φυσαλίδων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιούνται πειράματα ηλεκτροδιαβροχής σε επικαθήμενες σταγόνες ιοντικών τασιενεργών υγρών. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα ηλεκτροδιαβροχής για περιβάλλον μέσο του αγώγιμου υγρού, αέρα ή δωδεκάνιου σε AC ή +DC εφαρμοζόμενη τάση. Οι γωνίες κορεσμού και οι τάσεις κορεσμού καταγράφονται για καθένα από τα πειράματα αυτά και συγκρίνονται μεταξύ τους. Στη συνέχεια περιγράφονται πειράματα δοκιμασιών αντοχής της διηλεκτρικής δομής σε περιβάλλον δωδεκάνιο (συνεχής εφαρμογή από μερικά λεπτά ως και ώρες τάσης AC, +DC ή -DC) για τα εν λόγω υγρά. Παρατηρείται εξάρτηση της κατάρρευσης του διηλεκτρικού από το μέγεθος των ιόντων του διαλύματος σε σχέση με το είδος της πόλωσης της εφαρμοζόμενης τάσης, (+DC ή -DC).

Τέλος, για να μελετηθεί περαιτέρω η εξάρτηση της διηλεκτρικής κατάρρευσης από το μέγεθος των ιόντων έγιναν μετρήσεις ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό. Τα αποτελέσματα έδειξαν σύνδεση του κορεσμού της γωνίας επαφής με την κατάρρευση του διηλεκτρικού που επηρεάζεται από το μέγεθος των ιόντων του υπο εξέταση υγρού σε σχέση με το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης (+DC ή -DC).

ABSTRACT

Electrowetting on dielectric (EWOD) is used to modify the wettability of a dielectric solid substrate by a conductive liquid (often microdroplets) through a suitable application of an external voltage applied between a conductive drop and a flat electrode coated by the dielectric. The applied voltage induces opposite charging accumulation between the electrode and the liquid. The accumulated electrostatic energy reduces the liquid/solid interfacial energy, thus enhancing the wetting of the solid by the liquid; as a consequence, the contact angle between the liquid and the dielectric is reduced. After a critical voltage, called saturation voltage, V_s , the contact angle remains the same – saturation contact angle – and becomes independent of the applied voltage. Saturation is associated dielectric breakdown, which is often detected by bubbles rising in the vicinity of the contact line of the liquid droplet.

This thesis deals with electrowetting experiments with ionic surfactants. At first, electrowetting tests were performed for oil and air ambient at AC or +DC applied voltage. The contact angle saturation and the critical saturation voltage are found and compared for each test. Lifetime EW tests of the dielectric are performed in dodecane ambient by continuous long term application (for minutes or even hours) of +DC, -DC or AC voltage. All obtained measurements support an electrowetting dielectric failure mode that is highly dependent on ion size and on the type of the applied voltage (+DC or -DC).

For further investigation concerning the link between dielectric breakdown and the size of ions of the surfactant, leakage current measurements were performed. The results show a connection between the contact angle saturation and the dielectric breakdown, which depends on the size of the ions of the surfactant when different voltage is applied (+DC or -DC).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	8
<i>ΜΙΚΡΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ</i>	8
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Ιστορική Αναδρομή	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	12
<i>ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗ ΣΕ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ</i>	12
2.1 Διεπιφάνεια και επιφανειακή τάση.....	2
2.2 Γωνία επαφής σταγόνας υγρού-Εξίσωση Young	13
2.3 Υστέρηση γωνίας επαφής.....	14
2.4 Διαβροχή επιφανειών : Υδρόφιλες και υδρόφοβες επιφάνειες.....	15
2.5 Ηλεκτροδιαβροχή σε διηλεκτρικό (EWOD).....	17
2.6 Κορεσμός γωνίας επαφής.....	18
2.7 Διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιαβροχή.....	23
2.8 Κατάρρευση του διηλεκτρικού	27
2.9 Διατάξεις βασισόμενες στη ηλεκτροδιαβροχή και εφαρμογές	29
2.9.1 Μετακίνηση και καθοδήγηση σταγόνων	29
2.9.2 Οπτικές εφαρμογές.....	31
2.9.3 Οθόνες Ηλεκτροδιαβροχής.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	36
<i>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ</i>	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Διηλεκτρική Δομή-Υλικά.....	36
3.3 Πειραματικές διάταξεις.....	38
3.3.1 Πειραματική διάταξη ηλεκτροδιαβροχής για την μέτρηση γωνίας επαφής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης	38

3.3.2 Πειραματική διάταξη για μετρήσεις ρεύματων διαρροής απο το διηλεκτρικό..	41
3.4 Υγρά που χρησιμοποιήθηκαν	42
3.5 Υπολογισμός της επιφανειακής τάσης ενός υγρού μέσω πειράματος ηλεκτροδιαβροχής.....	48
3.6 Μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπο εξέταση διαλυμάτων.....	51
3.7 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της γωνίας επαφής.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	54
ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΟΧΗ ΣΕ ΕΠΙΚΑΘΗΜΕΝΕΣ ΣΤΑΓΟΝΕΣ	543
4.1 Εισαγωγή-Σκοπός των πειραματικών μετρήσεων	54
4.2 Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής	55
4.2.1 Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής σταγόνων DTAC,SDS,DI σε αέρα και δωδεκάνιο	54
4.2.2 Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής με σταγόνα DTAC,SDS υπο τάση : AC, +DC, -DC	59
4.2.3 Δοκιμασίες αντοχής της διηλεκτρικής δομής με σταγόνα DTAC	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	69
ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟ	69
5.1 Εισαγωγή-Σκοπός των πειραματικών μετρήσεων	69
5.2 Πειράματα ρευμάτων διαρροής απο το διηλεκτρικό	70
5.2.1 Μέτρηση ρευμάτων διαρροής απο το διηλεκτρικό για +DC εφαρμοζόμενη τάση	70
5.2.2 Μέτρηση ρευμάτων διαρροής απο το διηλεκτρικό για –DC εφαρμοζόμενη τάση	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	83
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	83

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 87

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Μικρορευστομηχανική

1.1 Εισαγωγή

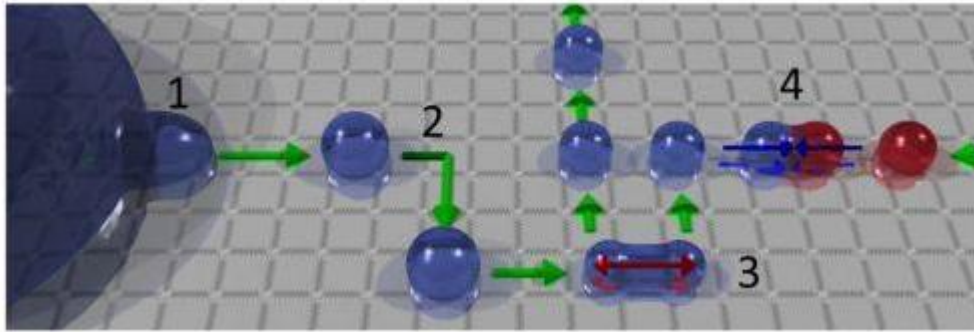
Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη στη βιοτεχνολογία απαιτεί όλο και μεγαλύτερο αριθμό διεργασιών όπως αναλύσεις DNA ή φαρμάκων, τεχνικές για έγκαιρη διάγνωση ασθενειών κ.α.. Όλες αυτές οι διαδικασίες δημιούργησαν την ανάγκη να μειωθεί το μέγεθος των διατάξεων στα οποία διεξάγονται. Ο χειρισμός ρευστών που μετακινούνται μέσα σε μικρά κανάλια ονομάζεται *μικρορευστομηχανική*, και τα συστήματα όπου διεξάγονται πολύπλοκες αναλύσεις βιολογικών ρευστών ονομάζονται *micro Total chemical Analysis Systems* (μTAS, μικρο-συστήματα ολικής χημικής ανάλυσης) ή “lab-on-a-chip” ή bio-MEMS (ηλεκτρονικά μηχανικά βιο-μικροσυστήματα) (Σχήμα 1.1) [2].



Σχήμα 1.1 Διάταξη lab-on-a-chip

Τα συστήματα αυτά προσφέρουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών εργαστηριακών διεργασιών. Οι απαιτούμενες ποσότητες των υγρών είναι πολύ μικρές (ποσοτήτων της τάξης των μικρολίτρων ή και νανολίτρων), και επιπλέον η μείωση των διαστάσεων επιτρέπει την ολοκλήρωση και τον αυτοματισμό πολλών διεργασιών πάνω σε μία μόνο διάταξη προκαλώντας μια αξιοσημείωτη αύξηση στην απόδοση, την παραγωγή και τη λειτουργικότητα.

Σε αντίθεση με τη μικροηλεκτρονική, όπου δίνεται έμφαση στη σμίκρυνση των τρανζίστορς, η μικρορευστομηχανική εστιάζει περισσότερο στη δημιουργία πιο πολύπλοκων συστημάτων για το χειρισμό των ρευστών (Σχήμα 1.1), παρά στη μείωση της διάστασης των καναλιών.



Σχήμα 1.2 Τεσσερις διαφορετικές διεργασίες μιας μικρο-ρευστομηχανικής διάταξης που βασίζεται στην ηλεκτροδιαβροχή: δημιουργία (1), κίνηση (2), διαχωρισμός (3) και ανάμιξη σταγόνων (4)

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η μικρορευστομηχανική ασχολείται με τα φαινόμενα που υπεισέρχονται στη συμπεριφορά, στον ακριβή έλεγχο και στη διαχείριση μικρών ποσοτήτων ρευστών (10^{-6} με 10^{-15} λίτρα). Ο όρος «μίκρο» προσδίδει τα εξής χαρακτηριστικά:

- α) μικρούς όγκους (μl, nl, pl, fl),
- β) μικρό μέγεθος και
- γ) χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Ο τομέας αυτός συνδυάζει διάφορους επιστημονικούς κλάδους, όπως τη φυσική, τη χημεία, τη μικροτεχνολογία και η βιοτεχνολογία, με πολλές εφαρμογές στο σχεδιασμό συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται μικρές ποσότητες ρευστών. Οι τέσσερις τομείς που οδήγησαν στην ανάπτυξη του τομέα της μικρορευστομηχανικής είναι: η μοριακή ανάλυση, η άμυνα από βιολογικές απειλές, η μοριακή βιολογία και η μικροηλεκτρονική.

Ο τομέας της μοριακής ανάλυσης οδήγησε στην ανάπτυξη της μικρορευστομηχανικής, λόγω της χρήσης μικροαναλυτικών μεθόδων, όπως: αέρια χρωματογραφία (GPC), υψηλής πίεσης υγρή χρωματογραφία (HPLC) και τριχοειδής

ηλεκτροφόρηση (CE). Αυτές οι μέθοδοι είχαν υψηλή ευαισθησία και υψηλή ακρίβεια χρησιμοποιώντας πολύ μικρές ποσότητες δειγμάτων. Μετά την επιτυχία αυτών των μικροαναλυτικών μεθόδων, ήταν φυσικό να αναπτυχθούν νέες εφαρμογές στη μικροκλίμακα στον τομέα της χημείας και της βιοχημείας.

Η αντίληψη ότι τα χημικά και βιολογικά όπλα προσφέρουν σημαντικές στρατιωτικές και τρομοκρατικές απειλές, ήταν ένας ακόμη παράγοντας προς την ανάπτυξη των μικρορευστομηχανικών συστημάτων. Για τη θωράκιση από τέτοιες απειλές, υποστηρίχθηκαν έρευνες που είχαν ως στόχο την ανάπτυξη μικρορευστομηχανικών συστημάτων που θα προσέφεραν στην ανίχνευση χημικών και βιολογικών απειλών.

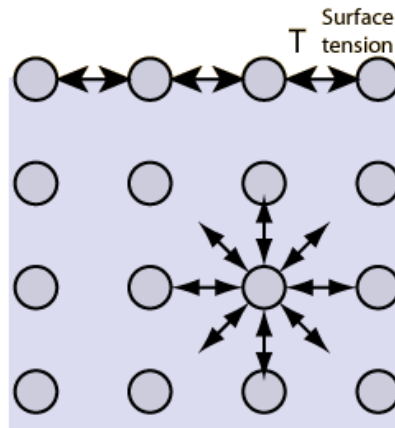
Ο τομέας της μοριακής βιολογίας βοήθησε εξίσου στην ανάπτυξη της μικρορευστομηχανικής. Με τη σημαντική πρόοδο της γενετικής στη δεκαετία του 80, ακολούθησε η εμφάνιση άλλων τομέων της μικροανάλυσης σχετικών με τη μοριακή βιολογία, όπως η ανάλυση της αλληλουχίας του DNA. Αυτές οι αναλύσεις απαιτούν μεθόδους με μεγαλύτερη απόδοση και μεγαλύτερη ευαισθησία από εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν στη βιολογία. Η μικρορευστομηχανική προσέφερε τη δυνατότητα υπερνίκησης των προβλημάτων αυτών.

Τέλος, ο τομέας της μικροηλεκτρονικής αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη της μικρορευστομηχανικής. Η βασική ιδέα ήταν ότι η φωτολιθογραφία και άλλες σχετικές τεχνολογίες που είχαν μεγάλη επιτυχία στη μικροηλεκτρονική πυριτίου και σε μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), είναι ευθέως εφαρμοζόμενες και στη μικρορευστομηχανική. Σε κάποιες από τις πρώτες ερευνητικές εργασίες σε συστήματα μικρορευστομηχανικής, χρησιμοποιήθηκαν πυρίτιο και γυαλί, όμως αυτά τα υλικά αντικαθίστανται σταδιακά από πλαστικά. Για αναλύσεις νερού, οι συσκευές που είναι κατασκευασμένες από πυρίτιο και γυαλί, κρίνονται συνήθως μη αναγκαίες και ακατάλληλες. Το πυρίτιο είναι ακριβό και αδιαφανές στην ορατή και στην υπεριώδη ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί με συμβατικές οπτικές μεθόδους ανίχνευσης. Είναι πιο εύκολο, τα κομμάτια που απαιτούνται για μικροαναλυτικά συστήματα να κατασκευαστούν από ελαστομερή και όχι άκαμπτα υλικά (ειδικότερα οι βαλβίδες και οι αντλίες).

Μεγάλο μέρος της έρευνας στα συστήματα ηλεκτροδιαβροχής έχει επιτευχθεί σε ένα πολυμερές – PDMS (πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο) – του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές από αυτές του πυριτίου. Το πολυμερές, PDMS, είναι ένα διαφανές, μαλακό πολυμερές. Αν τα συστήματα μικρορευστομηχανικής θα χρησιμοποιούν ευρέως το πολυμερές PDMS ή κάποιο άλλο πολυμερές, όπως πολυολεφίνη, απομένει να το δούμε. Εντούτοις, η μικροηλεκτρονική είναι απολύτως αναγκαία για την ανάπτυξη της μικρορευστομηχανικής, και καθώς ο τομέας έχει αναπτυχθεί αρκετά, το γυαλί, το σίδηρο και το πυρίτιο είναι τα πλέον κατάλληλα υλικά για την κατασκευή ειδικών συστημάτων που απαιτούν χημική και θερμική σταθερότητα.

Κεφάλαιο 2 : Ηλεκτροδιαβροχή σε Διηλεκτρικά

2.1 Διεπιφανειακή και επιφανειακή τάση



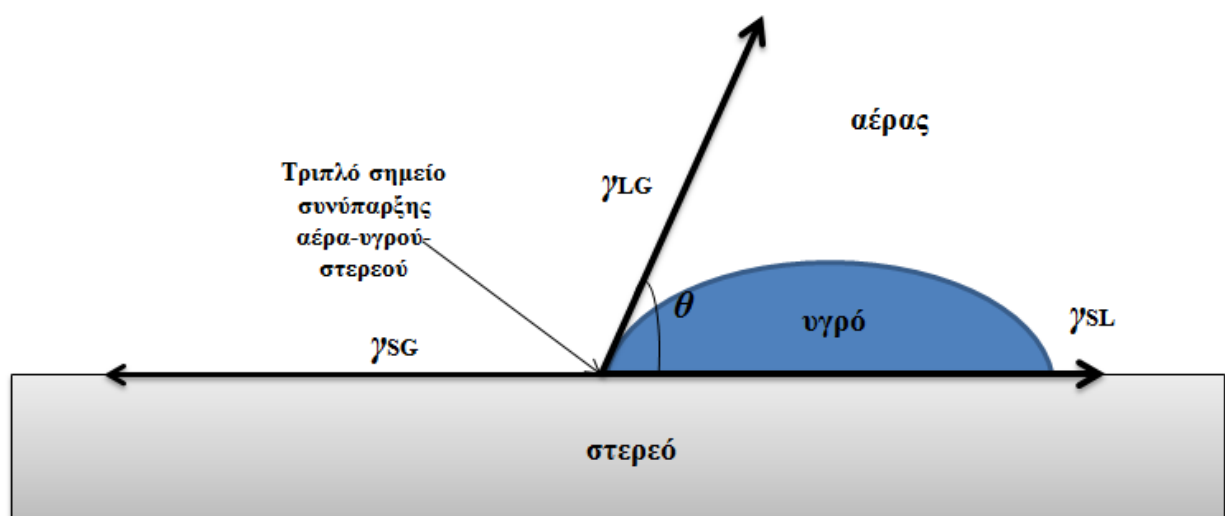
Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση των δυνάμεων που ασκούνται στο εσωτερικό και στην επιφάνεια του υγρού

Έστω μια διεπιφάνεια υγρού-αέρα. Τα μόρια στο εσωτερικό του υγρού αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους μόρια ενώ τα επιφανειακά μόρια αλληλεπιδρούν με λιγότερα μόρια υγρού αλλά και με μόρια αέρα με τα οποία έρχονται σε επαφή. (Σχήμα 2.1). Ωστόσο εξαιτίας της χαμηλής πυκνότητας των αερίων, οι αλληλεπιδράσεις είναι ασθενέστερες σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται στη κύρια μάζα του υγρού. Αποτέλεσμα αυτού είναι να δημιουργείται μια τοπική ασυμμετρία στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων που οδηγεί στην ελάττωση της επιφανειακής ενέργειας. Μέτρο των ελκτικών αυτών δυνάμεων προς το εσωτερικό ενός υγρού είναι η **επιφανειακή τάση**, οι μονάδες της οποίας είναι J/m^2 ή N/m . Προκύπτει ότι η διεπιφανειακή τάση είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η ισχύς των διαμοριακών δυνάμεων και όσο διαφέρουν οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ δύο γειτονικών φάσεων. Για παράδειγμα η διεπιφανειακή τάση νερού-αέρα είναι $\sim 72mN/m$ ενώ η διεπιφανειακή τάση νερού-λάδιου είναι $\sim 50mN/m$. Η επιφανειακή τάση είναι ένα μέτρο της συνεκτικής ενέργειας σε μια διεπιφάνεια.

2.2 Γωνία επαφής σταγόνας υγρού- Εξίσωση Young

Όταν μια σταγόνα υγρού τοποθετηθεί πάνω σε μια επιφάνεια τότε η γωνία που σχηματίζεται στο τριπλό σημείο συνύπαρξης στερεού, υγρού και αερίου ονομάζεται **γωνία επαφής, θ** (βλ. Σχ. 2.2). Η γωνία επαφής, θ , καθορίζεται από τις συνιστώσες της επιφανειακής ελεύθερης ενέργειας του υγρού και του στερεού. Το 1805, ο Βρετανός φυσικός Thomas Young, δουλεύοντας στο πανεπιστήμιο του Cambridge, ανακάλυψε ότι η γωνία επαφής εξαρτάται από τρεις διεπιφανειακές τάσεις : μεταξύ του υγρού και της στερεής επιφάνειας γ_{SL} , μεταξύ της επιφάνειας και του αέρα γ_{SG} , και μεταξύ του υγρού και του αέρα γ_{LG} . Στην ισορροπία, οι τρεις δυνάμεις που ασκούνται στη σταγόνα εξισορροπούνται καθώς η σταγόνα δεν μετακινείται και αποτυπώνεται στην παρακάτω εξίσωση, γνωστή και ως εξίσωση Young (1.1) [1]

$$\gamma_{LG} \cos \theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG} = 0 \quad (1.1)$$

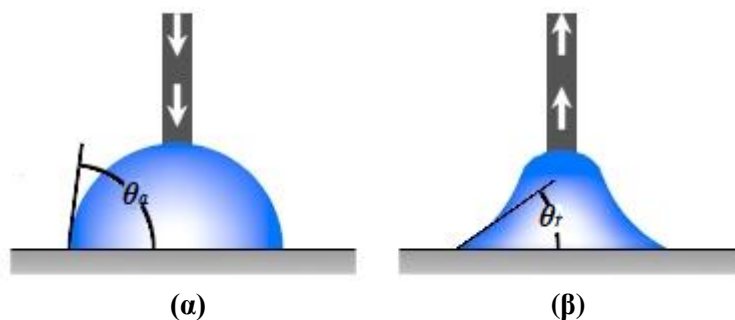


Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση των δυνάμεων που ασκούνται στο τριπλό σημείο συνύπαρξης στερεού, υγρού και αέρα όπως επίσης και της μετρούμενης γωνίας επαφής.

Ο όρος $\cos\theta$ μεταβάλλεται από +1 (πλήρης διαβροχή) μέχρι -1 (πλήρης μη διαβροχή). Η εξίσωση Young (1.1) ισχύει με την υπόθεση ότι η επιφάνεια του στερεού είναι ομαλή, ομοιογενής και άκαμπτη. Θα πρέπει επίσης να είναι χημικά και φυσικά αδρανής όσον αφορά τα υγρά με τα οποία έρχεται σε επαφή.

2.3 Υστέρηση γωνίας επαφής

Στην περίπτωση μιας σταγόνας επικαθήμενης σε μια στερεή επιφάνεια φαινομενικά η γωνία επαφής είναι σταθερή. Πειραματικά, όταν ο όγκος της σταγόνας αυξάνεται (βλ Σχ. 2.4α), η γραμμή επαφής φαίνεται να παραμένει σταθερή ενώ η φαινόμενη γωνία επαφής αυξάνεται. Όταν η φαινόμενη γωνία επαφής φτάσει στην μέγιστη τιμή τότε η γωνία που καταγράφεται είναι γνωστή ως «γωνία προώθησης» (advancing contact angle, θ_a). Αντιστοίχως, αν ο όγκος της σταγόνας μειωθεί (βλ Σχ. 2.4β), η γωνία επαφής μειώνεται μέχρι να φτάσει στην ελάχιστη τιμή της που ορίζεται ως «γωνία υποχώρησης» (receding contact angle, θ_r). **Υστέρηση της γωνίας επαφής**, θ_{hyst} , ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της γωνίας προώθησης και της γωνίας υποχώρησης [2]



Σχήμα 2.4 Η υστέρηση γωνία επαφής, θ_{hyst} είναι ίση με την διαφορά μεταξύ γωνίας προώθησης, θ_a , (α) και της γωνίας υποχώρησης, θ_r (β)

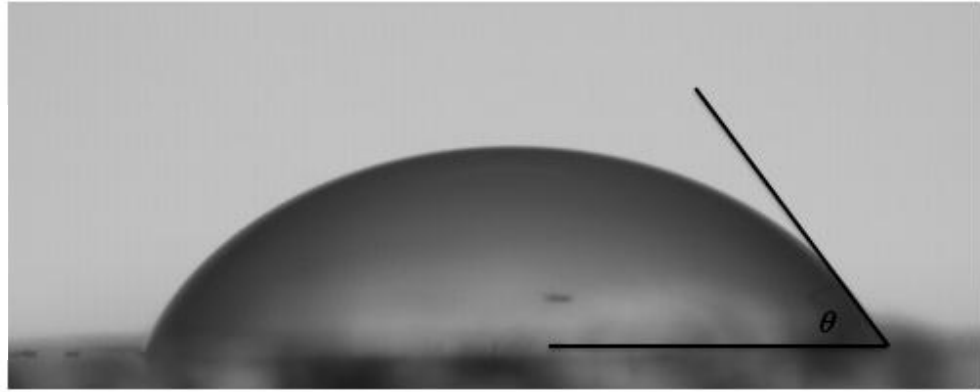
2.4 Διαβροχή επιφανειών : Υδρόφιλες και υδρόφοβες επιφάνειες

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η συμπεριφορά των μορίων νερού και η αλληλεπίδραση τους με στερεές επιφάνειες. Με τον όρο υδροφιλικότητα εννοούμε τη φυσική ιδιότητα ενός μορίου να συνδέεται παροδικά με το νερό με δεσμούς υδρογόνου. Υδροφοβικότητα ονομάζουμε τη φυσική ιδιότητα ενός μορίου (που αποκαλείται και υδρόφοβο) να απωθείται από τη μάζα του νερού. Μέτρο της υδρόφοβικότητας ή της υδροφιλικότητας, εν προκειμένω μιας στερεής επιφάνειας, είναι η τιμή της γωνίας επαφής σταγόνας νερού επικαθήμενης στην επιφάνεια. Γενικά, μια *υδρόφιλη επιφάνεια* έχει μικρή γωνία επαφής ($< 90^\circ$) και μια *υδρόφοβη επιφάνεια* έχει μεγάλη γωνία επαφής ($> 90^\circ$) (Σχήμα 2.5)

Τα δύο όρια της διαβρεκτικότητας είναι για γωνία επαφής $\theta = 180^\circ$, η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση πλήρους μη διαβροχής (σχεδόν σφαιρική σταγόνα) και για γωνία επαφής $\theta = 0^\circ$, η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση της πλήρους διαβροχής όπου το υγρό απλώνεται ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια και δημιουργεί ένα λεπτό υγρό στρώμα.

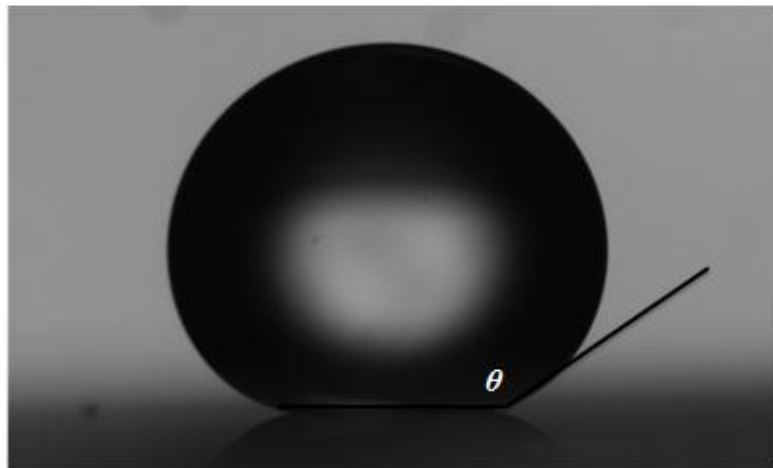
μεγάλη επιφανειακή
διαβροχή
μεγάλη επιφανειακή
ενέργεια

Υδρόφιλη επιφάνεια



μικρή επιφανειακή
διαβροχή
μικρή επιφανειακή ενέργεια

Υδρόφοβη επιφάνεια



Σχήμα 2.5 α) Υδρόφιλη επιφάνεια ($\theta < 90$), β) Υδρόφοβη επιφάνεια ($\theta > 90$)

2.5 Ηλεκτροδιαβροχή σε διηλεκτρικό (EWOD)

Η ηλεκτροδιαβροχή πάνω σε διηλεκτρικό (electrowetting on dielectric, EWOD) αναφέρεται στην διαφοροποίηση της διεπιφανειακής τάσης μεταξύ ενός αγωγικού ρευστού και ενός στερεού ηλεκτροδίου επικαλυμμένου με ένα διηλεκτρικό στρώμα εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ τους. Με την εφαρμογή τάσης, φορτία μαζεύονται στο τοίχωμα του ηλεκτροδίου και αντίθετα φορτία συγκεντρώνονται κοντά στη διεπιφάνεια στερεού/υγρού στο αγωγίμο υγρό. Η ηλεκτροστατική δύναμη που δημιουργείται μειώνει τη διεπιφανειακή τάση υγρού-στερεού και επομένως τη γωνία επαφής. Η υστέρηση που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο παρατηρείται και στο φαινόμενο της ηλεκτροδιαβροχής και πρόκειται για τη διάφορα ανάμεσα στην αρχική γωνία επαφής πριν την επιβολή της τάσης και της γωνίας επαφής που μετράμε μετά τον μηδενισμό της τάσης αυτής.

Ο Berge στις αρχές του '90, εισήγαγε την ιδέα της χρήσης ενός λεπτού διηλεκτρικού στρώματος για να διαχωρίσει το αγωγίμο υγρό από το μεταλλικό ηλεκτρόδιο με σκοπό να εξαλείψει το πρόβλημα της ηλεκτρόλυσης που είχε παρατηρηθεί στο νερό μόλις η τάση ξεπερνούσε κάποια Volt (Berge 1993). Βάση της ηλεκτροδιαβροχής αποτελεί το ηλεκτροτριχοειδές φαινόμενο (electrocapillarity), το οποίο περιγράφηκε πρώτη φορά λεπτομερώς από τον Gabriel Lippmann ο οποίος εργάστηκε στην Σορβόννη στα τέλη του 19^{ου} και αρχές του 20^{ου} αιώνα και αργότερα πήρε το Νόμπελ Φυσικής το 1908 για την δουλειά του στην χρωμο-φωτογραφία. Με βάση τα ευρήματα του ένας νέος όρος προστέθηκε στην εξίσωση του Young που είναι γνωστή ως εξίσωση Young- Lippmann (1.2) :

$$\left. \frac{\partial \gamma}{\partial V} \right|_{T,p,\mu} = - \frac{CV}{A} \quad (1.2)$$

όπου το γ είναι η διεπιφανειακή ενέργεια μεταξύ του μετάλλου και του ηλεκτρολύτη, V είναι το εφαρμοζόμενο δυναμικό, T η θερμοκρασία, p η πίεση και μ το χημικό δυναμικό. Στο δεξί μέρος της σχέσης 1.2, το C είναι η χωρητικότητα πυκνωτή επιφάνειας A και απόστασης πλακών d . Αφού $C = \epsilon_0 \epsilon_1 A/d$, όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού και ϵ_1 η διηλεκτρική σταθερά του υγρού, τότε η σχέση 1.2 μπορεί να μετασχηματιστεί ως:

$$\Delta\gamma = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_l}{2d} V^2 \quad (1.3)$$

Αν το σύστημα αγώγιμο υγρό/διηλεκτρικό/ηλεκτρόδιο θεωρηθεί ιδανικός πυκνωτής παραλλήλων πλακών, η εξάρτηση της μακροσκοπικής φαινόμενης γωνίας επαφής, θ_v , από την τάση V , δίνεται από την εξίσωση Lippmann για την ηλεκτροδιαβροχή (1.4):

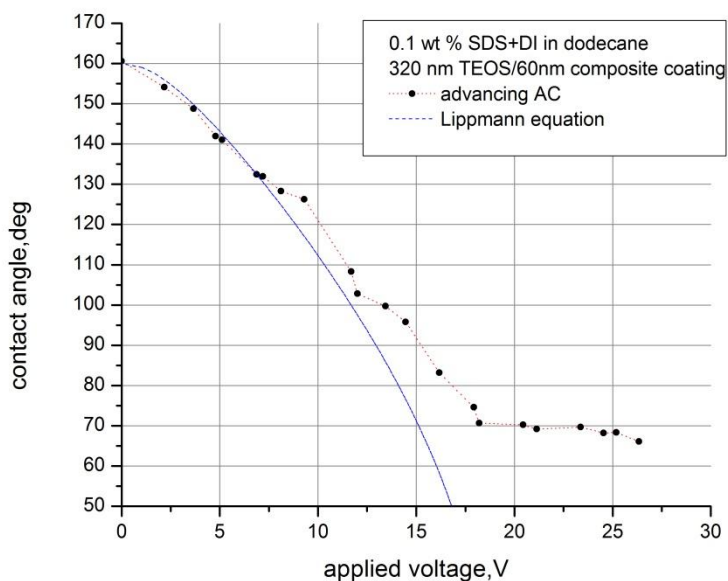
$$\cos \theta_v = \cos \theta_Y + \frac{1}{2\gamma} CV^2, \quad C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\delta} \quad (1.4)$$

όπου θ_Y είναι η γωνία επαφής Young, και γ η επιφανειακή τάση του υγρού, C είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας, δ είναι το πάχος του διηλεκτρικού με σταθερά ϵ_r , και το ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού.

2.6 Κορεσμός Γωνίας Επαφής στην ηλεκτροδιαβροχή

Η εξίσωση Lippmann προβλέπει ότι σε κάποια εφαρμοζόμενη τάση η πλήρη διαβροχή είναι εφικτή (μηδενική γωνία επαφής). Στην πραγματικότητα όμως μετά από κάποια κρίσιμη τάση (κρίσιμη τάση κορεσμού, V_s) η γωνία επαφής δεν μειώνεται περαιτέρω και παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την αύξηση της τάσης. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία κορεσμού, θ_k και κυμαίνεται μεταξύ 30° και 80° [2]. Ένας από τους βασικούς στόχους στην ηλεκτροδιαβροχή είναι να μεγιστοποιηθεί το εύρος μεταβολής της γωνίας επαφής δηλαδή η διαφορά μεταξύ της αρχικής γωνίας επαφής και της γωνίας στην οποία παρατηρείται ο κορεσμός.

Η μεταβολή της γωνίας επαφής, θ_v , με την εφαρμοζόμενη τάση φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Πρόκειται για πείραμα ηλεκτροδιαβροχής σταγόνας 3.5μl sodium dodecyl sulfate 0.1wt.% σε περιβάλλον δωδεκανίου με εφαρμογή AC τάσης μέχρι περίπου τα 30V. Παρατηρείται εδώ ότι μετά τα 18V η γωνία επαφής που καταγράφεται παραμένει σταθερή και ίση με 70° . Το σημείο αυτό μας δίνει την τάση και την γωνία κορεσμού της σταγόνας.



Σχήμα 2.6: Κορεσμός της γωνίας επαφής για σταγόνα υγρού sodium dodecyl sulfate 0.1wt%

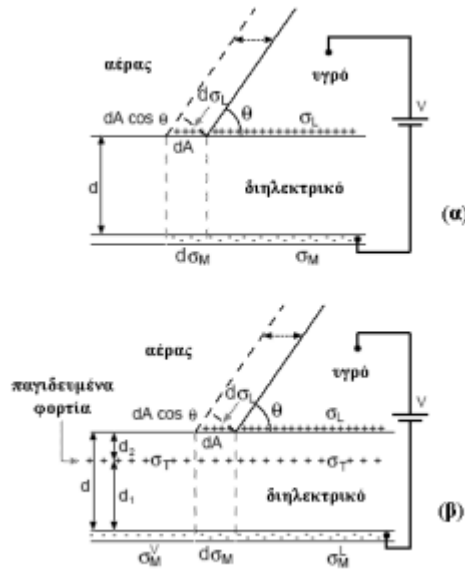
Πλήρης ερμηνεία για το φαινόμενο του κορεσμού της γωνίας επαφής δεν έχει δοθεί, ωστόσο, το φαινόμενο έχει αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες οι οποίοι αναφέρονται στην συνέχεια

A) Παγίδευση φορτίου στο διηλεκτρικό

Οι Verheijen και Prins [3] διαπίστωσαν ότι όταν επέλθει κορεσμός της γωνίας επαφής, η επιφάνεια του διηλεκτρικού ήταν φορτισμένη. Η θεωρία που ανέπτυξαν βασίζεται στην ιδέα ότι, ακινητοποιημένα φορτία βρίσκονται σε συγκεκριμένο βάθος μέσα στο στρώμα του διηλεκτρικού και η πυκνότητα τους, σ_T , είναι ομογενής σε μία περιοχή στις δύο πλευρές της γραμμής επαφής. Το Σχήμα 2.7(a) εμφανίζει την κατάσταση του συστήματος χωρίς την ύπαρξη παγιδευμένου φορτίου και η 2.7-(β) με το παγιδευμένο στρώμα φορτίων με σταθερή επιφανειακή πυκνότητα. Βάσει των υποθέσεων αυτών ανέπτυξαν μια τροποποιημένη εξίσωση για την εξάρτηση της γωνίας επαφής από την εφαρμοζόμενη τάση :

$$\cos(\theta_V) = \cos(\theta_Y) + \frac{\epsilon}{2\gamma_{lv}\delta} (V - V_T)^2$$

όπου V_T είναι η τάση του στρώματος του παγιδευμένου φορτίου στην πλευρά του αέρα
 Η εξίσωση αυτή αποτελεί μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης Young-Lippmann.



Σχήμα 2.7 α) Κατανομή φορτίων κατά την εφαρμογή τάσης σε σύστημα ηλεκτροδιαβροχής και β) απεικόνιση του παγιδευμένου φορτίου μέσα στο διηλεκτρικό

Παρα τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα αυτής της έρευνας δεν μπόρεσαν να συνδυάσουν τη συμπεριφορά αυτή με άλλες γνωστές παραμέτρους του συστήματος.

Τέλος, πρόσφατες δημοσιεύσεις έχουν δείξει την σχέση μεταξύ του κορεσμού της γωνίας επαφής, της παγίδευσης του φορτίου και της κατάρρευσης του διηλεκτρικού. Μετά απο μία καθορισμένη τιμή το διηλεκτρικό μετατρέπεται σε αγωγό οδηγώντας σε κατάρρευση [4].

β) Ιονισμός του αερίου κοντά στην επιφάνεια του διηλεκτρικού

Ο ιονισμός του αέρα γύρω απο την επιφάνεια του διηλεκτρικού έχει θεωρηθεί υπεύθυνος για την κατάρρευση του διηλεκτρικού (κεφάλαιο 2.8). Το περιβάλλον του αέρα, στη θεωρία της ηλεκτροδιαβροχής, δρά ως μονωτής έτσι ώστε τα φορτία να παραμένουν στην διεπιφάνεια μεταξύ υγρού-περιβάλλοντος μέσου. Όταν ο αέρας ιονιστεί παύει να δρά ως μονωτής και τα φορτία που συσσωρεύονται στην γραμμή επαφής ασκούν μια ηλεκτρική δύναμη με κατεύθυνση προς τα έξω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένιση του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής [5].

γ) η αστάθεια της γραμμής επαφής

Οι Vallet et al. [5] αναφέρουν ενα φαινόμενο που προκύπτει μόνο σε χαμηλής αγωγιμότητας υγρά (απιονισμένο νερο και μίγμα νερού-αιθανόλης). Στα υγρά αυτά παρατηρήθηκε οτι σε υψηλές τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης η γραμμή επαφής δεν διατηρείται σταθερή και εκπέμπονται μικρά σταγονίδια απο την περιφέρεια της κύριας σταγόνας κατά την ακτινική διεύθυνση σε συγκεκριμένη απόσταση. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύτηκε αργότερα απο τους Mugele και Herminghaus [6] για μείγματα νερού-γλυκερόλης

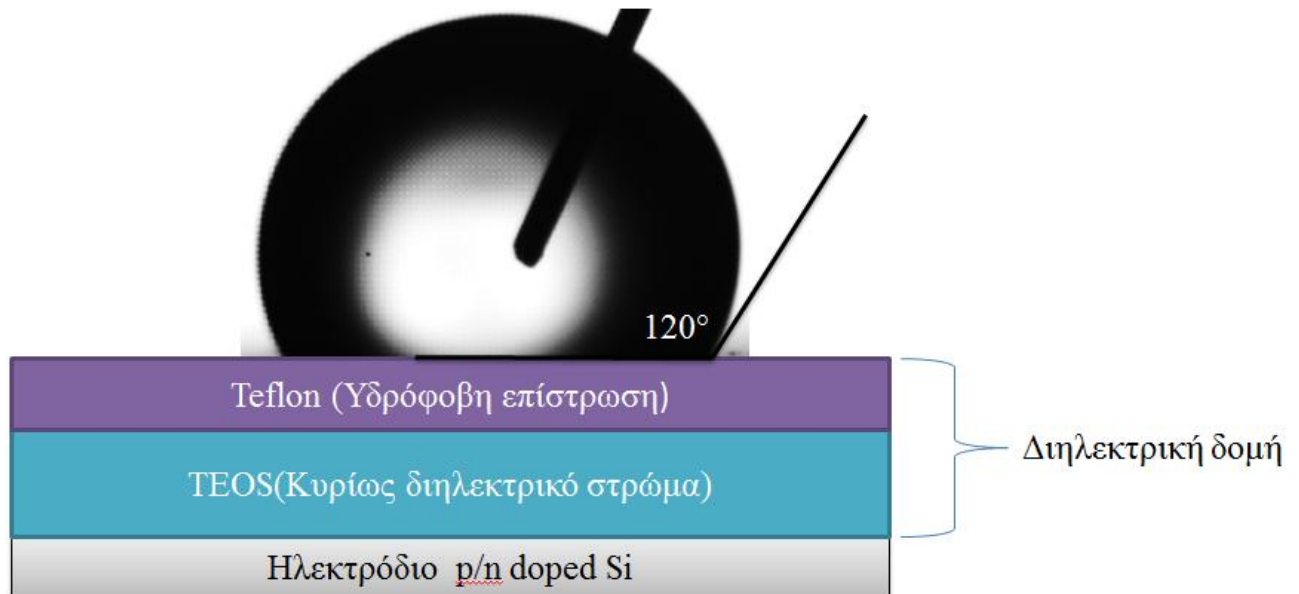


Σχήμα 2.8 Αστάθεια στη γραμμική επαφής και εκπομπή δορυφορικών σταγόνων σε υψηλές τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης (απιονισμένο νερό σε πυριτιομένο γυαλί, διάμετρος σταγόνας 3mm)[6]

Επιπρόσθετα, έχουν προταθεί ορισμένες θεωρίες διαφορετικές από τις παραπάνω, οι οποίες δεν αναφέρονται στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη γραμμική επαφή. Σε μία από αυτές που προτάθηκε από τους Shapiro et al. αναλύθηκε η κατανομή του πεδίου μέσα και γύρω από μια ημισφαιρική σταγόνα θεωρώντας ότι τόσο η σταγόνα όσο και το διηλεκτρικό εμφανίζουν αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Οι υπολογισμοί τους έδειξαν ότι η πτώση τάσης μέσα στη σταγόνα αυξάνεται όσο μειώνεται η γωνία επαφής και έτσι προκύπτει ο κορεσμός.

2.7 Διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιαβροχή

Μια συνήθης υδρόφοβη διηλεκτρική δομή που χρησιμοποιείται σε πειράματα ηλεκτροδιαβροχής, αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο, επικαλυμμένο από το κυρίως διηλεκτρικό στρώμα [συνηθέστερα, SiO_2 , Si_3N_4 , tetra-ethoxy-silane (TEOS)] και μια υδρόφοβη επίστρωση, συνήθως πολυτετραφθοροαιθυλένιο (Teflon[®]).



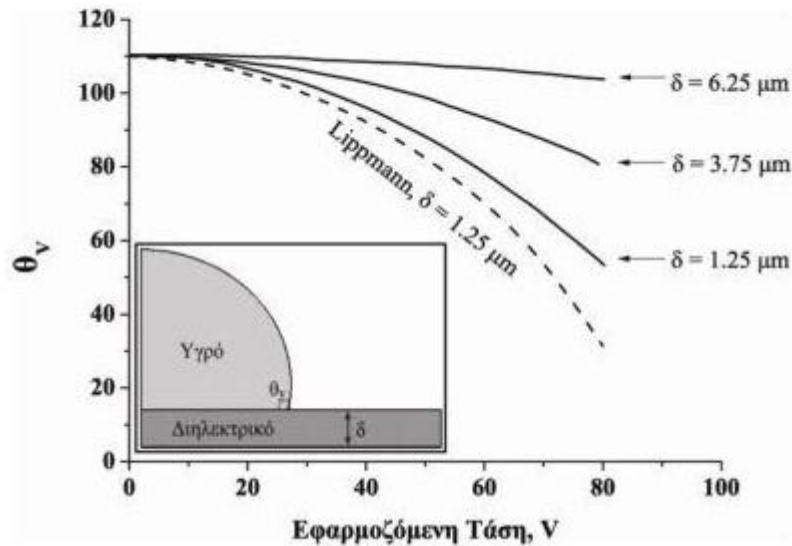
Σχήμα 2.9 Σχηματική αναπαράσταση του διηλεκτρικού επικαλυμμένου από το υδρόφοβο στρώμα και της σταγόνας πάνω σε αυτό

Τα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροδιαβροχή και οι ιδιότητές τους παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου. Δύο είναι οι προϋποθέσεις που πρέπει να καλύπτουν τα διηλεκτρικά για να μπορούμε να εξάγουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα :

1. Να εξασφαλίζουν ότι η αρχική γωνία επαφής (πριν εφαρμόσουμε τάση) είναι όσο μεγαλύτερη γίνεται και
2. Το διηλεκτρικό στρώμα να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτό.

Σύμφωνα με την εξίσωση Lippmann, όσο μικρότερο είναι το πάχος του διηλεκτρικού στρώματος και όσο πιο υδρόφοβη είναι η επιφάνεια του, τόσο ευνοείται η εφαρμογή του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής. Διατηρώντας σταθερό τον όγκο της σταγόνας και το είδος του διηλεκτρικού μεταβάλλουμε το πάχος του, δ , και υπολογίζεται η εξάρτηση της γωνίας επαφής από την εφαρμοζόμενη τάση. Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται ότι όσο το πάχος αυξάνεται τόσο μικρότερη μεταβολή προκύπτει στην γωνία επαφής για την ίδια εφαρμοζόμενη τάση. Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιούνται συχνά λεπτά διηλεκτρικά είναι ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα

λεπτά διηλεκτρικά δεν είναι ανθεκτικά σε συνεχή καταπόνηση, κυρίως όταν υπόκεινται σε μεγάλο αριθμό πειραμάτων ηλεκτροδιαβροχής και ειδικότερα σε υψηλές τάσεις.



Σχήμα 2.10 Επίδραση του πάχους, δ , του διηλεκτρικού στην διαβρεκτικότητα της σταγόνας νερού ($\epsilon=3.8$ (SiO₂), $\gamma_{LV}=0.072$ N/m) [7]

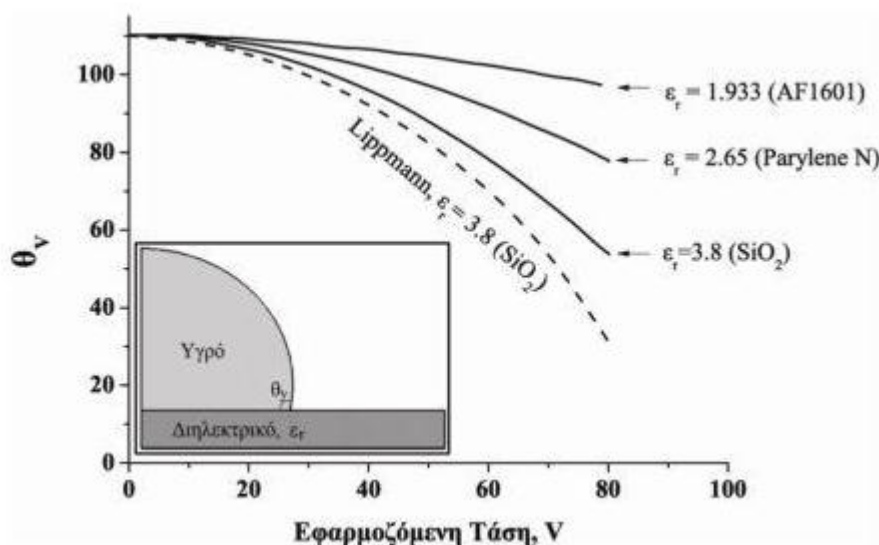
Για το λόγο αυτό, η πρώτη επιλογή είναι είτε να χρησιμοποιηθεί ένα υδρόφοβο μονωτικό στρώμα όπως πολλά πολυμερή υλικά ή να καλυφθούν τα υδρόφιλα στρώματα με ένα λεπτό υδρόφοβο στρώμα. Το υδρόφοβο στρώμα είναι απαραίτητο για τα συστήματα ηλεκτροδιαβροχής καθώς επιδιώκεται η αρχική γωνία επαφής να είναι μεγάλη (κοντά στις 160° όταν πρόκειται για πειράματα σε λάδι και από τις 120° για πειράματα με περιβάλλον μέσο αέρα) έτσι ώστε να παρατηρείται καλύτερα το φαινόμενο της μείωσης της γωνίας επαφής με την επιβολή της τάσης. Σε συστήματα ηλεκτροδιαβροχής το μονωτικό στρώμα πρέπει να έχει χαμηλή τραχύτητα επιφάνειας, υψηλή διηλεκτρική σταθερά, υψηλό πεδίο κατάρρευσης και σταθερότητα στο χρόνο. Επίσης, το πάχος του μονωτικού στρώματος πρέπει να είναι της τάξης των nm ή μερικών μm.

Συνήθως χρησιμοποιούνται λεπτές υδρόφοβες επιστρώσεις από άμορφα φθοροπολυμερή όπως Teflon® ή Cytop. Το Teflon® μπορεί να επικαλύψει επίπεδα ηλεκτρόδια με πάχος που κυμαίνεται από 10nm έως 6μm. Επίσης, έχει εξαιρετικές επιφανειακές ιδιότητες. Το μόνο μειονέκτημα είναι η χαμηλή διηλεκτρική σταθερά ($\epsilon_r \sim 2$). Τα στρώματα από Teflon® πέρα από το ότι είναι υδρόφοβα έχουν το πλεονέκτημα

της πολύ μικρής υστέρησης της γωνίας ($<10^\circ$ για νερό στον αέρα) και είναι χημικά αδρανή τόσο σε οξέα όσο και σε βάσεις. Για τους λόγους αυτούς το Teflon[®] έχει χρησιμοποιηθεί όχι μόνο σαν επίστρωση αλλά και σαν κύριο μονωτικό στρώμα.

Δημοφιλή ανόργανα μονωτικά υλικά περιλαμβάνουν SiO_2 τα οποία σε συνδυασμό με μία υδρόφοβη επίστρωση αποτελούν ικανοποιητικά υποστρώματα για ηλεκτροδιαβροχή σε διηλεκτρικό. Σε σύγκριση με το Teflon[®] προσφέρουν το επιπλέον πλεονεκτήματα της μεγαλύτερης διηλεκτρικής σταθεράς το οποίο οδηγεί σε μείωση της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για να δειχθεί η σημασία της διηλεκτρικής σταθεράς στην ηλεκτροδιαβροχή, υπολογίζεται η μεταβολή της γωνίας επαφής με την εφαρμοζόμενη τάση διατηρώντας σταθερό τον όγκο της σταγόνας και το πάχος του διηλεκτρικού. Η μόνη μεταβλητή που αλλάζει είναι το είδος του διηλεκτρικού. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στο Σχήμα 2.11 και δείχνουν ότι η απόκλιση από τη Lippmann αυξάνεται όσο αυξάνεται η τάση και όσο μειώνεται η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού.



Σχήμα 2.11 Επίδραση των διηλεκτρικών σταθερών, ϵ_r , των διηλεκτρικών στην διαβρεκτικότητα της σταγόνας νερού ($\delta=1.25\mu\text{m}$, $\gamma_{LV}=0.072\text{ N/m}$) [7]

Πολυμερή υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε πειράματα ηλεκτροδιαβροχής περιλαμβάνουν parylene-N, parylene-C και parylene-HT. Στην ηλεκτροδιαβροχή το Parylene χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με υδροφοβικές

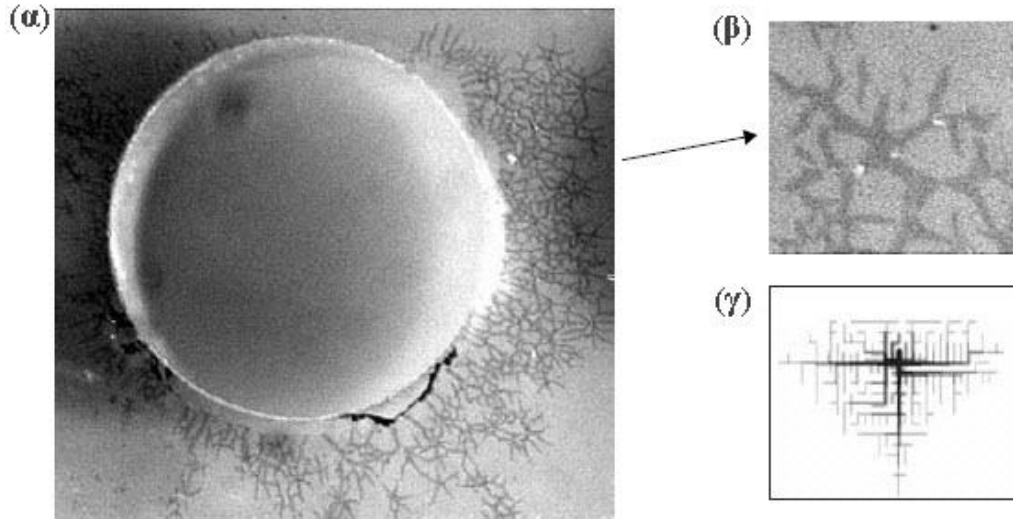
επιστρώσεις [8] ωστόσο οι Dhindsa et al.[9] απέδειξαν με το Parylene HT επιτυγχάνονται μεγάλες γωνίες επαφής χωρίς την προσθήκη υδροφοβικής επίστρωσης.

Ιδιότητες ορισμένων ευρέως χρησιμοποιούμενων διηλεκτρικών (ως κυρίως στρώμα) δίνονται στον παρακάτω πίνακα

Υλικό	Πάχος	ϵ_r	Επικάλυψη	Πάχος Επικάλυψης	Διηλ. Σταθερά Επικάλυψης	Max Τάση	Max $\Delta\theta$	Βιβλ.
Parylene	20 μm	2.65	Teflon AF 1600	20 nm	2.2	250	60°	(Saeki et al. 2001)
Parylene	10 μm	2.65	Teflon AF 1600	30 nm	2.2	250	60°	(Saeki et al. 2001)
Si_3N_4	400 nm	7.8	Teflon AF 1600	1 μm	2.2	70	45°	(Berthier et al. 2006)
Si_3N_4	300 nm	7.8	SiOC	1.2 μm	3.4	80	45°	(Berthier et al. 2006)
SiO_2	100 nm	4.0	Teflon AF 1600	20 nm	2.2	15	40°	(Moon et al. 2002)

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά διαφόρων υποστρωμάτων απο τη βιβλιογραφία

2.8 Κατάρρευση του διηλεκτρικού



Σχήμα 2.12 Η κατάρρευση του διηλεκτρικού γύρω από το σφαιρικό αντικείμενο. Η μορφή των ρηγματώσεων του διηλεκτρικού έχουν δενδροειδές σχήμα, (β) μεγέθυνση της περιοχής κατάρρευσης, (γ) μοντέλο ηλεκτροστατικής κατάρρευσης που δείχνει την ανάπτυξη της δενδροειδούς ρηγματώσης

Κατάρρευση του διηλεκτρικού συμβαίνει όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό υπερβεί ένα όριο που ονομάζεται ένταση κατάρρευσης και συμβολίζεται με E_{BD} . Το όριο αυτό αποτελεί μια φυσική ιδιότητα του διηλεκτρικού. Κατα την κατάρρευση το διηλεκτρικό πεδίο επιταχύνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αρκούντως υψηλή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται σε ταχύτητες τέτοιες, που αν συγκρουστούν με ουδέτερα άτομα ή μόρια είναι δυνατόν να απελευθερωθούν επιπλέον ηλεκτρόνια. Η διαδικασία συμβαίνει απότομα, σε κλασματα του δευτερολέπτου, με αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός ηλεκτρικά αγώγιμου μονοπατιού και μιας εκκένωσης διαμέσου του υλικού. Για στερεά υλικά, μια κατάρρευση υποβαθμίζει σημαντικά ή και καταστρέφει ακόμα τις διηλεκτρικές τους ικανότητες. Για ένα διηλεκτρικό πάχους, δ , η ένταση κατάρρευσης, E_{BD} , συνδέεται με την τάση κατάρρευσης, V_{BD} , σύμφωνα με την εξίσωση :

$$V_{BD} = \delta \cdot E_{BD}$$

Απο την εξίσωση αυτή συμπεραίνεται ότι για να αποφευχθεί η κατάρρευση του διηλεκτρικού απαιτείται το πάχος του να είναι μεγαλύτερο από μία ελάχιστη τιμή. Ο

λόγος της τάσης κατάρρευσης V_b ενός διηλεκτρικού προς το πάχος του δ δίνει τη διηλεκτρική αντοχή του υλικού, α . Πέρα απο την τιμή αυτή, α , το διηλεκτρικό καταρρέει και ξεκινά να λειτουργεί αγώγιμα. Χαρακτηριστικές τιμές της έντασης κατάρρευσης διαφόρων υλικών δίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2)

Υλικό	Ένταση κατάρρευσης, $E_{BD}(MV/m)$
Παραφίνη	10
Λάδι	15
Teflon	59
Γυαλί	100
Mica	197

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικές τιμές της έντασης κατάρρευσης διαφόρων υλικών

2.9 Διατάξεις βασισμένες στην ηλεκτροδιαβροχή και Εφαρμογές

Η ηλεκτροδιαβροχή έχει πλήθος εφαρμογών στις μέρες μας μερικές από τις οποίες είναι οι εξής :

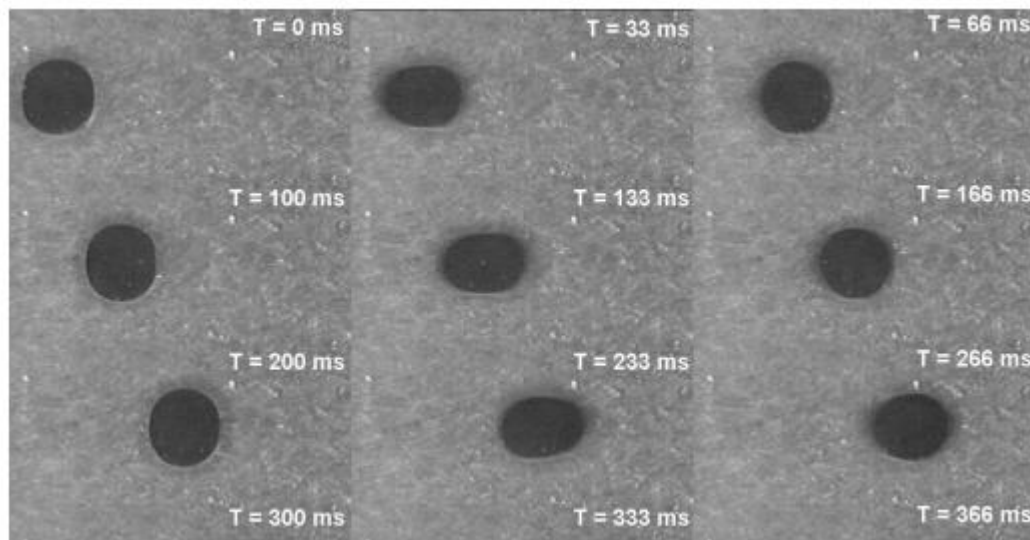
2.9.1 Μετακίνηση και καθοδήγηση σταγόνων

Το φαινόμενο της ηλεκτροδιαβροχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετακίνηση ρευστών σε μια μικρορευστομηχανική διάταξη. Όταν μια σταγόνα βρίσκεται στο σύνορο μεταξύ μιας υδροφοβικής και μιας υδροφιλικής περιοχής, μετακινείται προς τη υδροφιλική περιοχή. Αν μια αγωγίμη σταγόνα βρίσκεται στο σύνορο μεταξύ ενός ενεργοποιημένου και ενός μη ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου, μια δύναμη ασκείται στη γραμμή επαφής που βρίσκεται πάνω από το ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο και μια δύναμη ασκείται στη γραμμή επαφής στη υδροφοβική επιφάνεια. Η συνισταμένη των δυνάμεων παράλληλα με την επιφάνεια, έχει κατεύθυνση προς την ηλεκτρικά ενεργοποιημένη περιοχή. Η σταγόνα πλέον δεν βρίσκεται σε ισορροπία, και αν η συνισταμένη των δυνάμεων είναι αρκετή έτσι ώστε να ξεπεράσει την υστέρηση, η σταγόνα κινείται [1]. Μεταβάλλοντας το ηλεκτρικό δυναμικό κατά μήκος μιας γραμμικής συστοιχίας ηλεκτροδίων, η ηλεκτροδιαβροχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετακίνηση σταγόνων όγκου νανολίτρων κατά μήκος αυτής της σειράς ηλεκτροδίων. Σταγόνες μπορούν, με αυτόν τον τρόπο, να μετακινηθούν σε δομές καθορισμένες από το χρήστη χωρίς τη χρήση μικροαντλιών και μικροβαλβίδων (Σχήμα 2.13).

Ένα ζήτημα που αφορά στις βιοτεχνολογικές εφαρμογές των διατάξεων που βασίζονται στην ηλεκτροδιαβροχή είναι η βιοσυμβατότητα των υλικών και των διεργασιών [10]. Μια πρόκληση για τις διατάξεις lab-on-a-chip είναι η τάση των βιομορίων να προσροφώνται πάνω σε υδρόφοβες επιφάνειες. Στην περίπτωση των διατάξεων που βασίζονται στην ηλεκτροδιαβροχή αυτό έχει ιδιαίτερα καταστρεπτικές επιπτώσεις: η μη αντιστρεπτή προσρόφηση των βιομορίων μειώνει τη γωνία επαφής μόνιμα, υποβιβάζοντας έτσι την απόδοση της ενεργοποίησης της σταγόνας, μολύνει τη διάταξη και μεταβάλλει τη σύσταση του υπό ανάλυση διαλύματος βιομορίων.

Οι Yoon & Garrell (2003) διερεύνησαν την ηλεκτροδιαβροχική συμπεριφορά σταγόνων διαλυμάτων DNA και πρωτεϊνών σε περιβάλλον αέρα. Βρήκαν ότι στην προσρόφηση συνεισφέρουν η προσρόφηση μέσω υδρόφοβων αλληλεπιδράσεων αλλά και ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις. Οι τελευταίες εξαρτώνται ισχυρά από το φορτίο που έχουν οι συγκεκριμένες πρωτεΐνες και στην πολικότητα καθώς και την κυματομορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Η βιομοριακή προσρόφηση φαίνεται να καταστέλλεται ακόμα πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας κάποιο λάδι (όπως δεκάνιο ή δωδεκάνιο) ως περιβάλλον μέσον αντί του αέρα.

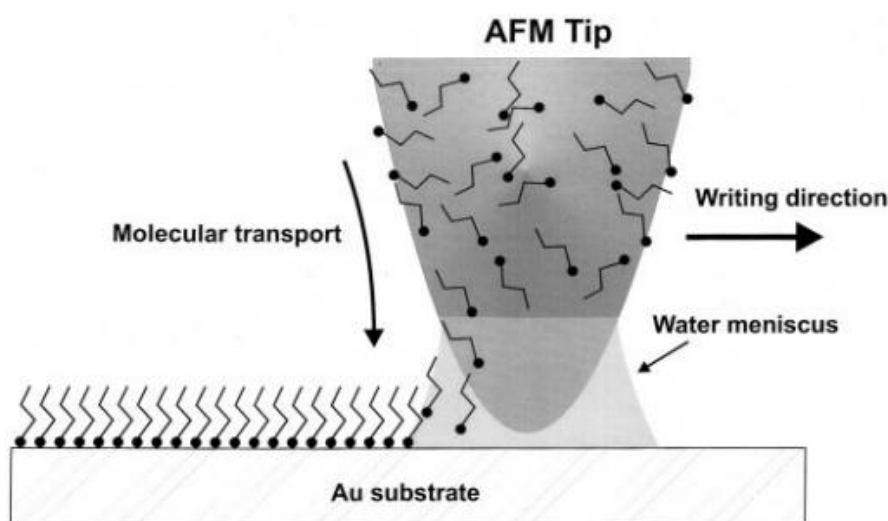
Οι Srinivasan et al. [12] περιέγραψαν όχι μόνο την επιτυχή ενεργοποίηση διαφόρων διαλυμάτων πρωτεϊνών αλλά και αυτή φυσιολογικών υγρών όπως είναι το αίμα και τα ούρα.



Σχήμα 2.13 Υψηλής ταχύτητας μεταφορά σταγόνας 1.5Μl αίματος διαμέσου 4 ηλεκτροδίων

Ακόμα και μετά από 25.000 κύκλους, οι σταγόνες μπορούσαν ακόμα να ενεργοποιηθούν με μόνο μια μικρή αύξηση της τάσης ενεργοποίησης. Η μειωμένη προσρόφηση των πρωτεϊνών αποδίδεται στο λεπτό στρώμα λαδιού που διαβρέχει το υδρόφοβο υπόστρωμα και εμποδίζει την άμεση επαφή μεταξύ της σταγόνας και της πολυμερικής επιφάνειας. Σε άλλες εφαρμογές που σχετίζονται με τη βιοτεχνολογία, η ηλεκτροδιαβροχή χρησιμοποιείται ως βοηθητικό μέσο για τη διαχείριση μικροσκοπικών ποσοτήτων υγρών. Για παράδειγμα, οι συστοιχίες DNA και πρωτεϊνών αποτελούν σήμερα τυπικά εργαλεία στην έρευνα γονιδιόματος και στο σχε-διασμό

φαρμάκων. Οι συστοιχίες αυτές αποτελούνται από ακινητοποιημένα βιομόρια πάνω σε μια επιφάνεια και δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ρομποτικά συστήματα που εναποθέτουν σταγόνες μοριακών διαλυμάτων με διάφορες τεχνικές, είτε άμεσης επαφής ή μη επαφής (π.χ. τεχνολογία ink-jet). Για να μειωθεί το μέγεθος της κηλίδας πάνω στην επιφάνεια έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις, όπως η νανολιθογραφία dip-pen. Σε αυτήν την τεχνική, η σταγόνα εναποτίθεται με άμεση μηχανική επαφή μεταξύ της πένας και της επιφάνειας (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14 Σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας dip-pen [13]. Εδώ χρησιμοποιείται Au σαν «χαρτί» και μόρια που προσκολώνται χημικά στην Au επιφάνεια σαν «μελάν»

2.9.2 Οπτικές εφαρμογές

Μια άλλη εφαρμογή της ηλεκτροδιαβροχής είναι αυτή στο πεδίο των οπτικών συστημάτων. Όταν μια σταγόνα ισορροπεί πάνω σε μια επιφάνεια, η διεπιφάνεια υγρού-ατμού έχει σχήμα τμήματος σφαίρας. Όταν προσπίπτει φως πάνω στη σταγόνα διερχόμενο από τη διεπιφάνεια θα διαθλάται, ανάλογα με το δείκτη διάθλασης, όπως σε ένα κλασικό σφαιρικό φακό από γυαλί ή κάποιο άλλο κατάλληλο στερεό υλικό. Σε αντίθεση με τους στερεούς φακούς, οι υγροί φακοί είναι πιο εύκαμπτοι. Η καμπυλότητά τους και επομένως η εστιακή απόσταση μπορούν να ρυθμιστούν προσαρμόζοντας το σχήμα τους. Προφανώς, αυτό μπορεί να επιτευχθεί

μεταβάλλοντας τη γωνία επαφής σταγόνων μέσω της ηλεκτροδιαβροχής. Αυτό επιτρέπει* το σχεδιασμό οπτικών συστημάτων με μεταβλητή εστιακή απόσταση που μπορούν να ελεγχθούν ηλεκτρικά, όπως περιγράφηκε αρχικά από τους Peseux & Berge [14].

Οι Krupenkin et al. [15] περιγράφουν ένα παρόμοιο σύστημα. Στην περίπτωση τους, η τάση ενεργοποίησης ήταν μόνο 10 Volts . Οι ίδιοι συγγραφείς παρουσίασαν επίσης μία ενδιαφέρουσα μελέτη στην οποία χρησιμοποίησαν σταγόνες αγώγιμου υγρού που μπορούσε να φωτοπολυμερισθεί για να παράγουν μικροφακούς ελεγχόμενης εστιακής απόστασης. Σε σταθερή τάση, οι σταγόνες ακτινοβολούνταν με UV. Ακολούθως, η τάση μπορούσε να απομακρυνθεί και οι (πλέον στερεοποιημένες) σταγόνες να κρατήσουν το σχήμα τους. Στο σχήμα 2.15 φαίνεται ένα παράδειγμα ενός υγρού φακού που προορίζεται για μια κάμερα. Αυτός ο υγρός φακός που βασίζεται στην τεχνολογία της ηλεκτροδιαβροχής, επιτρέπει τη δημιουργία μικροσκοπικής κάμερας χωρίς κινούμενα μέρη. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για τη διάρκεια ζωής των καμερών μέσα σε κινητές εφαρμογές

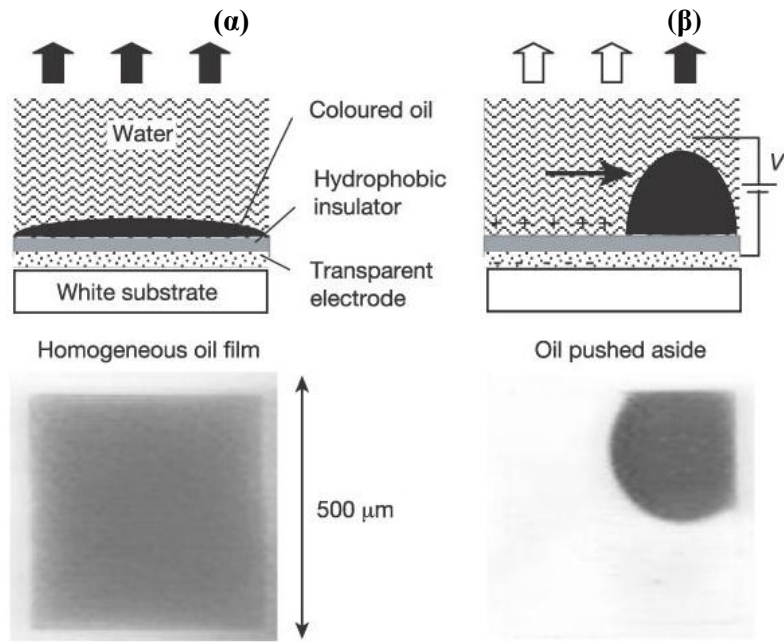


Σχήμα 2.15 Υγρός φακός μεταβλητής και ελεγχόμενης εστίασης μέσα σε θήκη. (εταιρεία Varioptic) (**Varioptic**)

Μια πιθανή ενδιαφέρουσα εφαρμογή είναι σε συστήματα μεταβλητής εστίασης για κινητά τηλέφωνα με ολοκληρωμένες CCD κάμερες . Οι Kuiper & Hendriks [16] παρουσίασαν μια μελέτη ενός συστήματος φακού βασιζόμενου στην ηλεκτροδιαβροχή για αυτού του τύπου την εφαρμογή. Η ηλεκτροδιαβροχή διερευνήθηκε στη δεκαετία του '80 ως ένας πιθανός μηχανισμός για τη μεταγωγή φωτός σε εφαρμογές οπτικών ινών ενώ υπάρχουν και πρόσφατες σχετικές μελέτες.

2.9.3 Οθόνες ηλεκτροδιαβροχής

Οι Feenstra & Hayes [17] παρουσίασαν μια οθόνη βασιζόμενη στην ηλεκτροδιαβροχή. Η ιδέα είναι πολύ απλή : μια σταγόνα λαδιού που περιέχει διαλυμένη χρωστική περιορίζεται πλευρικά σε ένα τετράγωνο εικονοστοιχείο. Σε μηδενική τάση, το λάδι σχηματίζει ένα συνεχόμενο στρώμα που διαβρέχει τον υδρόφοβο μονωτή στο κάτω μέρος του εικονοστοιχείου. Το υπόλοιπο μέρος του εικονοστοιχείου μεταξύ του στρώματος λαδιού και του πάνω καλύμματος είναι γεμάτο με ένα διαφανές υδατικό διάλυμα άλατος. Το εισερχόμενο φως απορροφάται έντονα από τη χρωστική. Με την εφαρμογή μιας τάσης, όλο το λάδι περιορίζεται σε μια γωνία του εικονοστοιχείου. Η χρωστική έτσι καλύπτει μόνο ένα λεπτό ποσοστό του εικονοστοιχείου στην ενεργοποιημένη κατάσταση (Σχήμα 2.16). Αυτό προκαλεί αύξηση της ανακλαστικότητας από 2.5 % σε μηδενική τάση σε 35 % στο μήκος κύματος που προσροφά η χρωστική με μια τάση ενεργοποίησης 20 Volts. Οποιαδήποτε ενδιάμεση ανακλαστικότητα – που αντιστοιχεί σε μερικώς μαζεμένο στρώμα λαδιού – μπορεί να σταθεροποιηθεί σταματώντας σε μια ενδιάμεση τάση. Διασπώντας κάθε εικονοστοιχείο σε τρία υπό-εικονοστοιχεία και διευθετώντας δύο στρώματα λαδιού με διαφορετικές χρωστικές σε συνδυασμό με ένα έγχρωμο φίλτρο το ένα πάνω στο άλλο, οι Feenstra & Hayes [16] μπόρεσαν επίσης να δημιουργήσουν χρώματα. Η ανακλαστικότητα αυτών των έγχρωμων οθονών ήταν τέσσερις φορές πιο έντονη από αυτή των οθονών υγρών κρυστάλλων. Η ταχύτητα εναλλαγής της οθόνης εξαρτάται από το μέγεθος του εικονοστοιχείου, το πάχος και το ιξώδες του στρώματος λαδιού καθώς και άλλες γεωμετρικές παραμέτρους.



Σχήμα 2.16 (α) Μηδενική επιβολή τάσης-σχηματισμός ομογενούς φιλμ λαδιού, (β) με εφαρμογή DC τάσης το λάδι περιορίζεται σε μία γωνία του ιχνοστοιχείου. Πάνω απεικονίζονται τα διαγράμματα και κάτω οι αντίστοιχες φωτογραφίες [17]

Μια οθόνη ηλεκτροδιαβροχής έχει σημαντικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Εφόσον η εικόνα είναι στατική, δεν υπάρχει καμία κίνηση φορτίων όπως επίσης και μηδενική κατανάλωση ενέργειας, επειδή το χρώμα δημιουργείται από εξωτερική πηγή φωτός το οποίο αντανακλάται. Σε σύγκριση με τις οθόνες που εκπέμπουν φως, όπως οι LCD οθόνες, η ηλεκτρική κατανάλωση μια οθόνης ηλεκτροδιαβροχής είναι στην πραγματικότητα πέντε φορές χαμηλότερη.

Μια επιπλέον εφαρμογή της οθόνης ηλεκτροδιαβροχής σε σχέση με μια οθόνη LCD είναι το μεγάλο οπτικό πεδίο, το οποίο είναι αποτέλεσμα του ότι το φως αντανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις. Σε μια οθόνη LCD, το φως εκπέμπεται μόνο σε μια κατεύθυνση, από το κέντρο, και έτσι η εικόνα δεν μπορεί αν είναι ορατή από μεγάλη γωνία. Αυτό είναι και ένα βασικό πρόβλημα πολλών οθονών φορητών υπολογιστών. Εντούτοις, με μια οθόνη ηλεκτροδιαβροχής μπορούμε να κοιτάμε την οθόνη μας από τα πλάγια και να έχουμε και πάλι πολύ υψηλή ποιότητα εικόνας με υψηλή συχνότητα αντίθεσης χρωμάτων [1]. Μερικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα των οθονών ηλεκτροδιαβροχής έναντι των υπολοίπων δίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 3).

Τεχνολογία	Χρήση	Μέγεθος Pixel	Γωνία Ορατότητας	Πάχος	Εκπομπή ή αντανάκλαση Φωτός	Κατανάλωση Ενέργειας
CRT	Συνήθεις Οθόνες Τηλεόρασης	0.21mm	Ευρεία	~50cm	Εκπομπή	Μεγάλη
LCD	Επίπεδες Οθόνες Υπολογιστών	0.28mm	Περιορισμένη	Μερικά mm	Εκπομπή	Μεσαία
EWOD	Επίπεδες εικόνες και έγχρωμο ηλεκτρονικό Χαρτί	0.16mm	Ευρεία	< 1mm	Αντανάκλαση	Πολύ Χαμηλή

Πίνακας 3 Σύγκριση μεταξύ των διαφόρων οθονών

Κεφάλαιο 3 : Πειραματικός εξοπλισμός-Λογισμικό

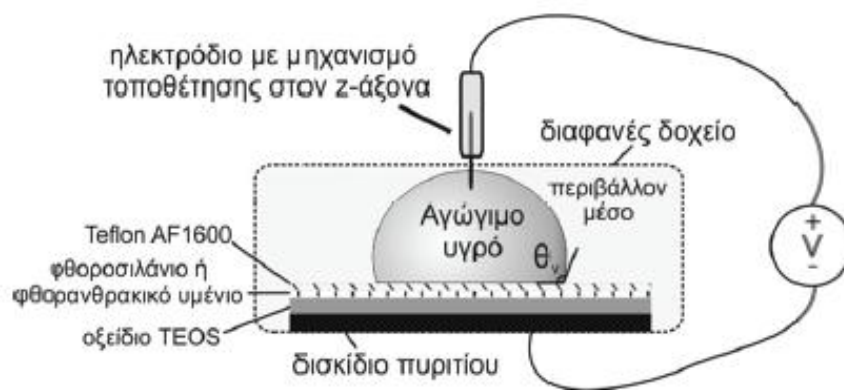
3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι εξής πειραματικές διατάξεις :

- Πειραματική διάταξη ηλεκτροδιαβροχής για μέτρηση γωνίας επαφής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
- Πειραματική διάταξη μέτρησης ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό (πιο αναλυτικά για τα ρεύματα διαρροής περιγράφονται στο κεφάλαιο 5).

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων, καθώς και περιγραφή του λογισμικού μέτρησης της γωνίας επαφής.

3.2 Διηλεκτρική δομή/ Υλικά



Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης ηλεκτροδιαβροχής

Στα πειράματα που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκε η διηλεκτρική δομή που περιγράφηκε λεπτομερέστερα στο κεφάλαιο 2.7 (Σχήμα 2.9). Συγκεκριμένα ως κύριο διηλεκτρικό επιλέχθηκε το οξείδιο TEOS με πάχος που κυμαίνεται μεταξύ 300-320nm.

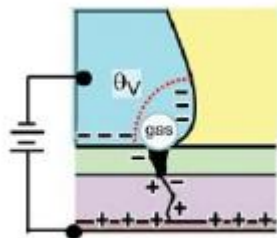
Η υδρόφοβη επίστρωση που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα έχει πάχος 60-75nm. Συνηθέστερη μέθοδος εναπόθεσης υδρόφοβων υμενίων όπως το Teflon[®] είναι η επίστρωση με περιστροφή (spin coating) στην επιφάνεια του κυρίως διηλεκτρικού. Στην τρέχουσα διπλωματική εργασία για την βελτίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της διηλεκτρικής δομής, έγινε εναπόθεση υμενίου φθοράνθρακα με χημική απόθεση από ατμό, στο κυρίως διηλεκτρικό (TEOS). Στην συνέχεια επίστρωθηκε με περιστροφή υδρόφοβο στρώμα από Teflon[®], επάνω στο στρώμα του φθοράνθρακα [18]. Το υδρόφοβο υμένιο, που αποτελείται από πλάσμα φθοράνθρακα και Teflon[®], στην παρούσα εργασία αναφέρεται και ως «*σύνθετη επίστρωση*» (composite coating). Αυτή η διηλεκτρική πολυστρωματική δομή που προκύπτει (σύνθετη επίστρωση και κυρίως διηλεκτρικό) έχει αποδειχθεί ότι εμφανίζει

α) αντοχή στην ηλεκτρόλυση ακόμα και σε υψηλές εφαρμοζόμενες τάσεις AC και DC (μέχρι και 2.5 φορές την κρίσιμη τάση κορεσμού, V_s),

β) μεγάλο εύρος μεταβολής της γωνίας επαφής και

γ) αξιοπιστία όσον αφορά στην αντιστρεπτότητα στην ηλεκτροδιαβροχή για μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων πειραμάτων. [18].

Η ηλεκτρόλυση είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στην ηλεκτροδιαβροχή επιφανειών και εμφανίζεται στα δείγματα με την εμφάνιση φυσαλίδων στο εσωτερικό της σταγόνας (βλ σχήμα 3.2) [18]. Αυτό αποτελεί συχνά σημάδι κατάρρευσης και αστοχίας του διηλεκτρικού.

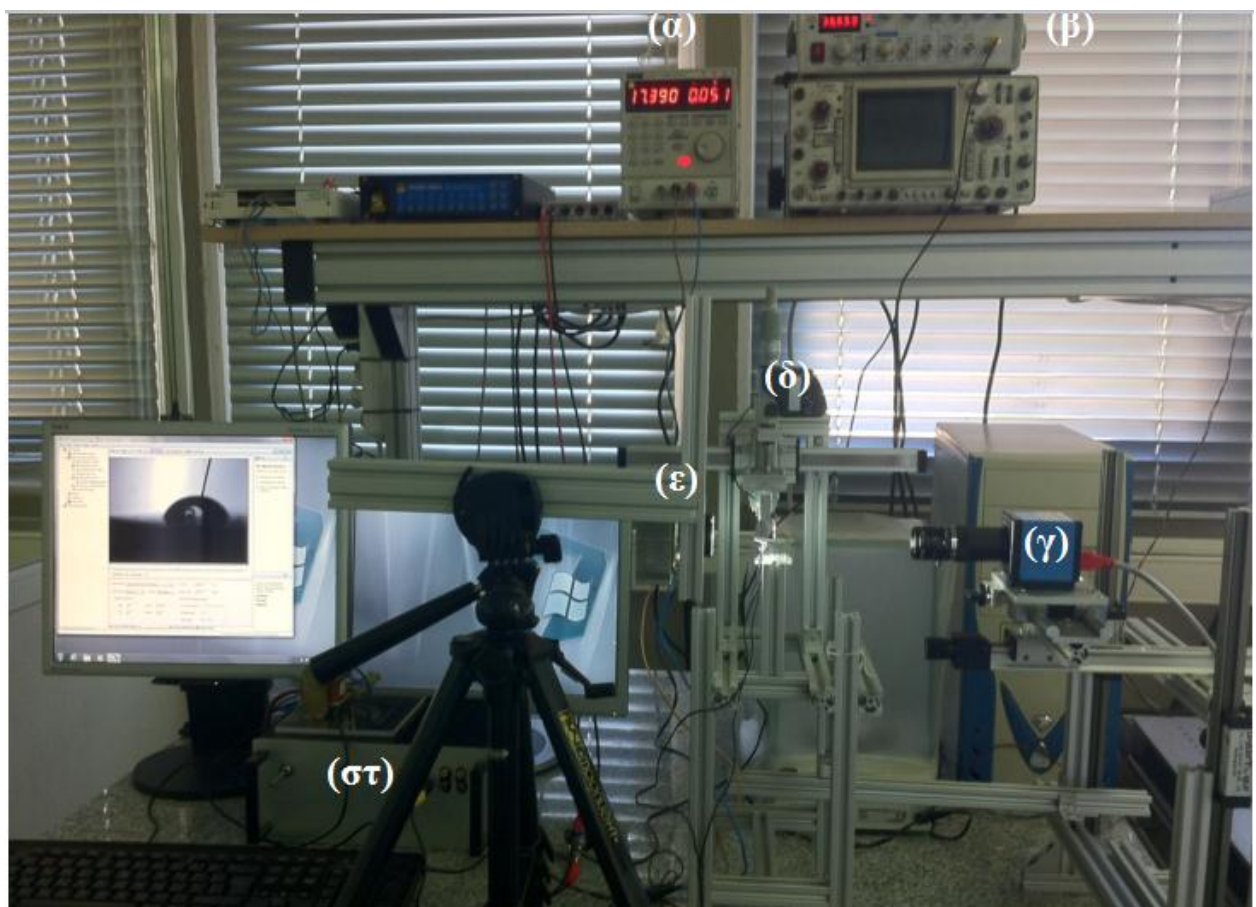


Σχήμα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση της ηλεκτρόλυσης

3.3 Πειραματικές διατάξεις

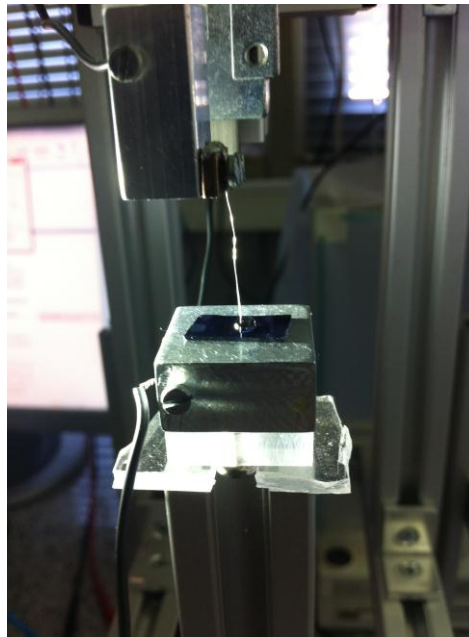
- **3.3.1 Διάταξη ηλεκτροδιαβροχής για τη μέτρηση γωνίας επαφής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης**

Η πειραματική διάταξη ηλεκτροδιαβροχής για τη μέτρηση γωνίας επαφής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



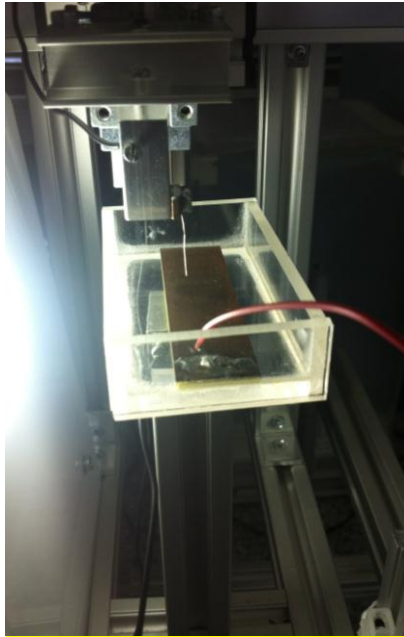
Σχήμα 3.3 : Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης ηλεκτροδιαβροχής όπου διακρίνονται : (α) τροφοδοτικό DC τάσης, (β) γεννήτρια συχνότητας, (γ) CCD κάμερα, (δ) μικρομετρικός κοχλίας με ένδειξη μετατόπισης, (ε) λάμπα τύπου LED, (στ) ενισχυτής σήματος

Με τη βοήθεια πιπέτας τοποθετείται αγωγίμη σταγόνα στην επιφάνεια της εν λόγω δομής. Στο Σχήμα 3.4 διακρίνεται το σύστημα σταγόνας-επιφάνειας-ηλεκτροδίου σε περιβάλλον μέσο αέρα. Λεπτό ηλεκτρόδιο απο αλουμίνιο, ικανό να κινείται στον άξονα x-z, βυθίζεται μέσα στην σταγόνα και εφαρμόζεται είτε ημιτονοειδής εναλλασσόμενη τάση AC) με ενεργό τιμή, U , και συχνότητα 2.3 kHz είτε συνεχής τάση (DC). Η τάση DC που εφαρμόζεται μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική και εξαρτάται απο το είδος της πόλωσης του ηλεκτροδίου. Αν είναι θετική τότε μιλάμε για θετική τάση DC ενώ αν αντιστρέψουμε την πόλωση θα έχουμε αρνητική τάση DC.



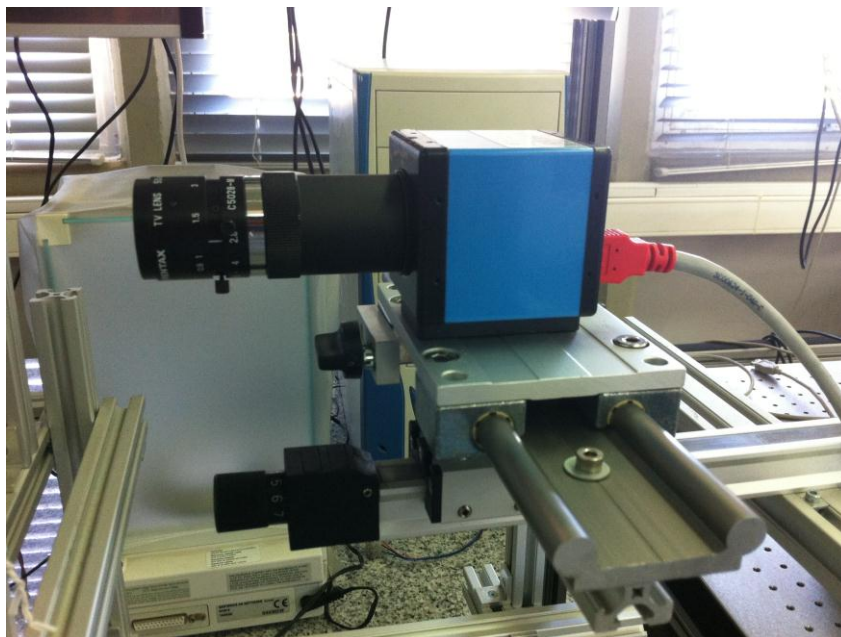
Σχήμα 3.3 Φωτογραφία συστήματος επιφάνειας-σταγόνας και ηλεκτροδίου σε περιβάλλον μέσο αέρα

Στην περίπτωση πειραμάτων ηλεκτροδιαβροχής σε περιβάλλον μέσο δωδεκανίου (καθαρότητας 99+%) χρησιμοποιούμε ένα διαφανές ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κουτί κατασκευασμένο απο μεθακρυλικό μεθύλιο (polymethyl methacrylate, PMMA) (Σχήμα 3.5). Το σύστημα της σταγόνας/διηλεκτρικού τοποθετείται μέσα στο λουτρό και αφού «καρφίτσωθεί» η σταγόνα από το ηλεκτρόδιο, γεμίζεται το λουτρό με το δωδεκάνιο μέχρι να επικαλυφθεί πλήρως η σταγόνα.



Σχήμα 3.5 Φωτογραφία διάταξης για πειράματα επικαθήμενων σταγόνων σε λουτρό δωδεκανίου

Το σχήμα της σταγόνας παρατηρείται με CCD κάμερα (σχήμα 3.6) με τη χρήση κατάλληλου φακού ενώ φωτίζεται με λάμπα τύπου LED η οποία ,όπως και η κάμερα, είναι τοποθετημένη σε βάση ικανή να μετακινείται στις διευθύνσεις x-y-z.

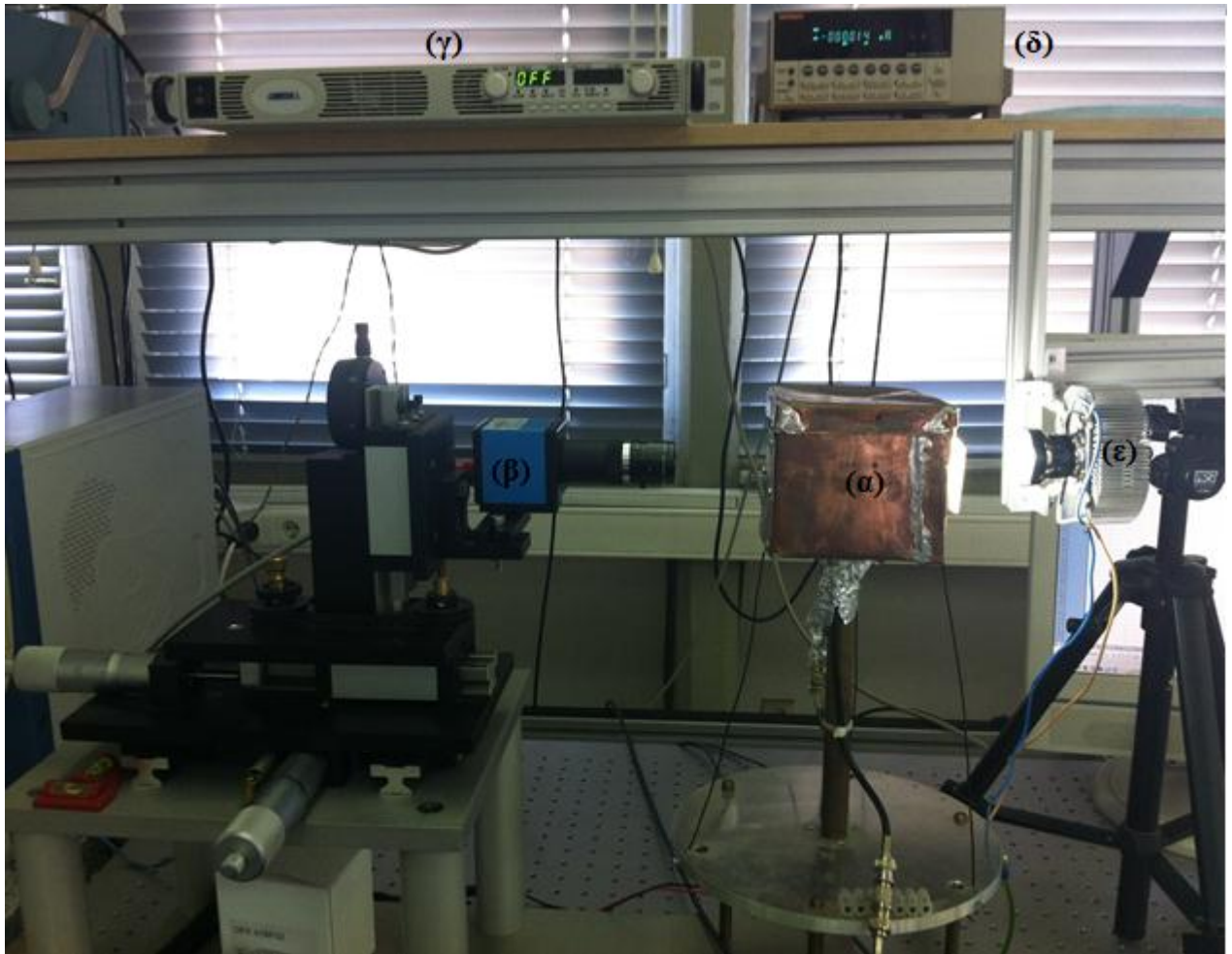


Σχήμα 3.6 Απεικόνιση CCD κάμερας

Ξεκινώντας από την αρχική γωνία επαφής και εφαρμόζοντας τάση καταγράφουμε την μεταβολή της γωνίας επαφής της σταγόνας σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση μέχρι και το σημείο κορεσμού της. Από το σημείο αυτό συνεχίζεται η επιβολή τάσης για την μελέτη της συμπεριφοράς της σταγόνας για τάσεις πέρα από τον κορεσμό ή βαθμιαία μειώνουμε την τάση μέχρι να φτάσει τα 0 V. Το εύρος τάσης που εφαρμόζεται είναι από 0V μέχρι και 2.5 φορές την τάση κορεσμού της γωνίας επαφής της σταγόνας. Στην περίπτωση των δοκιμασιών αντοχής υποβάλλουμε την σταγόνα σε διαρκή εφαρμογή τάσης (AC ή DC) που αντιστοιχεί σε 2.5 φορές την τάση κορεσμού. Στην περίπτωση αυτή ξεκινάμε από τα 0V και προοδευτικά αυξάνουμε την τάση μέχρι να φτάσει την επιθυμητή τιμή και στη συνέχεια παραμένει σταθερή.

3.3.2 Πειραματική διάταξη για μετρήσεις ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό

Η πειραματική διάταξη μέτρησης ρευμάτων διαρροής είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στην πειραματική διάταξη ηλεκτροδιαβροχής σε διηλεκτρικό. Οι μετρήσεις του ρεύματος διαρροής είναι πολύ ευαίσθητες στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Οι τιμές του ρεύματος που μετράται είναι της τάξης των nanoamperes και για τον λόγο αυτό το σύστημα ηλεκτροδιαβροχής είναι κλεισμένο σε ένα κουτί κατασκευασμένο από χαλκό (κλωβός Faraday) (α), ενώ η CCD κάμερα (β) και η λάμπα φωτισμού (ε) είναι τοποθετημένα έξω από τον κλωβό (Σχήμα 3.7). Στο σχήμα αυτό διακρίνονται επίσης το τροφοδοτικό DC τάσης (γ) καθώς και η συσκευή μέτρησης διαρροής του ρεύματος (δ). Η διαρροή του ρεύματος που μπορεί να ανιχνεύσει η συσκευή έχει ένα ανώτατο όριο ανίχνευσης που ορίζεται χειροκίνητα και στα ακόλουθα πειράματα είναι τα 200nA.



Σχήμα 3.7 : Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης για μετρήσεις ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό όπου διακρίνονται: (α) ο κλωβός Faraday, (β) CCD κάμερα, (γ) τροφοδοτικό DC τάσης, (δ) συσκευή μέτρησης ρεύματος διαρροής, (ε) λάμπα τύπου LED

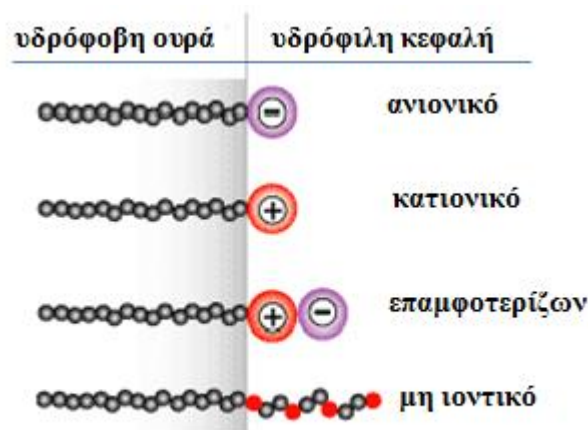
3.4 Υγρά που χρησιμοποιήθηκαν

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν σταγόνες που περιέχουν τασιενεργά υγρά, όγκου μέχρι ~10μl, καθώς σε αυτές τις διαστάσεις το σχήμα της ελεύθερης επιφάνειας της σταγόνας καθορίζεται από την αλληλεπίδραση των τριχοειδών και ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων και όχι από την βαρυτική δύναμη.

Τασιενεργές (surfactants) ονομάζονται οι ενώσεις (ή ουσίες) που μειώνουν την επιφανειακή τάση ανάμεσα σε δύο μή αναμίξιμα υγρά. Τα τασιενεργά είναι σημαντικό μέρος της τεχνολογίας των μικρορευστών που είναι βασισμένη σε σταγόνες. Κατέχουν σημαντικό ρόλο στην εξισορρόπηση της διεπιφάνειας της σταγόνας, στην βιοσυμβατότητα του συστήματος καθώς και στην διαδικασία της μοριακής ανταλλαγής μεταξύ σταγόνων [19]

Ως τασιενεργό χαρακτηρίζεται ένα αμφίφυλο μόριο, δηλαδή ένα μόριο το οποίο περιέχει τουλάχιστον δύο λειτουργικά μέρη : μια υδρόφιλη κεφαλή η οποία διαλύεται στον διαλύτη και μια υδρόφοβη ουρά η οποία κατά βάση δεν διαλύεται.

Η υδρόφιλικότητα εξασφαλίζεται με ομάδες που έχουν μεγάλη συγγένεια με τον διαλύτη και μπορεί να είναι φορτισμένες ή μη (Σχήμα 3.9). Η υδροφοβικότητα εξασφαλίζεται με την παρουσία στο μόριο μιας γραμμικής ή διακλαδωμένης υδρογονανθρακικής ή φθοροανθρακικής αλυσίδας.



Σχήμα 3.9 : Κατάταξη τασιενεργών ανάλογα με τη δομή της κεφαλής

Τα τασιενεργά χρησιμοποιούνται για πολλούς λόγους στην ηλεκτροδιαβροχή μεταξύ των οποίων είναι:

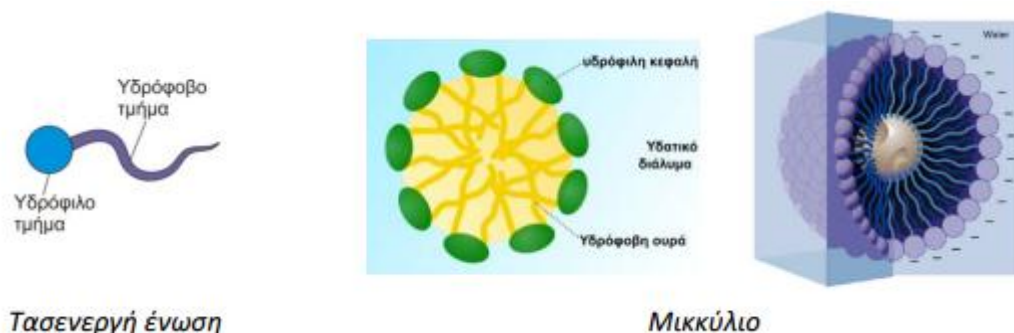
1. Μείωση της επιφανειακής τάσης (Dhindsa et al. 2011). Στην περίπτωση της απότομης αύξησης της διεπιφάνειας, τα τασιενεργά που βρίσκονται στον κύριο όγκο του διαλύματος διαχέονται προς τη νέα επιφάνεια ενώ τα τασιενεργά που

βρίσκονται ήδη στην διεπιφάνεια κινούνται για να καλύψουν το κενό. Αυτό οδηγεί σταδιακά σε μείωση της επιφανειακής τάσης μέχρι μια ασυμπτωματικά ελάχιστη τιμή.[20]

2. Μελέτη της επίδρασης του μεγεθους των ιόντων στην ηλεκτροδιαβροχή και συγκεκριμένα στην κατάρρευση ή μη του διηλεκτρικού με εφαρμογή τάσης.[21]

Σε χαμηλές συγκεντρώσεις τα διαλύματα των τασιενεργών ενώσεων εμφανίζουν την συνήθη συμπεριφορά όσο αφορά την μεταβολή διαφόρων ιδιοτήτων με την συγκέντρωση. Μετά από μια κρίσιμη συγκέντρωση παρατηρούνται αποκλίσεις από την φυσιολογική συμπεριφορά λόγω σχηματισμού συσσωμάτων, γνωστών ως μικκυλίων (Σχήμα 3.10).

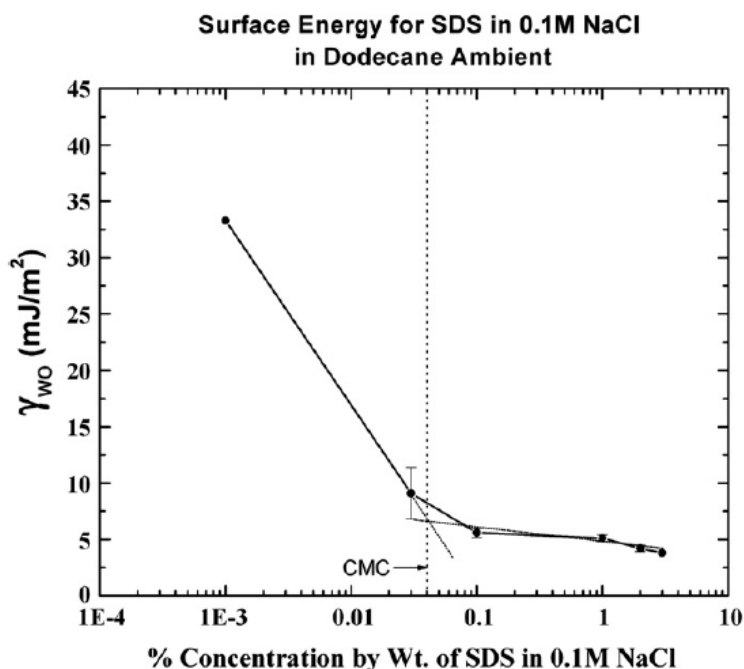
Η συγκέντρωση πάνω από την οποία παρατηρείται ο σχηματισμός μικκυλίων ονομάζεται κρίσιμη συγκέντρωση σχηματισμού μικκυλίων (ΚΣΜ). Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε τασιενεργές ουσίες τότε επιλέγουμε να δουλεύουμε σε συγκεντρώσεις πέρα από την κρίσιμη μικκυλιακή.



Σχήμα 3.10 : Απεικόνιση της τασιενεργής ένωσης (αριστερά) και της συσσωμάτωσης σε μικκύλιο (δεξιά)

Στα πειράματα προσθέσαμε στα τασιενεργά διαλύματα άλας NaCl καθώς η προσθήκη αλάτος μειώνει την κρίσιμη μικκυλιακή συγκέντρωση των ιοντικών τασιενεργών. Το αλάτι αυξάνει την υδροφοβικότητα οδηγώντας τα τασιενεργά στο να δημιουργούν μικκύλια σε μικρότερες συγκεντρώσεις, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την ΚΜΣ τους.[22]

Τιμές ΚΣΜ για τα διάφορα υγρά συναρτήσει της θερμοκρασίας τους δίνονται και στους πίνακες των Mukerjee & Mysels [23]. Το αντίστοιχο διάγραμμα για το SDS φαίνεται παρακάτω :

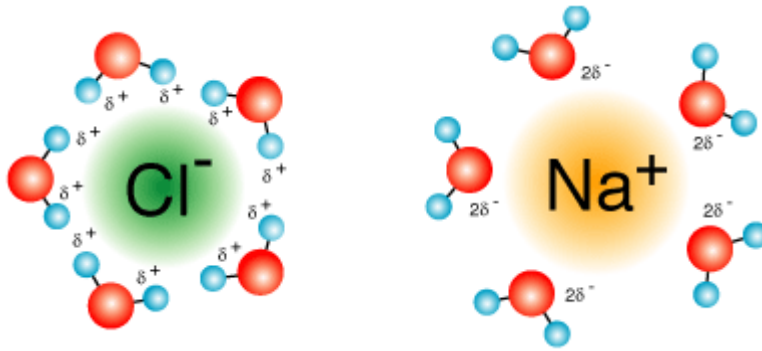


Σχήμα 3.11 Διάγραμμα επιφανειακής ενέργειας –τάσης για SDS 0.1% σε 0.1M NaCl[24]

Στα πειράματα μας χρησιμοποιήθηκαν :

- **Sodium chloride (NaCl)** : 0.1 wt.% NaCl διαλυμένο σε απιονισμένο νερό

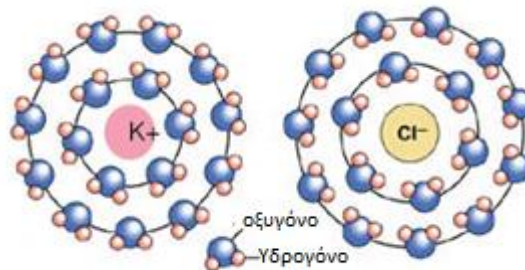
Το NaCl είναι ετεροπολική (ιοντική) ένωση και η έλξη μεταξύ των ιόντων Na^+ και Cl^- είναι τόσο μεγάλη που μόνο μεγάλης πολικότητας διαλύτες όπως το νερό μπορούν να το διαλύσουν. Όταν διαλύεται σε νερό το NaCl αποσυντίθεται καθώς τα ιόντα του περιβάλλονται από τα πολικά μόρια του νερού και το διάλυμα αυτό έχει καλή ηλεκτρική διαπερατότητα. Τα διαλύματα χλωριούχου νατρίου έχουν διαφορετικές ιδιότητες σε σχέση με το καθαρό νερό. Το σημείο ψύξης είναι $-21.12\text{ }^\circ\text{C}$ για 23.31 wt% NaCl, και το σημείο ζέσης του διαλύματος είναι κοντά στους $108.7\text{ }^\circ\text{C}$. Η επιφανειακή τάση του είναι περίπου 115 mN/m . Έχει μοριακή μάζα $58.44\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ και η διαλυτότητα του στο νερό σε θερμοκρασία 20°C είναι 359 g L^{-1} .



Σχήμα 3.12 Δομή του NaCl όταν διαλύεται σε νερό

- **Potassium chloride (KCl)** : 0.1 wt.% KCl διαλυμένο σε απιονισμένο νερό

Το KCl είναι ιοντική ένωση (άλας) αποτελούμενη από κατιόντα K και ανιόντα Cl. Διαλυμένο σε νερό μας δίνει ένα ιοντικό διάλυμα με υψηλή ηλεκτρική διαπερατότητα. Έχει μοριακή μάζα $74.5513 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ και η διαλυτότητα του στο νερό σε θερμοκρασία 20°C είναι 344 g/L .



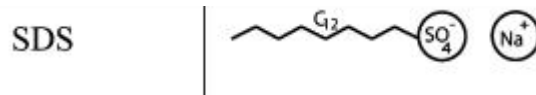
Σχήμα 3.13 Δομή του KCl όταν διαλύεται στο νερό

- **sodium dodecyl sulfate (SDS)**: 1 wt.% ή 0.1 wt.% SDS διαλυμένο σε 0.1M NaCl ή DI

Το SDS είναι τασιενεργή ουσία με μοριακό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$, (στο Σχήμα 3.14 βλέπουμε και τον συντακτικό του τύπο). Η παρασκευή του διαλύματος έγινε ως εξής : 0,2 gr SDS σε 20 ml διαλύματος NaCl 0.1M το οποίο προήλθε από ανάμειξη

0,24gr NaCl (που προκύπτει από την μοριακή μάζα του NaCl που είναι 58.44 g mol^{-1} και την συγκέντρωσή του 0.1M) σε 20 ml απιονισμένου νερού

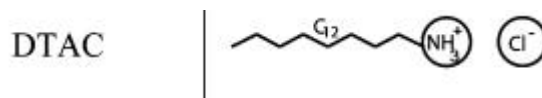
Η συγκέντρωση του SDS που επιλέξαμε (1 wt%) ήταν πάνω από την κρίσιμη μικυλλιακή συγκέντρωση του SDS σε 0.1M NaCl η οποία αναφέρει στην δημοσίευση του Berry et al. [24] ότι είναι 1.4 mM (0.04 wt%/vol)



Σχήμα 3.14 Συντακτικός τύπος του SDS

- **dodecyltrimethylammonium chloride (DTAC)** :1 wt.% DTAC διαλυμένο σε 0.1M NaCl ή DI

Είναι τασιενεργή ουσία με μοριακό τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$. Ο συντακτικός του τύπος φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Την παρασκευάσαμε διαλύοντας 0,2 gr DTAC σε 20 ml διαλύματος NaCl 0.1M το οποίο προήλθε από ανάμειξη 0,24 gr NaCl σε 20 ml απιονισμένου νερού.



Σχήμα 3.15 Συντακτικός τύπος του DTAC

3.5 Υπολογισμός της επιφανειακής τάσης ενός υγρού μέσω πειράματος ηλεκτροδιαβροχής

Η συνηθέστερη μέθοδος μέτρησης της επιφανειακής τάσεως είναι η μέθοδος του δακτυλίου. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η δύναμη για την απόσπαση κυκλικού δακτυλίου από σύρμα Pt από την επιφάνεια υγρού (σχήμα 6). Ο δακτύλιος κρεμάται στο άκρον της φάλαγγας ζυγού στρέψεως (du Noüy) και βυθίζεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια.

Μετρείται η δύναμη που απαιτείται για την απόσπαση του δακτυλίου από την επιφάνεια και η οποία ισούται προς την έλξη που ασκεί η επιφάνεια στον δακτύλιο. Η τελευταία είναι ίση προς την συνισταμένη δύναμη που ασκείται από τα μόρια του εσωτερικού του διαλύματος στα μόρια της επιφάνειας.

Τα σφάλματα που υπεισέρχονται στην μέτρηση αυτή οφείλονται στην παραμόρφωση του δακτυλίου, δηλαδή όλα τα σημεία του δακτυλίου πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο αλλά και ο δακτύλιος να είναι οριζόντιος, παράλληλος προς το επίπεδο του υγρού. Για την διόρθωση των τιμών της επιφανειακής τάσεως μετρείται η επιφανειακή τάση νερού ή άλλου υγρού αναφοράς και συγκρίνεται μ' αυτήν της βιβλιογραφίας προς εύρεση διορθωτικού συντελεστή.

Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης της επιφανειακής τάσης των διαλυμάτων με την χρήση ηλεκτροδιαβροχής περιγράφεται παρακάτω.

Ο υπολογισμός της επιφανειακής τάσης έγινε με την χρήση της εξίσωσης 1.4

$$\cos \theta_v = \cos \theta_y + \frac{1}{2\gamma} CV^2,$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή, C , υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο :

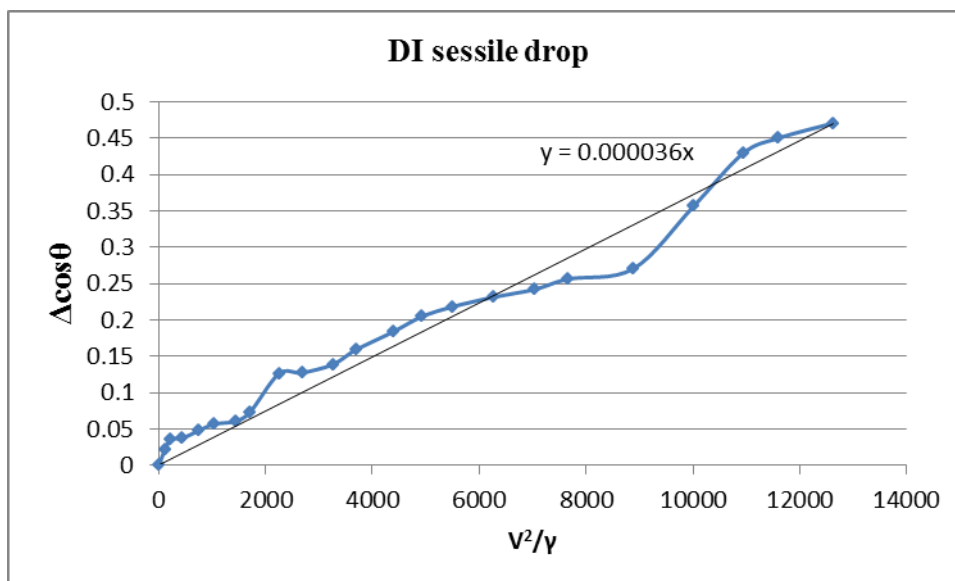
$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\delta}$$

όπου ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του υλικού, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, και δ , το πάχος της διηλεκτρικής δομής. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, $\epsilon_{\text{TEFLON}}=2.1$, $\epsilon_{\text{TEOS}}=3.8$, $d_{\text{TEFLON}}=62\text{nm}$, $d_{\text{TEOS}}=339\text{nm}$. Με βάση αυτά τα δεδομένα προκύπτει για την περίπτωση των διηλεκτρικών στρωμάτων η παρακάτω έκφραση για το ϵ_r

$$\frac{\frac{\epsilon_1}{d_1} \frac{\epsilon_2}{d_2}}{\frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2}}$$

όπου ϵ_1 και d_1 αναφέρονται στο Teflon[®] και τα ϵ_2 και d_2 στο TEOS. Τελικά προκύπτει ότι $C=7.45 \cdot 10^{-5}$. (Το Teflon[®] και το ενδιάμεσο στρώμα φθοράνθρακα έχουν περίπου ίδια διηλεκτρική σταθερή και εισάγονται στους υπολογισμούς ως ένα ενιαίο στρώμα).

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα γωνίας επαφής-τάσης για σταγόνα υγρού με γνωστή επιφανειακή τάση, όπως είναι το απεσταγμένο νερό, μπορούμε να βρούμε το αντίστοιχο C [25]. Συγκεκριμένα, γνωρίζοντας ότι για το DI με περιβάλλον αέρα, $\gamma=72.4\text{mN/m}$, το διάγραμμα του $\Delta\cos\theta=\cos\theta_V-\cos\theta_\gamma$ συναρτήσει του όρου V^2/γ , θα δώσει μία καμπύλη της οποίας η κλίση, α , εξαρτάται από το C ως εξής : $\alpha=C/2$. Από τα πειραματικά δεδομένα για μια σταγόνα 3.5μl προκύπτει το εξής διάγραμμα $\Delta\cos\theta - V^2/\gamma$:

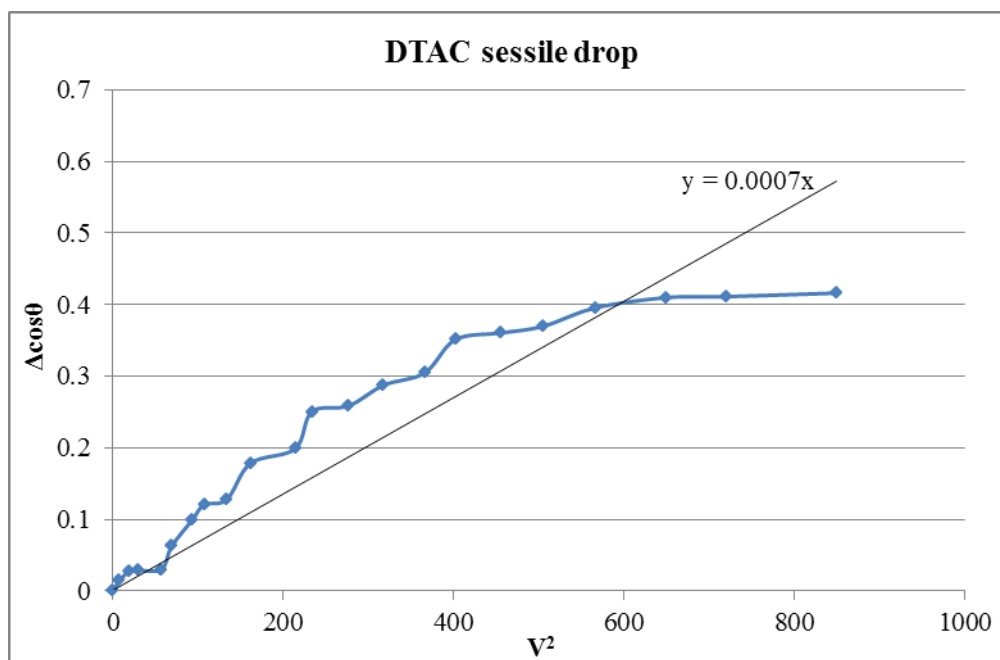


Σχήμα 3.17 Διάγραμμα $\Delta\cos\theta$ συναρτήσει του V^2/γ για σταγόνα DI

Από την κλίση της ευθείας ($\alpha=0.000036$) υπολογίζεται τελικά ένα $C=7.2 \cdot 10^{-5}$.

Με βάση αυτό το C που βρέθηκε η εύρεση της επιφανειακής τάσης του εκάστοτε υγρού βασίζεται και πάλι στην εξίσωση 1.4. Συγκεκριμένα με γνωστό το C και τις πειραματικές τιμές της γωνίας επαφής και της τάσης σχεδιάζονται τα

διαγράμματα $\Delta\cos\theta = \cos\theta_V - \cos\theta_Y$ συναρτήσει του όρου V^2 . Απο την κλίση της ευθείας, α , προκύπτει το γ σύμφωνα με την σχέση : $\alpha = C/2\gamma$. Παρακάτω δίνεται το παράδειγμα εύρεσης της επιφανειακής τάσης για μία σταγόνα DTAC 1wt.% σε περιβάλλον αέρα.



Σχήμα 3.18 Διάγραμμα $\Delta\cos\theta$ συναρτήσει του V^2 για σταγόνα DTAC 1wt.%

Απο τα δεδομένα υπολογίζεται ένα $\gamma = 0.057$ N/m για το DTAC 1wt.% στον αέρα. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται η επιφανειακή τάση για το SDS (0.067 N/m).

3.6 Μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπο εξέταση διαλυμάτων

Εκτός της επιφανειακής τάσης, μια άλλη σημαντική ιδιότητα των διαλυμάτων είναι η ηλεκτρική τους αγωγιμότητα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλύματος είναι μια μαθηματική έκφραση της *ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα*. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, το σθένος τους, την κινητικότητα τους, τη συγκέντρωσή τους, τη θερμοκρασία, το ιξώδες του διαλύματος και το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού με την οποία γίνεται η μέτρηση. Τα διαλύματα

των περισσότερων ανόργανων οξέων και βάσεων και όλων των αλάτων είναι σχετικά καλοί αγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος. Αντίθετα τα μόρια των οργανικών ενώσεων, που δεν δίστανται όταν διαλυθούν στο νερό, άγουν ελάχιστα ή καθόλου το ηλεκτρικό ρεύμα.

Για τα υγρά που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα έγιναν μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της βιβλιογραφίας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρόδιο μέτρησης βυθιζόμενου τύπου απο λευκόχρυσο με επιφάνεια κατά προσέγγιση 1cm^2 . Το ηλεκτρόδιο αυτό εμβαπτίζεται για καθαρισμό σε απεσταγμένο νερό πριν από κάθε μέτρηση. Όταν βρίσκεται στον αέρα και απαλλαγμένο απο τις διάφορες σταγόνες υγρού πρέπει να δίνει μία τιμή αγωγιμότητας μικρότερη απο $1\mu\text{S}$ για να θεωρήσουμε τις επόμενες μετρήσεις ακριβείς. Τελικά προκύπτει ο παρακάτω πίνακας μέτρησης αγωγιμότητας :

Υγρό	Αγωγιμότητα (μετρούμενη)		Αγωγιμότητα (βιβλιογραφία)	
	τιμή	μονάδα	τιμή	μονάδα
DI (milipore)	10.685	$\mu\text{S}/\text{cm}$	15	$\mu\text{S}/\text{cm}$
0.1 wt% SDS διαλυμένο σε 0.1M NaCl	11.54	mS/cm	11.22	mS/cm
1 wt% SDS διαλυμένο σε 0.1M NaCl	9.94	mS/cm	10.25	mS/cm
0.1wt% SDS διαλυμένο σε DI	326.5	$\mu\text{S}/\text{cm}$	286	$\mu\text{S}/\text{cm}$
0.1M NaCl διαλυμένο σε DI	2.93	mS/cm	1.99	mS/cm
1wt.% DTAC διαλυμένο σε 0.1M NaCl	12.98	mS/cm	13.45	mS/cm
1wt.% DTAC διαλυμένο σε DI	962	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1230	$\mu\text{S}/\text{cm}$
0.1M KCl διαλυμένο σε DI	13.335	mS/cm	14.65	mS/cm
1 wt % SDS διαλυμένο σε DI	1341	$\mu\text{S}/\text{cm}$	877	$\mu\text{S}/\text{cm}$

Πίνακας 4 Μετρούμενες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υγρών που χρησιμοποιήθηκαν και σύγκριση τους με την βιβλιογραφία [16]

3.7 Λογισμικό για τη μέτρηση της γωνίας επαφής

Η μέτρηση της γωνίας επαφής της σταγόνας σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, έγινε με τη χρήση του λογισμικού LabVIEW (<http://www.ni.com/trylabview/>) της National Instruments [26]. Πιο αναλυτικά, η προς ανάλυση φωτογραφία της επικαθήμενης σταγόνας, εισάγεται στο παράθυρο του λογισμικού. Στην εικόνα που εμφανίζεται στο Front Panel του LabVIEW, φέρουμε μια γραμμή στην επαφή της σταγόνας με το διηλεκτρικό προσέχοντας να ταυτίζεται με το επίπεδο επαφής τους. Αφού φέρουμε τη γραμμή, κάνουμε σάρωση της σταγόνας με γραμμές προς την εύρεση αιχμών. Χρησιμοποιείται επαναληπτική διαδικασία για να γίνει ακτινική σάρωση της σταγόνας και τελικά εμφανίζεται η τιμή της γωνίας επαφής της σταγόνας μαζί με το εκάστοτε σφάλμα. Γενικά τιμές της γωνίας επαφής γίνονται αποδεκτές όταν παρουσιάζουν σφάλμα μικρότερο από 0.05%. Πιο αναλυτικά για το πώς γίνεται ο υπολόγισμός της γωνίας επαφής βλ. Διπλωματική Εργασία Γ. Λιγνός 2009. [51]

Κεφάλαιο 4: Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής σε επικαθήμενες σταγόνες

4.1 Εισαγωγή - Σκοπός των πειραματικών μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του μεγέθους των ιόντων των υπό εξέταση υγρών στην κατάρρευση ή μη του διηλεκτρικού σε συστήματα ηλεκτροδιαβροχής υπό την επιβολή AC και +/- DC τάσης. Η αφορμή για τα πειράματα δόθηκε από τη δημοσίευση του Raj et al. [21] σύμφωνα με την οποία το μέγεθος των θετικών ή αρνητικών ιόντων του αγώγιμου υγρού παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του φαινομένου της ηλεκτροδιαβροχής. Συγκεκριμένα, όσο πιο μικρά σε μέγεθος είναι τα ιόντα τόσο ευκολότερα μπορούν να διεισδύσουν στο διηλεκτρικό μέσω πιθανών ατελειών του, οδηγώντας στην κατάρρευσή του.

4.2 Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής

Για την επιβεβαίωση του παραπάνω ισχυρισμού πραγματοποιήθηκαν οι εξής ακολουθίες πειραμάτων:

A. Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής με σταγόνα που περιέχει τασιενεργή ουσία **Dodecyl Trimethyl Ammonium Chloride (DTAC)**, **Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)** και απιονισμένο υγρό (DI) σε περιβάλλον μέσο αέρα και δωδεκάνιο. Απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα εφαρμοζόμενης τάσης-γωνίας επαφής και σύγκριση αυτών ως προς την αρχική γωνία επαφής θ_Y , την γωνία κορεσμού, θ_s , και την τάση κορεσμού, V_s .

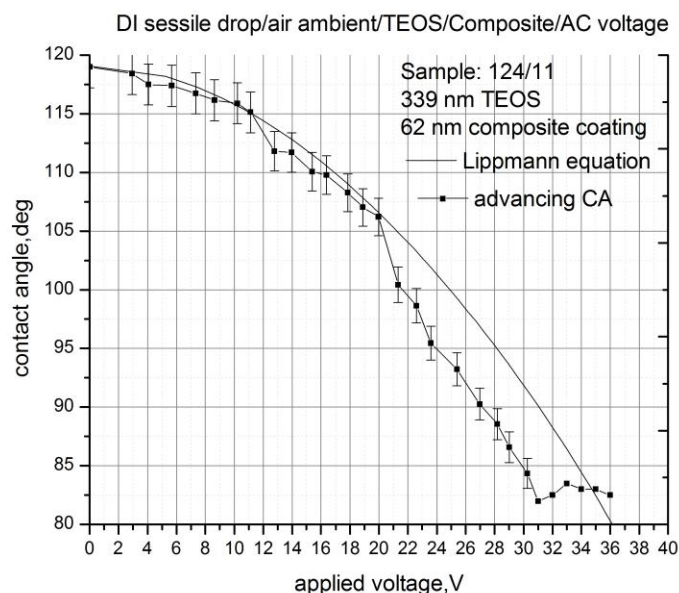
B. Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής με σταγόνες που περιέχουν DTAC, SDS και DI για τις εξής εφαρμοζόμενες τάσεις : AC, + DC .

Γ. Δοκιμασίες αντοχής [συνεχή εφαρμογή (από μερικά λεπτά ως και ώρες) τάσης AC ή DC] για σταγόνες DTAC και SDS και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

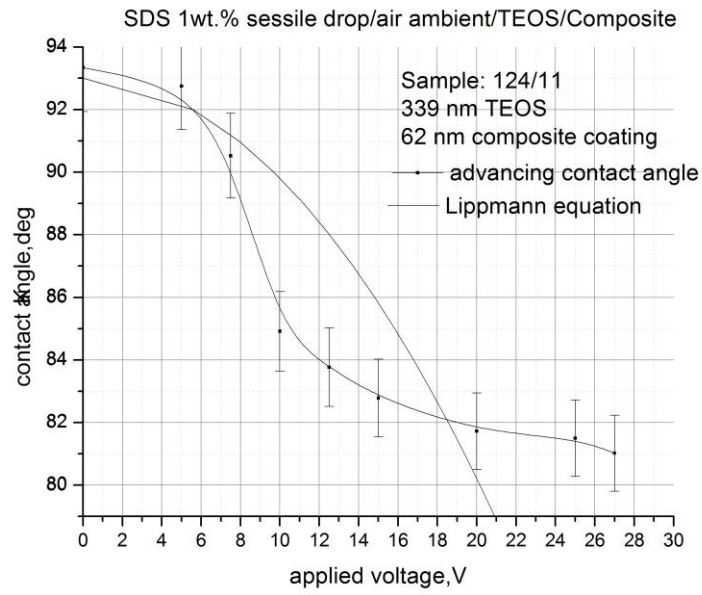
4.2.1 Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής σταγόνων DTAC, SDS, DI σε αέρα και δωδεκάνιο

Για την διηλεκτρική δομή που αναφέραμε στην παράγραφο 3.2 (Πάχος TEOS=339 nm, Πάχος Teflon[®]=62 nm) και για σταγόνες DI, SDS και DTAC σε περιβάλλον αέρα ή δωδεκανίου υπολογίζουμε τη μεταβολή της γωνίας επαφής με την εφαρμοζόμενη AC τάση. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε διαγράμματα και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες προβλέψεις της εξίσωσης Lippmann για την κάθε περίπτωση. Στα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα ως advancing contact angle θεωρούμε την γωνία επαφής που καταγράφεται με αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης.

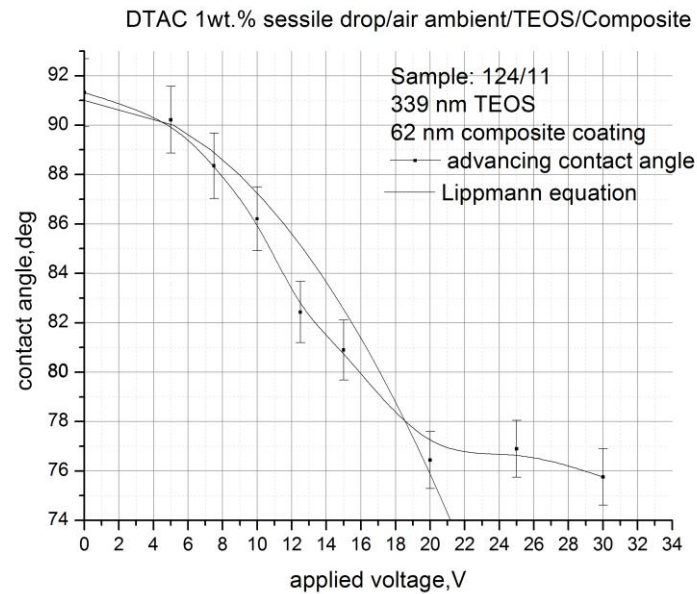
- Περιβάλλον μέσο : αέρας



Σχήμα 4.1 Μεταβολή γωνίας επαφής με την εφαρμοζόμενη τάση για σταγόνα απεσταγμένου νερού (DI)



Σχήμα 4.2 Μεταβολή γωνίας επαφής με την εφαρμοζόμενη τάση για σταγόνα 1wt.% SDS διαλυμένο σε 0.1M NaCl



Σχήμα 4.3 Μεταβολή γωνίας επαφής με την εφαρμοζόμενη τάση για σταγόνα 1wt.%DTAC διαλυμένο σε 0.1M NaCl

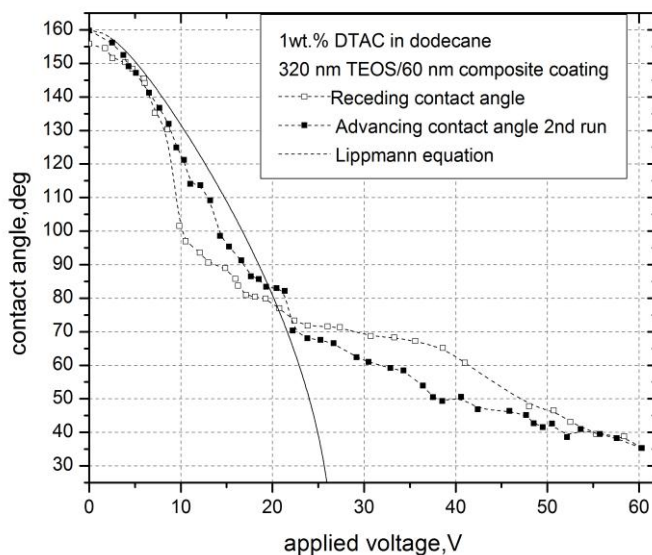
Απο τις πειραματικές μετρήσεις και την αποτύπωση τους σε γραφικές παραστάσεις, καταγράφεται στον κατώθι πίνακα 5 για κάθε υγρό η τάση κορεσμού, V_s , καθώς και η γωνία κορεσμού θ_s (πίνακας 5).

Υγρό	$\theta_Y(^{\circ})$	$\theta_s(^{\circ})$	V_s (Volts)
DI	119	84	31
SDS	93	80	18
DTAC	91	77	16.5

Πίνακας 5 : Συγκεντρωτικός πίνακας θ_Y , θ_s και V_s για σταγόνες DI, SDS, DTAC, όπως προκύπτουν απο τα πειραματικά αποτελέσματα για περιβάλλον μέσο αέρα

- **Περιβάλλον μέσο : δωδεκάνιο/ Έμφαση στην υστέρηση γωνίας επαφής στην ηλεκτροδιαβροχή**

Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής σε περιβάλλον δωδεκάνιο για 1wt% DTAC διαλυμένο σε NaCl 0.1M για AC τάση μας έδωσαν το διάγραμμα του Σχήματος 4.4. Καθώς η τάση κορεσμού για το συγκεκριμένο υγρό είχε βρεθεί κοντά στα 17V καταγράψαμε τις γωνίες επαφής για τάση μέχρι 2.5 φορές την τάση κορεσμού και όταν φτάσαμε τα 60V σταδιακά αρχίσαμε να καταγράφουμε τις μεταβολές της γωνίας επαφής από την τάση αυτή μέχρι τον μηδενισμό της.

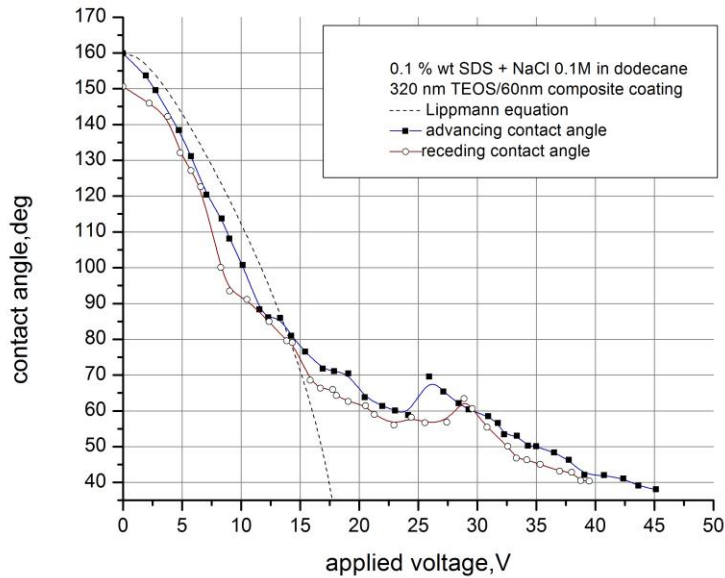


Σχήμα 4.4 Μεταβολή γωνίας επαφής με εφαρμοζόμενη τάση μέχρι και 2.5 φορές την τάση κορεσμού του 1wt.%DTAC

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η αρχική γωνία επαφής πριν την επιβολή της τάσης (160°) είναι μεγαλύτερη από την γωνία επαφής που καταγράφεται μετά την επιβολή της τάσης των 60V και μέχρι τον μηδενισμό (156°). Έχουμε δηλαδή υστέρηση στην ηλεκτροδιαβροχή κατά 4° . Αυτό μπορεί να οφείλεται σε παγίδευση του φορτίου στο διηλεκτρικό.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στο πείραμα αυτό η αναστροφή του βρόγχου υστέρησης για τιμές πέρα από την τάση κορεσμού [18]. Πιο συγκεκριμένα, κατά την μέτρηση της γωνίας επαφής από τα 60V μέχρι τον μηδενισμό, παρατηρείται ότι για τάσεις μέχρι τον κορεσμό καταγράφονται μεγαλύτερες γωνίες επαφής από τις αντίστοιχες για μεταβολή της τάσης από 0V-60V. Παράλληλα από το σημείο κορεσμού και μέχρι τον μηδενισμό οι γωνίες επαφής είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν από τον μηδενισμό μέχρι τον κορεσμό. Παρατηρείται ακόμα ότι ο βρόγχος αυτός καταλήγει σε γωνία επαφής μικρότερη από την αρχική που καταγράψαμε από 0V-60V.

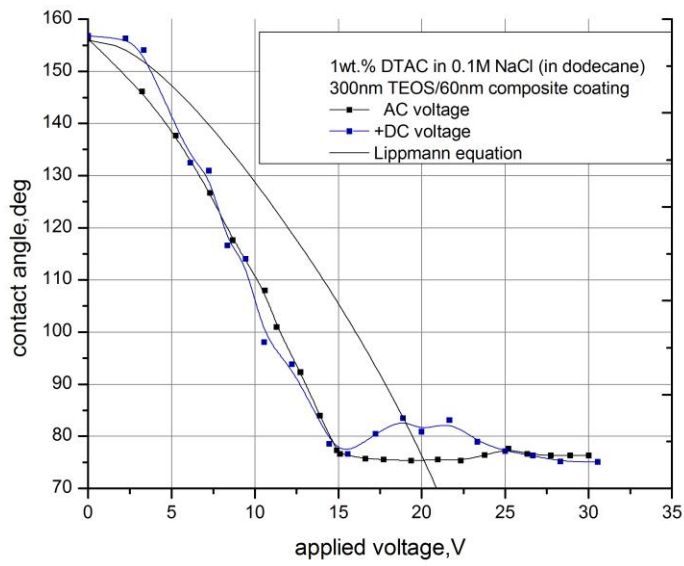
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στο 0.1wt% SDS διαλυμένο σε NaCl 0.1M. Και εδώ παρατηρούμε υστέρηση στην ηλεκτροδιαβροχή περίπου 5° (Σχήμα 4.5).



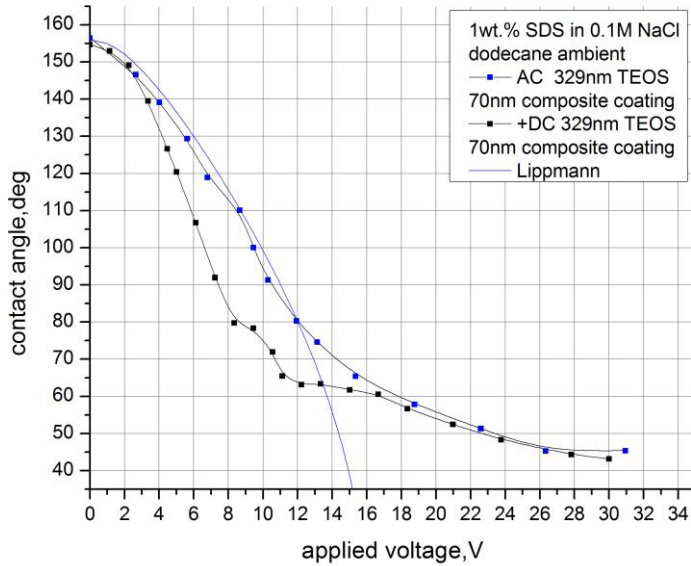
Σχήμα 4.5 Μεταβολή της γωνίας επαφής με εφαρμοζόμενη τάση μέχρι και 2.5 φορές την τάση κορεσμού του 0.1wt.% SDS

4.2.2 Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής με σταγόνα DTAC και SDS υπο τάση : AC, +DC

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα ηλεκτροδιαβροχής σε περιβάλλον δωδεκνίου για για τα εξής αγώγιμα υγρά 1wt.% DTAC διαλυμένο σε 0.1M NaCl και 1wt.% SDS διαλυμένο σε NaCl 0.1M για εφαρμοζόμενη τάση AC και +DC. Προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα (εικόνες 4.6 και 4.7)



Σχήμα 4.6 Μεταβολή της γωνίας επαφής υπο εφαρμοζόμενη τάση για AC και DC σε 1wt.%DTAC



Σχήμα 4.7 Μεταβολή της γωνίας επαφής υπο εφαρμοζόμενη τάση AC και DC σε 1wt.%SDS

Παρατηρήθηκε ότι για σταγόνες DTAC και SDS για AC και +DC εφαρμοζόμενη τάση μετρούμε σχεδόν ίδια τιμή κρίσιμης τάσης κορεσμού

Απο τα πειράματα σε SDS και DTAC σε περιβάλλον δωδεκάνιο προέκυψε ο παρακάτω πίνακας για AC και +DC εφαρμοζόμενη τάση:

Υγρό	$\theta_Y(^{\circ})$	$\theta_s(^{\circ})$	$V_s(\text{Volts})$
SDS	158	63	15
DTAC	156	78	15

Πίνακας 6 : Αρχική γωνία επαφής, γωνία κορεσμού της σταγόνας και τάση κορεσμού για σταγόνες, SDS, DTAC όπως προκύπτουν από τα πειραματικά αποτελέσματα για περιβάλλον δωδεκανίου

4.2.3 Δοκιμασίες αντοχής της διηλεκτρικής δομής με σταγόνα DTAC

Οι δοκιμασίες αντοχής (“lifetime tests”) πραγματοποιήθηκαν με συνεχή εφαρμογή (από μερικά λεπτά ως και ώρες) AC και +/- DC τάσης, με σταγόνα DTAC (1wt.% διαλυμένο σε NaCl 0.1M) σε περιβάλλον δωδεκανίου. Αφού καταγραφεί από πειράματα ηλεκτροδιαβροχής η τάση κορεσμού, V_s , στη συνέχεια εφαρμόζουμε τάση ίση με $\sim 1.5 V_s$. Η διηλεκτρική δομή που χρησιμοποιήθηκε είναι 300 nm TEOS/ 60 nm «σύνθετης επίστρωσης». Τα πειράματα αυτά αποτελούν συνέχεια των πειράματων που παρουσιάστηκαν στην δημοσίευση των Papageorgiou et al. [18] και έχουν ως στόχο αφενός να επιβεβαιώσουν την αντοχή στην κατάρρευση της πρότυπης διηλεκτρικής δομής που αναφέρθηκε προηγουμένως και αφετέρου να υποδείξουν την εξάρτηση της κατάρρευσης του διηλεκτρικού από το μέγεθος των ιόντων του διαλύματος σε σχέση με το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων καταγράφεται η μεταβολή της γωνίας επαφής της σταγόνας σε σχέση με την εφαρμοζόμενη τάση λαμβάνοντας στιγμιότυπα ανά 30 s έως τα πρώτα 10 min και ύστερα στιγμιότυπα ανα 5 min. Μετά το πέρας του

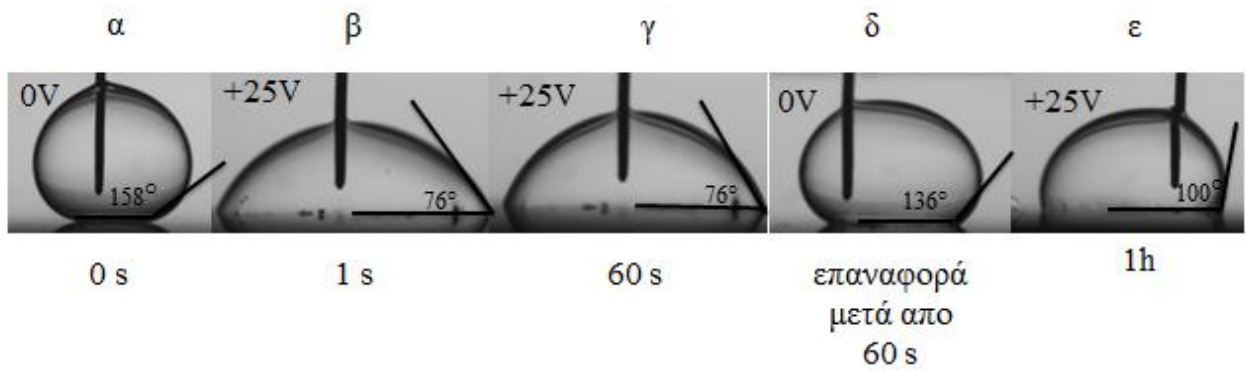
πειράματος γίνεται μέτρηση της γωνίας επαφής της σταγόνας για κάθε στιγμιότυπο και τα αποτελέσματα παρατίθενται σε διάγραμμα γωνίας επαφής ($^{\circ}$) – χρόνου (s).

- **Δοκιμασία αντοχής της διηλεκτρικής δομής με σταγόνα DTAC σε +25V DC τάση.**

Το DTAC έχει μεγαλύτερο θετικό ιόν ($C_{12}NH_3^+$) σε σχέση με το θετικό ιόν του SDS (Na^+) (βλ. κεφάλαιο 3.4) επομένως σε θετική DC εφαρμοζόμενη τάση (βλ. Κεφάλαιο 3.3 - πόλωση της διηλεκτρικής δομής) αναμένεται να υπάρχει δυσκολία στην διείσδυση του μεγάλου θετικού ιόντος από τους πόρους/πλεγματικές ατέλειες της διηλεκτρικής δομής. Κατά συνέπεια αναμένεται ανθεκτικότητα του στην διηλεκτρική κατάρρευση για αυτό το είδος της πόλωσης σε σχέση με την σταγόνα SDS. Η αρχική αυτή υπόθεση επιβεβαιώθηκε από τις μετρήσεις (Σχήμα 4.9) ως ακολούθως:

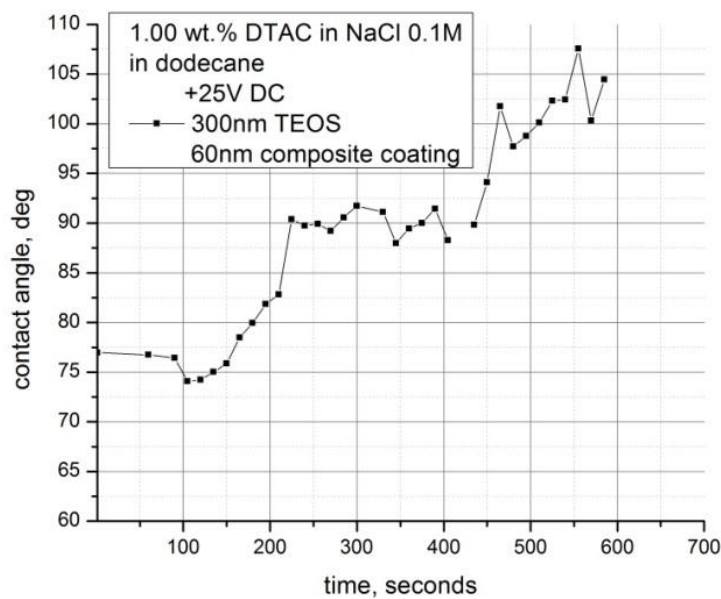
Η αρχική γωνία επαφής της σταγόνας DTAC σε περιβάλλον δωδεκανίου είναι $\sim 158^{\circ}$. Στο πρώτο λεπτό εφαρμογής της τάσης (+25 V DC) η γωνία επαφής της σταγόνας φτάνει τις $\sim 76^{\circ}$ (Σχήμα 4.9.γ). Μηδενίζοντας την τάση η σταγόνα επανέρχεται στις $\sim 136^{\circ}$ (υστέρηση στην ηλεκτροδιαβροχή $\sim 22^{\circ}$) (Σχήμα 4.9.δ). Με επανεφαρμογή της τάσης η γωνία επαφής φτάνει τις $\sim 100^{\circ}$ και παραμένει η ίδια για μία ώρα όπου και σταματάμε την πειραματική διαδικασία (Σχήμα 4.9 ε).

Παρατηρούμε ότι για θετική πόλωση [ενδεχομένως λόγω του μεγάλου θετικού ιόντος του DTAC ($C_{12}NH_3^+$) σε σχέση με το αντίστοιχο αρνητικό ιόν του (Cl^-)], δεν παρατηρείται ηλεκτρόλυση στο δείγμα (που εμφανίζεται με τη μορφή φυσαλίδων στην σταγόνα) και αποτελεί ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης.



Σχήμα 4.9 Τιμές γωνιών επαφής στις αντίστοιχες εφαρμοζόμενες τάσεις για σταγόνα DTAC σε +25V DC εφαρμοζόμενη τάση

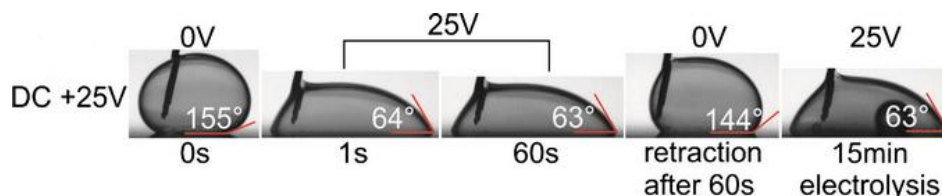
Επειδή στα πρώτα 10 min παρατηρούμε την μεγαλύτερη μεταβολή στην γωνία επαφής (από $\sim 77^\circ$ φτάνει τις $\sim 100^\circ$) παρατίθεται διάγραμμα όπου καταγράφεται η μεταβολή της γωνίας επαφής συναρτήσει του χρόνου για τα πρώτα 10min της δοκιμασίας αντοχής (Σχήμα 4.10). Ενδεχομένως, παγιδεύονται φορτία στο εσωτερικό του διηλεκτρικού [27] και κορέννται η συγκέντρωση τους τα πρώτα 10 min εφαρμογής της τάσης.



Σχήμα 4.10 Μεταβολή της γωνίας επαφής τα πρώτα 10 min εφαρμογής +25 V DC τάσης

Σύμφωνα με αντίστοιχο πείραμα της δημοσίευσης [18] σε αντίστοιχη δοκιμασία αντοχής που πραγματοποιήθηκε σε +25 V DC σε 1 wt.% SDS (διαλυμένο σε

NaCl 0.1M) στην ίδια διηλεκτρική δομή (300nm TEOS και 60nm «σύνθετης επίστρωσης») τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

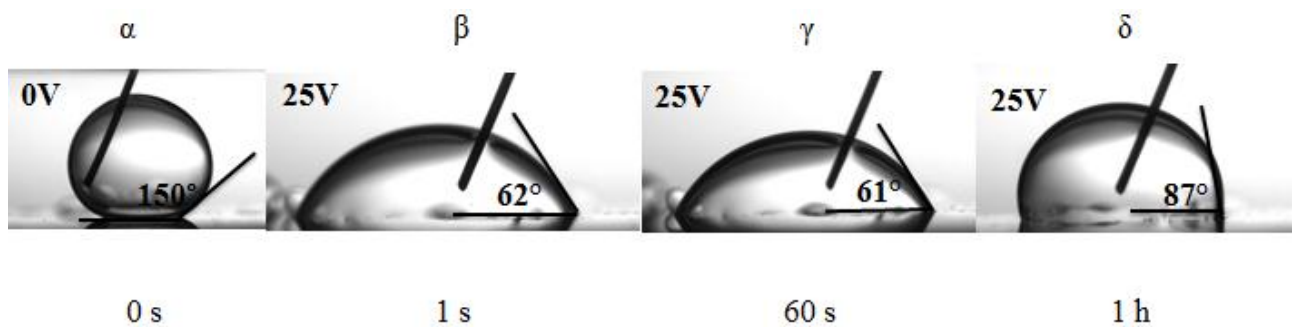


Σχήμα 4.11 Δοκιμασία αντοχής για SDS 1wt.% σε +25 V DC [18]

Για την ίδια διηλεκτρική δομή και την ίδια πόλωση η σταγόνα του SDS στα πρώτα 15 min εμφανίζει φυσαλίδες (ηλεκτρόλυση) και συνεπώς διηλεκτρική κατάρρευση. Στα αντίστοιχα πειράματα με σταγόνα DTAC μέχρι και για 1 h δεν παρατηρήθηκε ηλεκτρόλυση. Το μεγάλο θετικό ιόν του DTAC διεισδύει με μεγαλύτερη δυσκολία στις ατέλειες της επιφάνειας και στο «κυρίως σώμα» της διηλεκτρικής δομής και κατά συνέπεια οδηγεί δυσκολότερα σε διηλεκτρική κατάρρευση.

Σημαντικό συμπέρασμα είναι επίσης το ακόλουθο: για θετική πόλωση, μολονότι έχουμε στο διάλυμα ευκίνητα ιόντα Na^+ (εφόσον το DTAC είναι διαλυμένο σε NaCl 0.1M) θα περίμενε κανείς να διεισδύουν και παγιδεύονται ιόντα Na^+ στο διηλεκτρικό και εκείνα να προκαλούν διηλεκτρική κατάρρευση. Οστόσο, παρατηρούμε ότι ενδεχομένως σημαντικότερο ρόλο παίζουν τα ιόντα που είναι συγκεντρωμένα στην διεπιφάνεια υγρού- δωδεκανίου ($\text{C}_{12}\text{NH}_3^+$) αφού καθορίζουν φαινομενικά την ανθεκτικότητα ή μη της διηλεκτρικής δομής σε σχέση με την τάση πόλωσης.

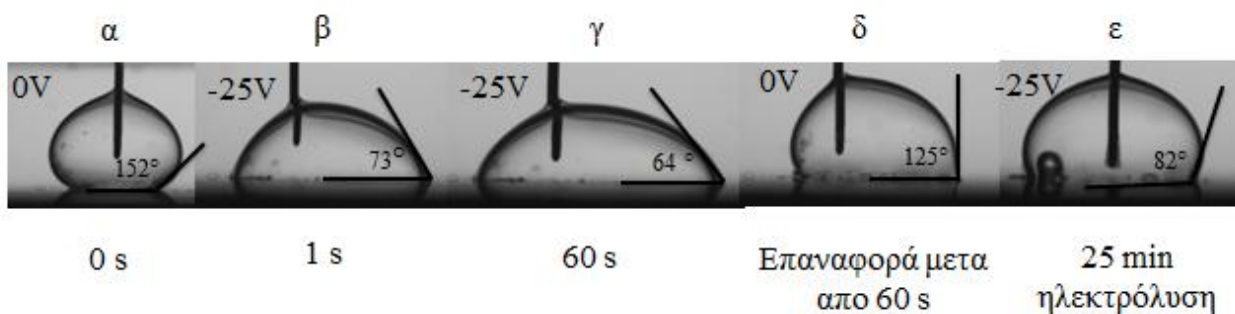
Το παραπάνω συμπέρασμα ενισχύεται και απο τις δοκιμασίες αντοχής που πραγματοποιήθηκαν με διάλυμα DTAC 1% (διαλυμένο σε απεσταγμένο νερό, DI), απαλλαγμένο δηλαδή από τα πρόσθετα ευκίνητα ιόντα Na^+ που είχαμε προηγουμένως. Παρατηρούμε ότι για θετική πόλωση (βλ. Σχήμα 4.12) δεν εμφανίζονται φυσαλίδες στο υγρό (ηλεκτρόλυση) που είναι ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης. Η παραπάνω παρατήρηση συμπίπτει με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δοκιμασιών αντοχής για DTAC 1% διαλυμένο σε NaCl 0.1M (βλ. σχήμα 4.9)



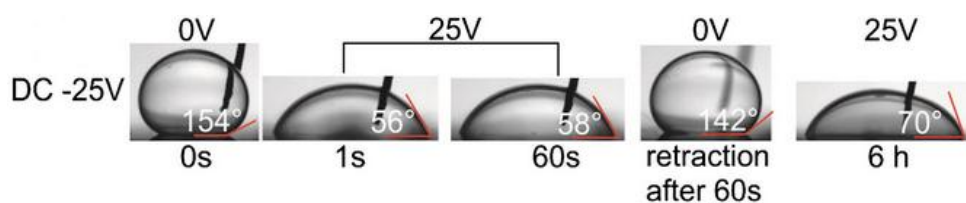
Σχήμα 4.12 Τιμές γωνιών επαφής στις αντίστοιχες εφαρμοζόμενες τάσεις για σταγόνα DTAC 1% (διαλυμένο σε DI) σε +25V DC εφαρμοζόμενη τάση

- **Δοκιμασία αντοχής της διηλεκτρικής δομής με σταγόνα DTAC σε -25V DC τάση.**

Το DTAC έχει μικρότερο αρνητικό ιόν (Cl^-) σε σχέση με το SDS ($\text{C}_{12}\text{SO}_4^-$) επομένως σε αρνητική πόλωση αναμένεται τα ιόντα Cl^- να διεισδύσουν σχετικά ευκολότερα διαμέσου της «πορώδους» δομής των υλικών από τα οποία συνίσταται η διηλεκτρική δομή. Κατά συνέπεια αναμένεται κατάρρευση του διηλεκτρικού γρηγορότερα από ότι στην περίπτωση της θετικής πόλωσης για την ίδια πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Η υποθέση αυτή επιβεβαιώθηκε από τις πειραματικές μετρήσεις καθώς στα πρώτα 25min εφαρμογής της τάσης, παρατηρήθηκε ηλεκτρόλυση (διηλεκτρική κατάρρευση) (Σχήμα 4.13)



Σχήμα 4.13 Δοκιμασία αντοχής για DTAC 1wt.% σε -25V DC



Σχήμα 4.14 Δοκιμασία αντοχής για SDS 1wt.% σε -25 V DC [18]

Στα αντίστοιχα πειράματα με σταγόνα SDS [18] (για -25 V DC) διατηρείται για μέχρι και 6 ώρες, δεν παρατηρούνται σημάδια κατάρρευσης του διηλεκτρικού (Σχήμα 4.14).

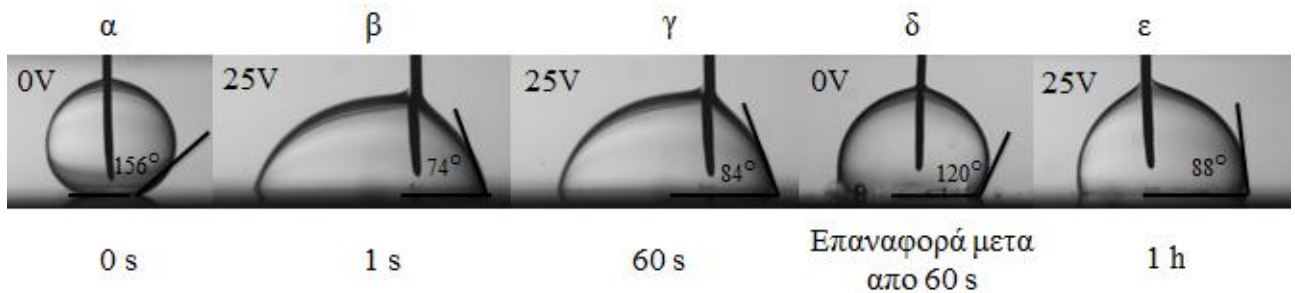
Τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τις εκτιμήσεις του Raj et al. [21] σχετικά με την επίδραση του μεγέθους των ιόντων στην διηλεκτρική κατάρρευση. Το SDS έχει μεγαλύτερου μεγέθους αρνητικό ιόν ($C_{12}SO_4^-$) από το αντίστοιχο του DTAC (Cl^-) συνεπώς αναμένεται μεγαλύτερη αντοχή του διηλεκτρικού σε αρνητική πόλωση.

Σημαντικό συμπέρασμα όπως και προηγουμένως -αντιστοίχως για αρνητική πόλωση είναι επίσης το ακόλουθο: στο διάλυμα μας έχουμε ευκίνητα ιόντα Na^+ και Cl^- (εφόσον το DTAC είναι διαλυμένο σε $NaCl$ 0.1M), συνεπώς θα περίμενε κανείς παρόμοια συμπεριφορά ως προς την διηλεκτρική κατάρρευση και στις δύο πόλωσεις (διείσδυση και παγιδεύση ιόντων Na^+ ή Cl^-). Ωστόσο, παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική διαφορά στην ανθεκτικότητα ή μη της διηλεκτρικής δομής σε σχέση με την τάση πόλωσης. Ενδεχομένως, λοιπόν, σημαντικότερο ρόλο παίζουν τα ιόντα (το είδος

σε σχέση με το μέγεθός τους) που είναι συγκεντρωμένα στην διεπιφάνεια υγρού-δωδεκανίου αφού φαινομενικά αυτά καθορίζουν την κατάρρευση.

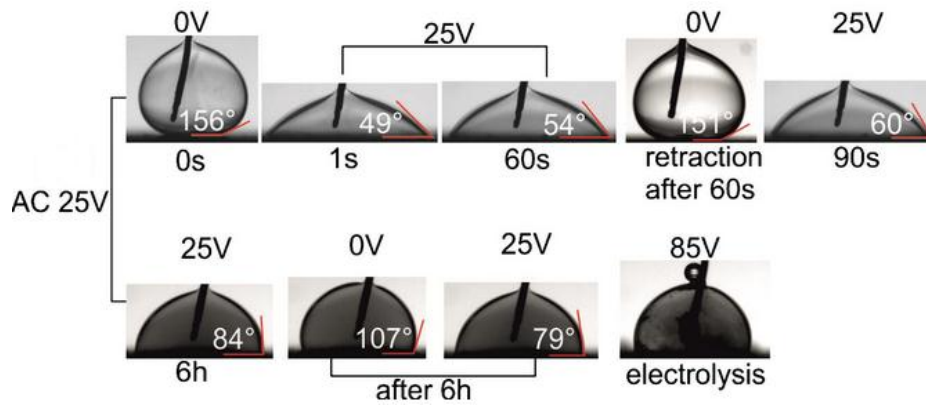
- **Δοκιμασία αντοχής της διηλεκτρικής δομής με σταγόνα DTAC σε 25V AC τάση.**

Οι πειραματικές μετρήσεις για τάση 25V AC έδειξαν ότι η γωνία επαφής παραμένει σταθερή για τα πρώτα 60 s και είναι ίση με $\sim 84^\circ$. Με περαιτέρω εφαρμογή της τάσης για περίπου 1 ώρα δεν παρατηρείται κατάρρευση του διηλεκτρικού με την γωνία επαφής να παραμένει σταθερή ίση με $\sim 88^\circ$ (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15 Δοκιμασία αντοχής για DTAC 1wt.% σε 25V AC

Στη δημοσίευση [18] για 25 V AC τάση και σταγόνα SDS 1wt.% προέκυψαν τα παρακάτω παρόμοια αποτελέσματα (Σχήμα 4.16)



Σχήμα 4.16 Δοκιμασία αντοχής για SDS 1wt.% σε 25V AC [18]

Τόσο η δοκιμασία αντοχής σε SDS όσο και σε DTAC δεν εμφάνισε ηλεκτρόλυση στην πρώτη 1h των πειραμάτων για AC τάση (ενδεχομένως η εφαρμογή AC τάσης να είναι πιο ήπια δοκιμασία σε σχέση με την εφαρμογή DC τάσης).

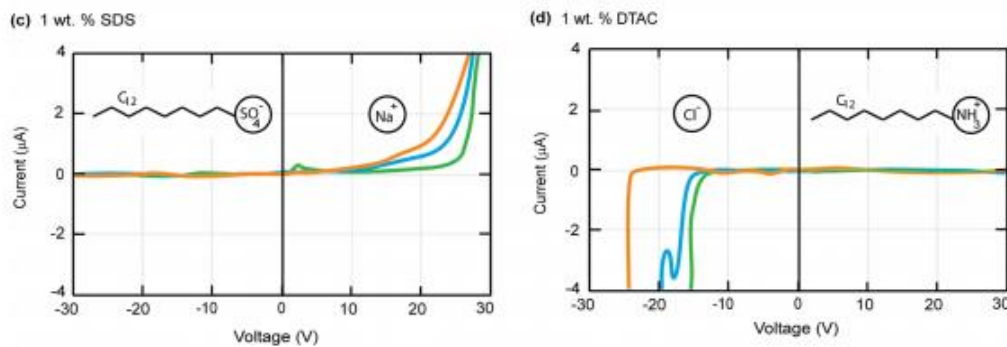
Τα πειράματα με σταγόνες DTAC και SDS στη δημοσίευση [21] δείχνουν τον καθοριστικό ρόλο του μεγέθους των ιόντων στην κατάρρευση του διηλεκτρικού και συμφωνούν με τα πειράματα που πραγματοποιήσαμε. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι σε αρνητική πόλωση το μικρό μέγεθος του αρνητικού ιόντος του DTAC (Cl⁻) οδηγεί σε διηλεκτρική κατάρρευση του διηλεκτρικού και αντίστοιχα σε θετική πόλωση το μικρό μέγεθος του θετικού ιόντος του SDS (Na⁺) οδηγεί σε διηλεκτρική κατάρρευση. Αναλόγως, όταν στην διεπιφάνεια αγωγίμου υγρού-δωδεκανίου υπάρχουν μεγάλα σε μέγεθος ιόντα (με την προσθήκη τασιενεργού υγρού), σε σχέση με το είδος της πόλωσης μπορεί να ενδεχομένως μπορεί να ελλατωθεί η πιθανότητα κατάρρευσης του διηλεκτρικού.

Κεφάλαιο 5: Μέτρηση ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό

5.1 Εισαγωγή-Σκοπός των πειραματικών μετρήσεων

Σκοπός των πειραμάτων είναι να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους των ιόντων των υπό εξέταση υγρών (SDS και DTAC) στην κατάρρευση ή μη του διηλεκτρικού με μέτρησεις του ρεύματος που διαρρέει από το διηλεκτρικό. Στη δημοσίευση των Parathanasiou et al. [28] πραγματοποιήθηκαν πειράματα ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό που έδειξαν ενδεχόμενη σύνδεση του κορεσμού της γωνίας επαφής με την κατάρρευση του διηλεκτρικού. Πιο συγκεκριμένα, όταν η εφαρμοζόμενη τάση υπερβεί την τάση κορεσμού τότε παρατηρείται σημαντική αύξηση του ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό.

Ο Raj et al. [21] έδειξε ότι σε για εφαρμοζόμενη τάση -DC το μικρό μέγεθος του αρνητικού ιόντος του DTAC (δηλ. Cl^-) εισχωρεί ευκολότερα προκαλώντας αύξηση του ρεύματος διαρροής και κατάρρευση του διηλεκτρικού. Αντίστοιχα για εφαρμοζόμενη τάση +DC το μικρό μέγεθος του θετικού ιόντος του SDS (δηλ. Na^+) οδηγεί σε κατάρρευση του διηλεκτρικού (σχήμα 5.1)



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (Raj et al. 2009)

5.2 Πειράματα ρευμάτων διαρροής απο το διηλεκτρικό

Για την επιβεβαίωση της σημασίας του μεγέθους των ιόντων στην κατάρρευση του διηλεκτρικού πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ρευμάτων διαρροής σε περιβάλλον μέσο αέρα στην εξής διηλεκτρική δομή: ~339 nm TEOS κυρίως διηλεκτρικό και ~62nm «σύνθετης επίστρωσης»:

- A. Μέτρηση ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό για +DC εφαρμοζόμενη τάση σε σταγόνες υγρών 1 wt. % SDS, 1wt. % DTAC (διαλυμένα σε DI)
- B. Μέτρηση ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό για -DC εφαρμοζόμενη τάση σε σταγόνες υγρών 1 wt. % SDS, 1wt. % DTAC (διαλυμένα σε DI)

5.2.1 Μέτρηση ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό για +DC εφαρμοζόμενη τάση

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι η ακόλουθη: αυξάνουμε βηματικά την εφαρμοζόμενη τάση, με βήμα 5V έως ~1.4V_s (οι μετρήσεις σταματούν όταν η ένδειξη του ρεύματος διαρροής ξεπεράσει τα 200nA που είναι το όριο που έχουμε οι ίδιοι ορίσει σαν μέγιστο, γιατί συχνά για ρεύμα διαρροής μεγαλύτερο από 200nA παρατηρούμε ηλεκτρόλυση στο δείγμα). Παρότι το σχήμα της σταγόνας και κατ' επέκταση η γωνία επαφής αποκρίνονται άμεσα σε κάθε αλλαγή της τάσης, το ρεύμα που καταγράφεται σταθεροποιείται με την πάροδο περίπου περίπου ενός λεπτού. Η απόκριση του ρεύματος στην αύξηση της τάσης αποκτά σχεδόν την μορφή βηματικής συνάρτησης.

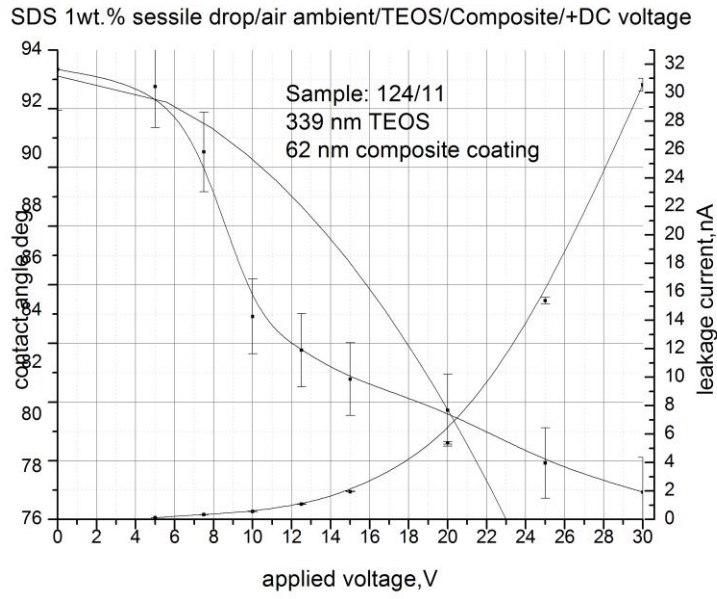
Διαγράμματα ρευμάτων διαρροής συναρτήσει του χρόνου αλλά και διαγράμματα γωνίας επαφής και ρεύματος διαρροής συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης δίνονται παρακάτω για σταγόνες SDS και DTAC για επιβολή +DC τάσης. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε μόνο DC τάση για τα πειράματα οφείλεται στο ότι το

συνεχές ρεύμα είναι πιο «απαιτητική» δοκιμασία αντοχής του διηλεκτρικού απ' ότι το εναλλασσόμενο ρεύμα.

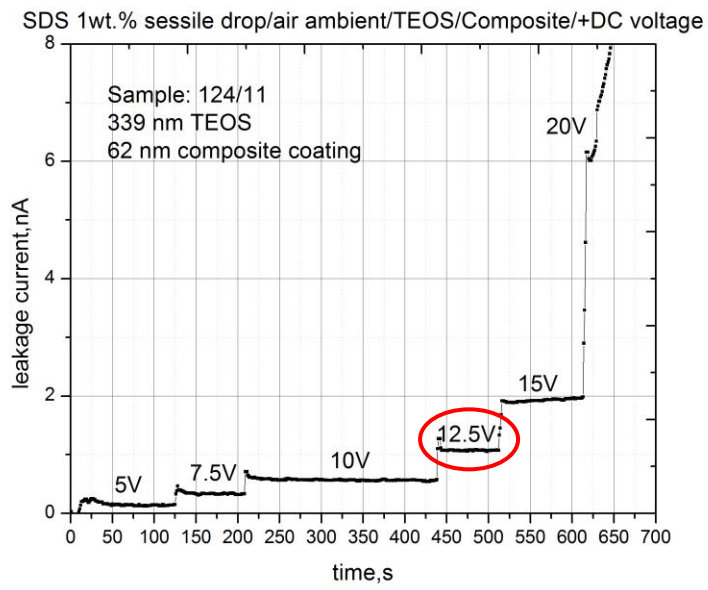
Το Σχήμα 5.3 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα για σταγόνα SDS (η επιφανειακή τάση του διαλύματος υπολογίστηκε ίση με ~ 0.067 N/m βλ. Παράγραφο 3.5). Στο Σχήμα 5.3.α βλέπουμε το διάγραμμα γωνίας επαφής- ρευματος διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης ($\theta_Y \sim 93^\circ$ $\theta_s \sim 78^\circ$, $V_s \sim 22$ V). Από το διάγραμμα παρατηρείται ραγδαία αύξηση του ρεύματος από ~ 19 V, κάτι το οποίο αποτελεί ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης. Η τιμή αυτή είναι κοντά στην τιμή της τάσης κορεσμού επιβεβαιώνοντας την συσχέτιση κορεσμού της γωνίας επαφής και κατάρρευσης του διηλεκτρικού [28]

Στο Σχήμα 5.3.β παρατηρούμε την απόκριση του ρευματος διαρροής σε βηματική αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Για εφαρμοζόμενες τάσεις μεταξύ 0-20V η απόκριση του ρεύματος στην αύξηση της τάσης έχει σχεδόν την μορφή βηματικής συνάρτησης, δηλ. η απόκριση του ρεύματος δεν εμφανίζει ισχυρές διακυμάνσεις υπο σταθερή τάση. Επίσης, προηγούμενη έρευνα έχει δείξει ότι η απόκριση του ρεύματος διαρροής είναι ανεξάρτητη από το πάχος του φθορανθρακικού υμενίου στο εύρος τιμών 15-60 nm (έγινε επικάλυψη με φθορανθρακικό υμένιο με πάχος 15, 30 και 60 nm για ιδίου τύπου κυρίως διηλεκτικό) [18]. Εν συνεχεία, για εφαρμοζόμενες τάσεις μεγαλύτερες από 20V παρατηρούμε ραγδαία αύξηση του ρεύματος διαρροής υπό σταθερή τάση, που αποτελεί ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης.

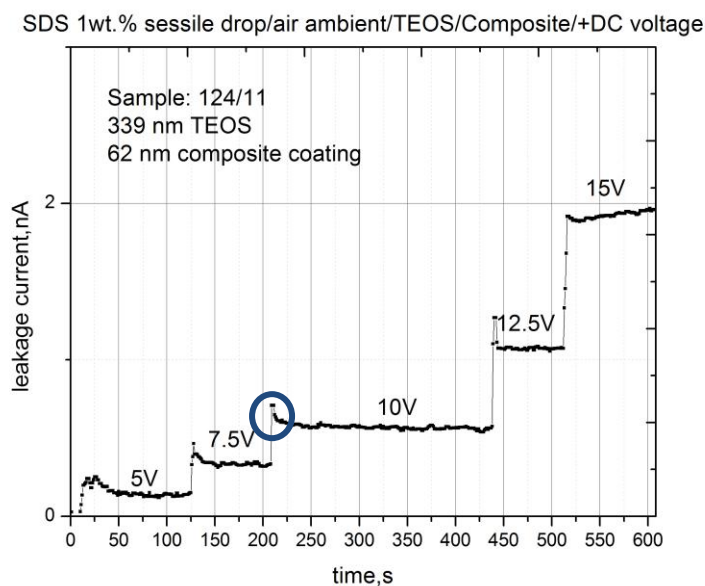
Στο Σχήμα 5.3.γ παρατηρούμε ότι στην κατά την βηματική αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης το ρεύμα διαρροής έχει λίγο μεγαλύτερη τιμή από αυτή που λαμβάνει όταν σταθεροποιείται η τάση (overshoot) (βλ Σχήμα 5.3.γ μπλέ κύκλος). Το προηγούμενο ενδεχομένως να οφείλεται στην φόρτιση του πυκνωτή (έχουμε θεωρήσει ότι το σύστημα αγωγίμη σταγόνα-διηλεκτρική δομή-ηλεκτρόδιο μπορεί να μελετηθεί ως πυκνωτής παραλλήλων πλακών Βλ. Παραγραφο 2.4)



α



β



Σχήμα 5.3 : Σταγόνα 1wt.% SDS, +DC εφαρμοζόμενη τάση (α) διάγραμμα γωνίας επαφής, ρεύματος - διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης για (β) διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης και (γ) μεγέθυνση του διαγράμματος ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό όπου είναι πιο ευδιάκριτες οι εφαρμοζόμενες τάσεις (0-15V)

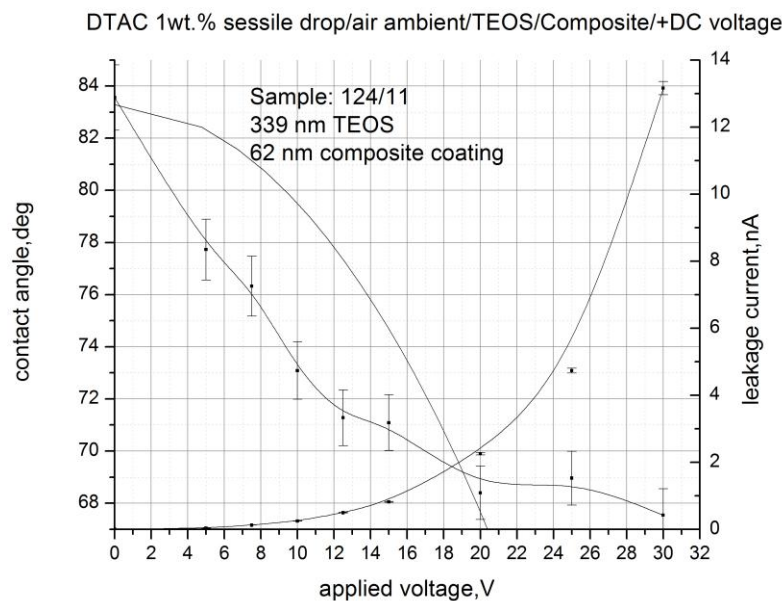
Το Σχήμα 5.4 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα για σταγόνα 1 wt.% DTAC (η επιφανειακή τάση του διαλύματος υπολογίστηκε ίση με ~ 0.033 N/m βλ. Παράγραφο 3.5). Στο Σχήμα 5.4.α βλέπουμε το διάγραμμα γωνίας επαφής- ρευματος διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης ($\theta_Y \sim 83^\circ$ $\theta_s \sim 69^\circ$, $V_s \sim 18V$). Από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 5.4.α) παρατηρείται αύξηση του ρεύματος διαρροής από $\sim 17V$ που αποτελεί ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης Η τιμή εφαρμοζόμενης τάσης των $\sim 17V$ είναι κοντά στην τιμή της τάσης κορεσμού επιβεβαιώνοντας την συσχέτιση κορεσμού της γωνίας επαφής και της κατάρρευσης του διηλεκτρικού όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και για σταγόνα SDS.

Στο Σχήμα 5.4.β παρατηρούμε την απόκριση του ρευματος διαρροής σε βηματική αύξηση της τάσης. Για εφαρμοζόμενες τάσεις μεταξύ 0-20V η απόκριση του ρεύματος στην αύξηση της τάσης έχει σχεδόν την μορφή βηματικής συνάρτησης

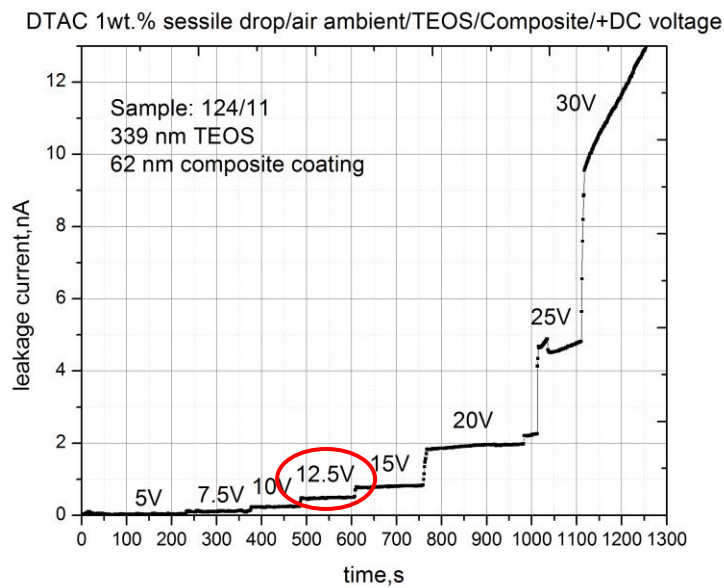
(ομοίως με την σταγόνα SDS). Για εφαρμοζόμενες τάσεις μεγαλύτερες από ~25V παρατηρούμε ραγδαία αύξηση του ρεύματος διαρροής υπό σταθερή τάση.

Στο Σχ. 5.4.γ δεν παρατηρήθηκε «overshoot» της τάσης κατά την φόρτιση του πυκνωτή όπως στην σταγόνα του SDS. Ενδεχομένως στην σταγόνα DTAC, για εφαρμοζόμενη +DC τάση, οι μηχανισμοί παγίδευσης και αποδέσμευσης φορτίων στο σώμα ή στην διεπιφάνεια των επιμέρους διηλεκτρικών στρωμάτων να μην ευνοούνται. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται από επαναληπτικές μετρήσεις του ρεύματος διαρροής όπως παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

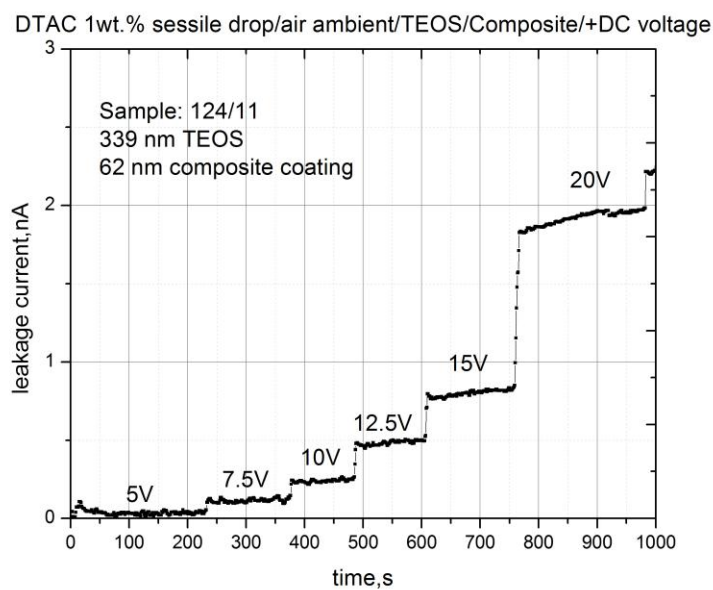
Τέλος, η απόκριση του ρεύματος διαρροής της σταγόνας DTAC όσον αφορά στην διακύμανση που εμφανίζει, είναι πανομοιότυπη με την διακύμανση της σταγόνας SDS. (βλ. ενδεικτικούς κόκκινους κύκλους στα διαγράμματα Σχ 5.3.β και Σχ 5.4.β)



α



β



γ

Σχήμα 5.4 : Σταγόνα 1wt.% DTAC, +DC εφαρμοζόμενη τάση (α) διάγραμμα γωνίας επαφής, ρεύματος - διαρροής συναρτήσε της εφαρμοζόμενης τάσης για (β) διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσε της εφαρμοζόμενης τάσης και (γ) μεγέθυνση του διάγραμματος ρεύματος διαρροής απο το διηλεκτρικό όπου είναι πιο ευδιάκριτες οι εφαρμοζόμενες τάσεις (0-20V)

V nA	5V	7.5V	10V	12.5V	15V	20V	25V	30V
SDS 1wt.%	0.130	0.336	0.558	1.075	1.953	5.382	15.381	30.562
DTAC 1wt.%	0.032	0.125	0.245	0.495	0.819	2.252	4.733	13.159

Πίνακας 7: Ρεύματα διαρροής για SDS και DTAC σε βηματική μεταβολή της τάσης (+DC). Οι τιμές των ρευμάτων που αναφέρονται στον πίνακα προκύπτουν από το Μ.Ο. τεσσάρων επαναληπτικών πειραμάτων

Παρατηρήσεις

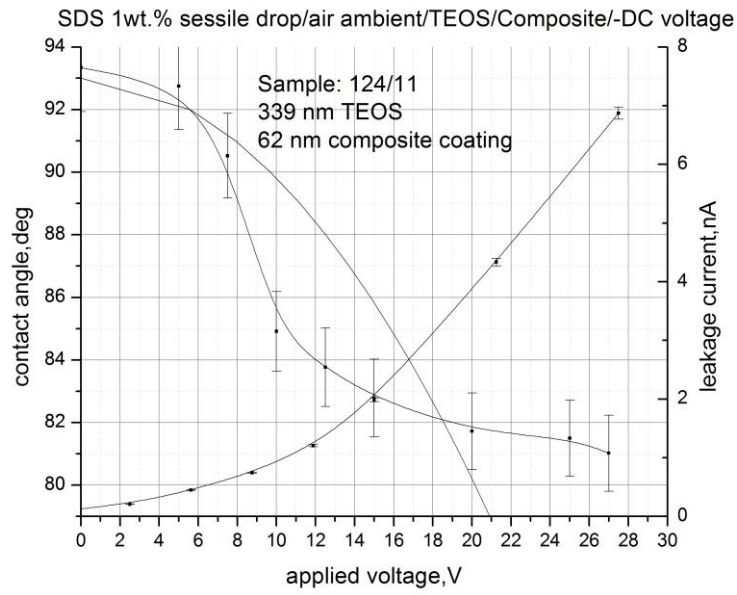
Για εφαρμοζόμενες τάσεις μέχρι $\sim V_s$, παρατηρείται μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής (κατ' απόλυτη τιμή) στο SDS το οποίο είναι σχεδόν διπλάσιο σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το DTAC (πίνακας 7). Για εφαρμοζόμενες τάσεις μετά το σημείο κορεσμού, από 20-25V αυτή η διαφορά στις απόλυτες τιμές του ρεύματος διαρροής γίνεται δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το μικρό ιόν Na^+ του SDS μπορεί εύκολα να διεισδύσει στο διηλεκτρικό υπό την επιβολή θετικής τάσης. Το θετικό ιόν του DTAC, καθώς είναι πολύ μεγαλύτερο, δεν μπορεί πολύ εύκολα να διεισδύσει στους πόρους/ ατέλειες της διηλεκτρικής δομής (κεφάλαιο 3.4).

5.2.2 Μέτρηση ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό για -DC εφαρμοζόμενη τάση

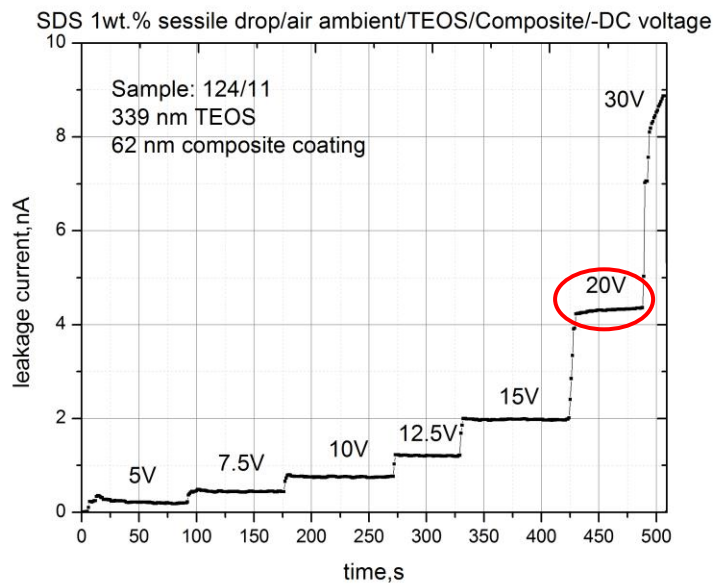
Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι η ίδια με αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 5.2.2.A : αυξάνουμε βηματικά την εφαρμοζόμενη τάση, με βήμα 5V έως $\sim 1.4V_s$. Η απόκριση του ρεύματος στην αύξηση της τάσης αποκτά σχεδόν την μορφή βηματικής συνάρτησης. Διαγράμματα ρευμάτων διαρροής συναρτήσει του χρόνου αλλά και διαγράμματα γωνίας επαφής και ρεύματος διαρροής συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης δίνονται παρακάτω για σταγόνες SDS και DTAC και επιβολή -DC τάσης (σχήμα 5.5 και 5.6)

Το Σχήμα 5.5 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα για σταγόνα 1 wt.% SDS. Στο Σχήμα 5.5.α βλέπουμε το διάγραμμα γωνίας επαφής- ρεύματος διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης ($\theta_g \sim 93^\circ$ $\theta_s \sim 82^\circ$, $V_s \sim 15V$). Από το διάγραμμα παρατηρείται ραγδαία αύξηση του ρεύματος από $\sim 16V$ που αποτελεί ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης. Η τιμή αυτή είναι κοντά στην τιμή της τάσης κορεσμού επιβεβαιώνοντας την συσχέτιση κορεσμού της γωνίας επαφής και κατάρρευσης του διηλεκτρικού [28]

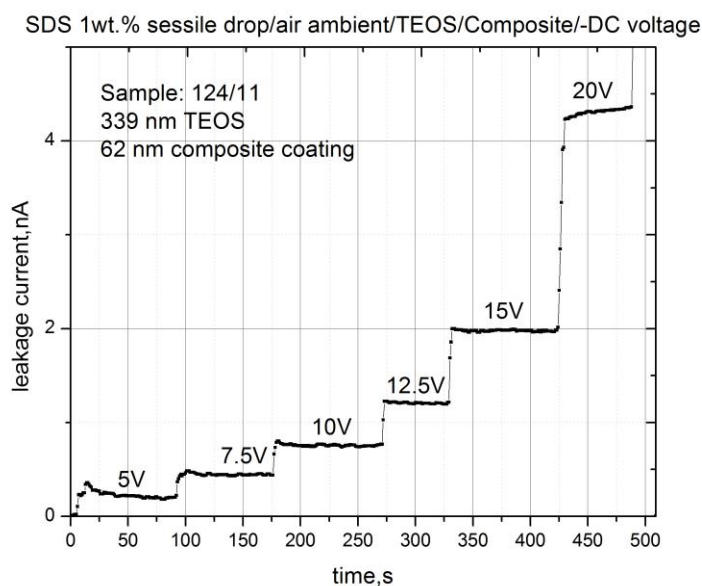
Στο Σχήμα 5.5.β παρατηρούμε την απόκριση του ρεύματος διαρροής σε βηματική αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Για εφαρμοζόμενες τάσεις μεταξύ 0-20V η απόκριση του ρεύματος στην αύξηση της τάσης έχει σχεδόν την μορφή βηματικής συνάρτησης. Εν συνεχεία, για εφαρμοζόμενες τάσεις μεγαλύτερες από 20V παρατηρούμε ραγδαία αύξηση του ρεύματος διαρροής υπό σταθερή τάση. Στο Σχ. 5.5.γ παρατηρούμε ότι στην κατά την βηματική αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης το ρεύμα διαρροής δεν παρουσιάζει «overshoot» όπως είχε παρατηρηθεί στο Σχήμα 5.3.γ (μπλέ κύκλος).



α



β



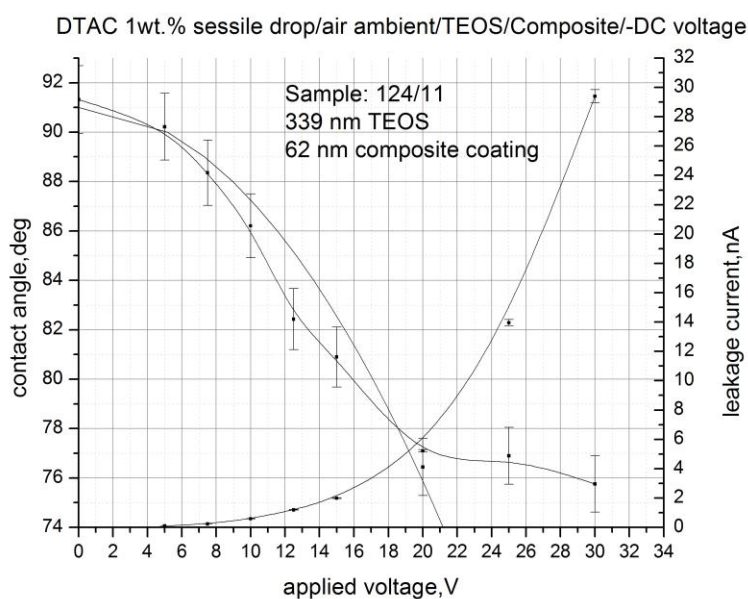
γ

Εικόνα 5.5 : Σταγόνα 1wt.% SDS, -DC εφαρμοζόμενη τάση (α) διάγραμμα γωνίας επαφής, ρεύματος - διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης για (β) διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης και (γ) μεγέθυνση του διαγράμματος ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό όπου είναι πιο ευδιάκριτες οι εφαρμοζόμενες τάσεις (0-20V)

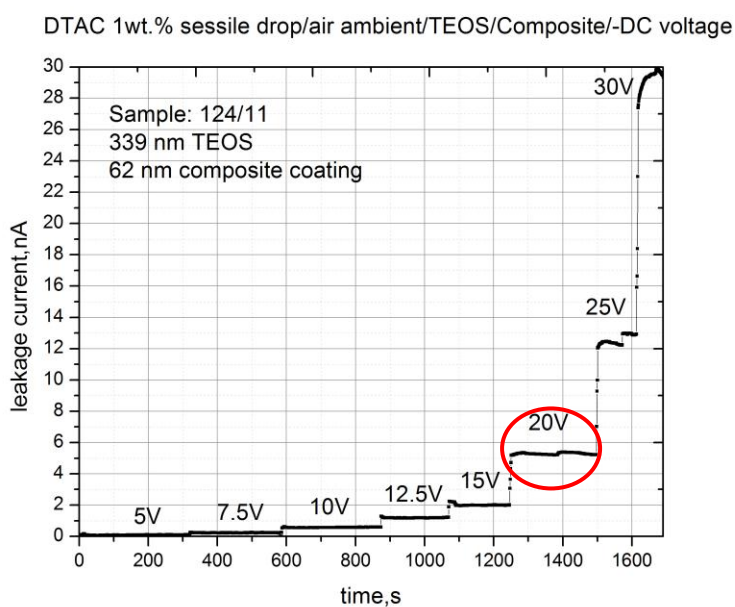
Το Σχήμα 5.6 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα για σταγόνα 1wt.% DTAC. Στο Σχήμα 5.6.α βλέπουμε το διάγραμμα γωνίας επαφής- ρευματος διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης ($\theta_Y \sim 91^\circ$, $\theta_s \sim 77^\circ$, $V_s \sim 20V$). Από το διάγραμμα (βλ. Σχήμα 5.6.α) παρατηρείται αύξηση του ρεύματος διαρροής από ~19V που αποτελεί ένδειξη διηλεκτρικής κατάρρευσης. Η τιμή εφαρμοζόμενης τάσης των ~19V είναι κοντά στην τιμή της τάσης κορεσμού επιβεβαιώνοντας την συσχέτιση κορεσμού της γωνίας επαφής και της κατάρρευσης του διηλεκτρικού όπως ακριβώς παρατηρήθηκε και για σταγόνα SDS.

Στο Σχήμα 5.6.β παρατηρούμε την απόκριση του ρευματος διαρροής σε βηματική αύξηση της τάσης. Για εφαρμοζόμενες τάσεις μεταξύ 0-20V η απόκριση του ρεύματος στην αύξηση της τάσης έχει σχεδόν την μορφή βηματικής συνάρτησης (ομοίως με σταγόνα SDS).

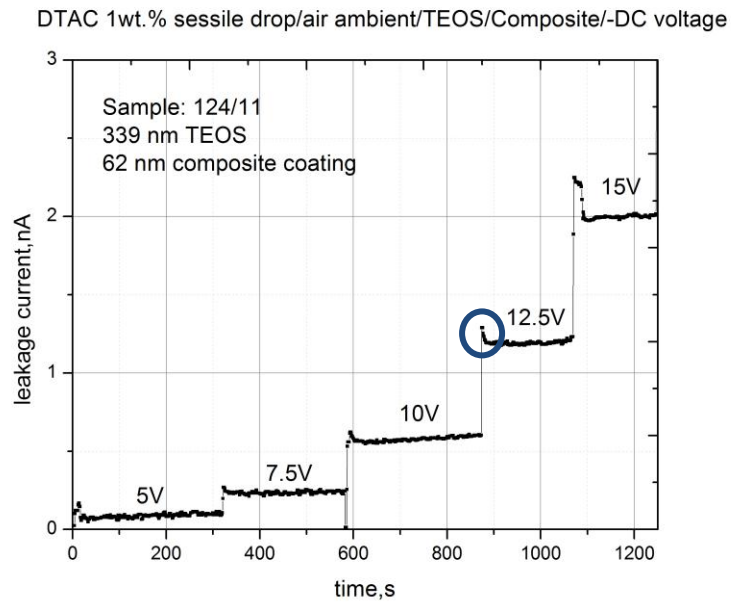
Στο Σχ. 5.6.γ παρατηρήθηκε «overshoot» της τάσης (βλ. Σχήμα 5.6.γ μπλέ κύκλος) κατά την φόρτιση του πυκνωτή όπως στην σταγόνα του SDS (για +DC τάση, βλ. Σχ 5.3.γ) που ενδεχομένως οφείλεται σε μηχανισμούς παγίδευσης και αποδέσμευσης φορτίων όπως και προηγουμένως. Τέλος, η απόκριση του ρεύματος διαρροής της σταγόνας DTAC παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με αυτή του SDS καθώς η αύξηση του ρεύματος διαρροής είναι αξιοσημείωτη μετά τα 15 V (Σχήμα 5.5.β και 5.6.β κόκκινος κύκλος)



α



β



γ

Εικόνα 5.6 : Σταγόνα 1wt.% DTAC, -DC εφαρμοζόμενη τάση (α) διάγραμμα γωνίας επαφής, ρεύματος - διαρροής συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης για (β) Διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης και (γ) μεγέθυνση του διαγράμματος ρεύματος διαρροής απο το διηλεκτρικό όπου είναι πιο ευδιάκριτες οι εφαρμοζόμενες τάσεις (0-15V)

V	5V	7.5V	10V	12.5V	15V	20V	25V	30V
nA								
SDS 1wt.%	0.209	0.450	0.745	1.206	1.984	4.335	6.873	-
DTAC 1wt.%	0.098	0.238	0.587	1.189	1.992	5.225	13.961	29.397

Πίνακας 8: Ρεύματα διαρροής για SDS και DTAC σε βηματική μεταβολή της τάσης (-DC). Οι τιμές των ρευμάτων που αναφέρονται στον πίνακα προκύπτουν απο το Μ.Ο. τεσσάρων επαναληπτικών πειραμάτων

Παρατηρήσεις

Για τάσεις μέχρι το σημείο του κορεσμού, V_s , παρατηρείται μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής (κατ απόλυτη τιμή) στο SDS σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις του ρεύματος διαρροής για το DTAC. Αυτό αντιστρέφεται για τάσεις μετά το σημείο κορεσμού, όπου το DTAC έχει μεγαλύτερα ρεύματα διαρροής σε σχέση με το SDS (πίνακας 8). Συγκεκριμένα, μετά τα 20-25V αυτή η διαφορά στις απόλυτες τιμές του ρεύματος διαρροής γίνεται απο δύο εώς τρεις φορές μεγαλύτερη στην σταγόνα του DTAC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε πειραματική διερεύνηση διαφόρων συστημάτων ηλεκτροδιαβροχής σε διηλεκτρικά. Αρχικά, έγιναν πειράματα με επικαθήμενες σταγόνες. Από τα πειράματα αυτά προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

1. Η εφαρμογή τάσης μεταξύ του επίπεδου ηλεκτροδίου και του ηλεκτροδίου που είναι βυθισμένο στη σταγόνα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φαινόμενης γωνίας επαφής της σταγόνας με το διηλεκτρικό. Σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, το φαινόμενο της ηλεκτροδιαβροχής περιορίστηκε από το φαινόμενο κορεσμού της γωνίας επαφής.
2. Το φαινόμενο του κορεσμού της γωνίας επαφής επηρεάζεται από την επιφανειακή τάση της υπο εξέταση σταγόνας. Σύμφωνα με την εξίσωση Lippmann όσο μεγαλύτερη είναι η επιφανειακή τάση τόσο πιο μικρή είναι η διαφορά ανάμεσα στην αρχική γωνία που καταγράφεται πριν την επιβολή της τάσης και της γωνίας επαφής μετά την επιβολή καθορισμένης τάσης. Γι'αυτό είναι προτιμότερο γενικά να χρησιμοποιούνται υγρά τα οποία έχουν μικρή επιφανειακή τάση (όπως το DTAC) ώστε να επιτυγχάνεται με την ίδια εφαρμογή τάσης μεγαλύτερη μεταβολή της γωνίας επαφής της σταγόνας.
3. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει στο πείραμα ηλεκτροδιαβροχής για την μελέτη της υστέρησης, η αναστροφή του βρόγχου υστέρησης για τιμές πέρα από την τάση κορεσμού. Συγκεκριμένα, κατά τη μέτρηση της γωνίας επαφής από τα 60V μέχρι τον μηδενισμό (αντίστροφα δηλαδή), καταγράφονται, τόσο για το SDS όσο και για το DTAC, μικρότερες γωνίες επαφής από τις αντίστοιχες για μεταβολή της τάσης από 0V-60V. Παρατηρείται ακόμα ότι ο βρόγχος αυτός καταλήγει σε γωνία επαφής μικρότερη από την αρχική που καταγράψαμε από 0V-60V (υστέρηση στην ηλεκτροδιαβροχή).
4. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με σταγόνες DTAC και SDS δείχνουν, σε συμφωνία με αντίστοιχα στη βιβλιογραφία, τον καθοριστικό ρόλο του μεγέθους των ιόντων στην κατάρρευση του διηλεκτρικού. Συνεπώς,

υποστηρίζεται το συμπέρασμα ότι σε αρνητική πόλωση το μικρό μέγεθος του αρνητικού ιόντος του DTAC (Cl^-) οδηγεί σε διηλεκτρική κατάρρευση του διηλεκτρικού και αντίστοιχα σε θετική πόλωση το μικρό μέγεθος του θετικού ιόντος του SDS (Na^+) οδηγεί σε διηλεκτρική κατάρρευση. Σημαντικό συμπέρασμα είναι επίσης το ακόλουθο: για θετική πόλωση, υπάρχουν στο διάλυμα ευκίνητα ιόντα Na^+ (το DTAC είναι διαλυμένο σε NaCl 0.1M) τα οποία λόγω του μικρού τους μεγέθους θα μπορούσαν να θεωρηθούν υπεύθυνα για διηλεκτρική κατάρρευση. Ωστόσο φαίνεται να παίζει σημαντικότερο ρόλο το μεγάλο θετικό ιόν του DTAC. Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και σε αρνητική πόλωση. Επομένως, προκύπτει ότι είναι πιθανό να παίζουν σημαντικότερο ρόλο τα ιόντα που είναι *συγκεντρωμένα στην διεπιφάνεια υγρού-δωδεκανίου* ($\text{C}_{12}\text{NH}_3^+$) αφού καθορίζουν φαινομενικά την ανθεκτικότητα ή μη της διηλεκτρικής δομής σε σχέση με την τάση πόλωσης.

Στη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα μέτρησης ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό. Από τα πειράματα αυτά προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

1. Η αύξηση του ρεύματος για τάσεις από 0V μέχρι την τάση κορεσμού, έχει τη μορφή βηματικής συνάρτησης. Ωστόσο για τιμές της τάσης μετά από αυτήν του κορεσμού σημειώνεται ραγδαία αύξηση του ρεύματος, που υποδεικνύει διηλεκτρική κατάρρευση. Με τα πειράματα αυτά επιβεβαιώνεται η συσχέτιση μεταξύ κορεσμού της γωνίας επαφής και κατάρρευσης του διηλεκτρικού.
2. Σε επιβολή θετικής τάσης DC και μέχρι $\sim V_s$, παρατηρείται μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής (κατ' απόλυτη τιμή) στο SDS το οποίο είναι σχεδόν διπλάσιο σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το DTAC. Για εφαρμοζόμενες τάσεις μετά το σημείο κορεσμού, αυτή η διαφορά στις απόλυτες τιμές του ρεύματος διαρροής γίνεται δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το μικρό ιόν Na^+ του SDS μπορεί εύκολα να διεισδύσει στο διηλεκτρικό με την επιβολή θετικής τάσης. Το θετικό ιόν του DTAC, καθώς είναι πολύ μεγαλύτερο,

δεν μπορεί εύκολα να διεισδύσει στους πόρους/ ατέλειες της διηλεκτρικής δομής.

3. Για αρνητική τάση DC και για τάσεις μέχρι το σημείο του κορεσμού, V_s , παρατηρείται μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής (κατ' απόλυτη τιμή) στο SDS απ' ότι στο DTAC. Αυτό αντιστρέφεται για τάσεις μετά το σημείο κορεσμού, όπου το DTAC έχει μεγαλύτερα ρεύματα διαρροής σε σχέση με το SDS. Συγκεκριμένα, μετά τα 20-25V αυτή η διαφορά στις απόλυτες τιμές του ρεύματος διαρροής γίνεται απο δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη στην σταγόνα του DTAC. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι το μικρό αρνητικό ιόν του DTAC Cl^- μπορεί εύκολα να διεισδύσει στο διηλεκτρικό υπο την επιβολή αρνητικής τάσης σε αντίθεση με το μεγάλο αρνητικό ιόν του SDS.
4. Με επιβολή θετικής DC τάσης στο SDS, παρατηρείται ότι κατά τη βηματική αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης το ρεύμα διαρροής έχει λίγο μεγαλύτερη τιμή από αυτή που λαμβάνει όταν σταθεροποιείται η τάση (υπέρβαση). Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην φόρτιση του πυκνωτή δηλαδή του συστήματος αγωγίμη σταγόνα-διηλεκτρική δομή-ηλεκτρόδιο). Ωστόσο στο αντίστοιχο πείραμα σε DTAC δεν παρατηρήθηκε υπέρβαση της τάσης κατά την φόρτιση του πυκνωτή όπως στην σταγόνα του SDS. Ενδεχομένως στην σταγόνα DTAC, για εφαρμοζόμενη +DC τάση, οι μηχανισμοί παγίδευσης και αποδέσμευσης φορτίων στο σώμα ή στην διεπιφάνεια των επιμέρους διηλεκτρικών στρωμάτων να μην ευνοούνται.
5. Για αρνητική DC τάση παρουσιάστηκε το αντίθετο αποτέλεσμα απ' ότι παραπάνω. Η υπέρβαση της τάσης παρατηρήθηκε στη σταγόνα του DTAC ενώ δεν παρατηρήθηκε στο SDS.

Ερευνα σε εξέλιξη

- Διεξαγωγή πειραμάτων με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του είδους (SiO_2 , SiN_4 , οργανικά) του υλικού του κυρίως διηλεκτρικού στην απόκριση του ρεύματος διαρροής σε αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης.
- Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των διηλεκτρικών δομών που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ηλεκτροδιαβροχής για διερεύνηση κατάρρευσης και, κατ' επέκταση του κορεσμού της γωνίας επαφής με αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης.
- Πειράματα ηλεκτροδιαβροχής με περιβάλλοντα υγρά (αντί δωδεκανίου) υψηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς με σκοπό τον προσδιορισμό της επίδρασης του περιβάλλοντος μέσου στον κορεσμό της γωνίας επαφής μέσω πειραμάτων μέτρησης ρευμάτων διαρροής από το διηλεκτρικό και μέσω προσομοιώσεων. Σχετική είναι η ακόλουθη δημοσίευση: **D. P. Papageorgiou, N. Chamakos, A. Syrigou and A. G. Papathanasiou** “**Effect of the surrounding medium on the contact angle saturation: leakage current measurements and simulations.**” **Poster Presentation in the 8th International Meeting on ELECTROWETTING – Athens, Greece, 21-23 June 2012.**

Βιβλιογραφία

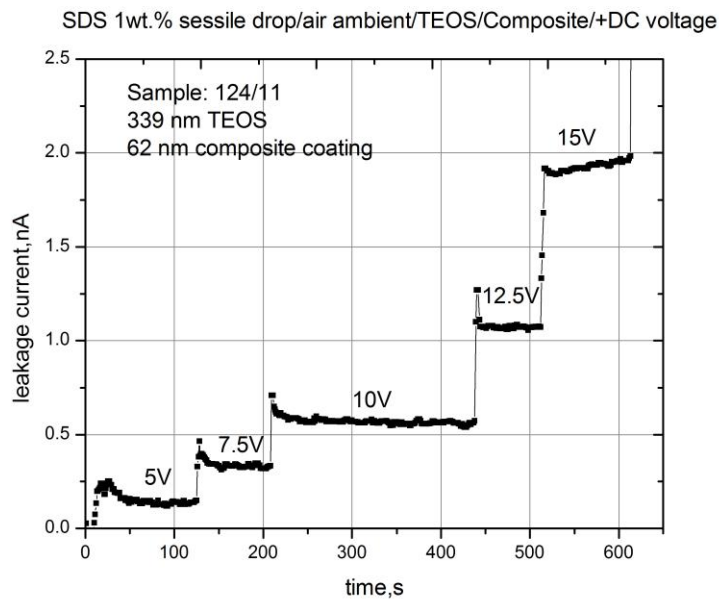
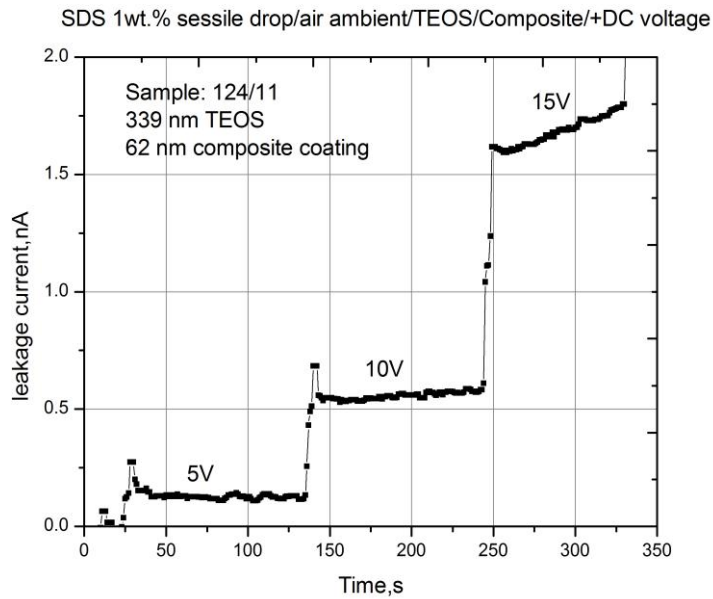
- [1] R. Shamaï, D. Andelman, B. Berge, and R. Hayes, “Water, electricity, and between... On electrowetting and its applications,” *Soft Matter*, vol. 4, no. 1, p. 38, 2008.
- [2] Μπαγιάτη Πηνελόπη, “Κατεργασία και τροποποίηση πολυμερικών υλικών για την κατασκευή και ενεργοποίηση με ηλεκτροδιαβροχή μικρορευστομηχανικών διατάξεων,” 2007.
- [3] H. J. J. Verheijen and M. W. J. Prins, “Reversible Electrowetting and Trapping of Charge :,” pp. 6616–6620, 1999.
- [4] A. I. Drygiannakis, A. G. Papatasiou, and A. G. Boudouvis, “On the Connection between Dielectric Breakdown Strength , Trapping of Charge , and Contact Angle Saturation in Electrowetting On the Connection between Dielectric Breakdown Strength , Trapping of Charge , and Contact Angle Saturation in Electrowetting,” *Society*, 2009.
- [5] M. Vallet, M. Vallade, and B. Berge, “Limiting phenomena for the spreading of water on polymer films by electrowetting,” *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 583–591, 1999.
- [6] F. Mugele and S. Herminghaus, “Electrostatic stabilization of fluid microstructures,” *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 12, pp. 2303–2305, 2002.
- [7] Αντωνιος Δρυγιαννάκης, “Διερεύνηση φαινομένων αλληλεπίδρασης τριχοειδών και ηλεκτροστατικών δυνάμεων στη μικρό-ρευστομηχανική,” *Διδακτορική διατριβή*, p. -, 2009.
- [8] F. Mugele, A. Klingner, J. Buehrle, D. Steinhauser, and S. Herminghaus, “Electrowetting: a convenient way to switchable wettability patterns,” *Journal of Physics-Condensed Matter*, vol. 17, no. 9, pp. S559–S576, 2005.
- [9] M. Dhindsa, S. Kuiper, and J. Heikenfeld, “Reliable and low-voltage electrowetting on thin parylene films,” *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 10, pp. 3346–3351, 2011.
- [10] F. Mugele and J. C. Baret, “Electrowetting: From basics to applications,” *Journal of Physics-Condensed Matter*, vol. 17, no. 28, pp. R705–R774, 2005.
- [11] J.-Y. Yoon and R. L. Garrell, “Preventing Biomolecular Adsorption in Electrowetting-Based Biofluidic Chips,” *Analytical Chemistry*, vol. 75, no. 19, pp. 5097–5102, Oct. 2003.
- [12] V. K. P. and R. B. F. Vijay Srinivasan, “An integrated digital microfluidic lab-on-a-chip for clinical diagnostics on human physiological fluids.” 2004.
- [13] R. D. Piner, “‘Dip-Pen’ Nanolithography,” *Science*, vol. 283, no. 5402, pp. 661–663, Jan. 1999.

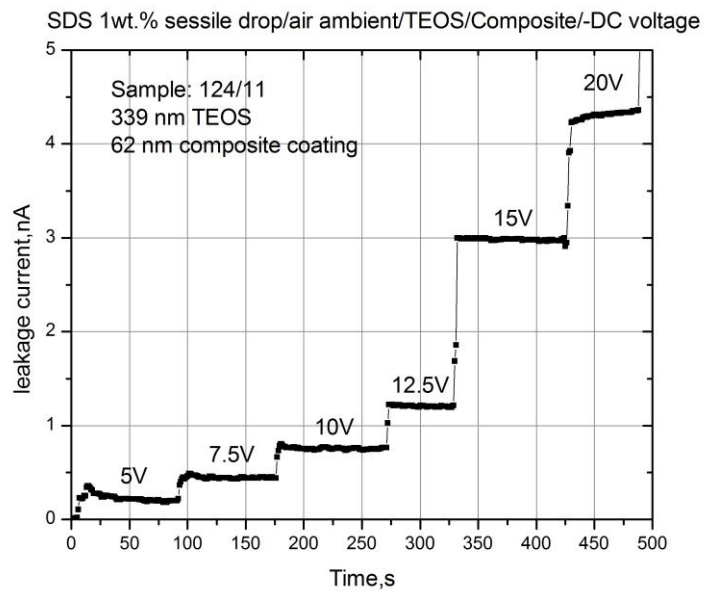
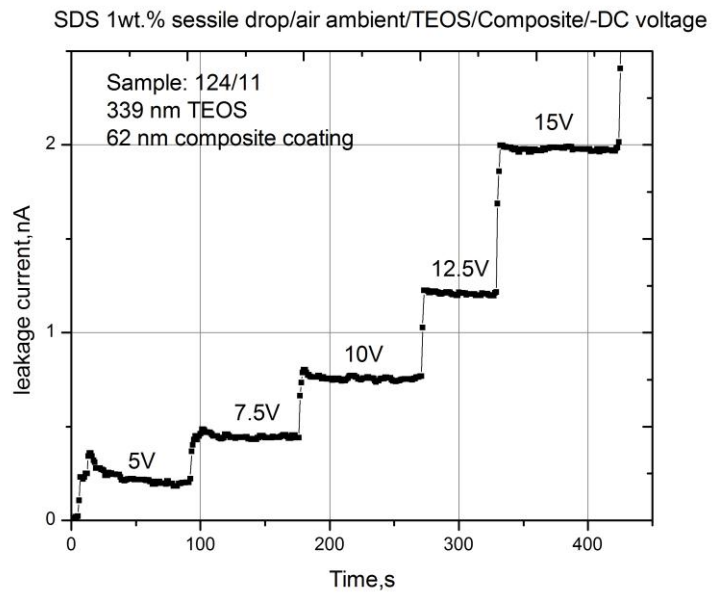
- [14] B. Berge and J. Peseux, “Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting,” *European Physical Journal E*, vol. 3, no. 2, pp. 159–163, 2000.
- [15] T. Krupenkin, S. Yang, and P. Mach, “Tunable liquid microlens,” *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 3, p. 316, 2003.
- [16] S. Kuiper and B. H. W. Hendriks, “Variable-focus liquid lens for miniature cameras,” *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 7, pp. 1128–1130, 2004.
- [17] R. A. Hayes and B. J. Feenstra, “Video-speed electronic paper based on electrowetting,” *Nature*, vol. 425, no. 6956, pp. 383–385, 2003.
- [18] D. P. Papageorgiou, A. Tserepi, A. G. Boudouvis, and A. G. Papathanasiou, “Superior performance of multilayered fluoropolymer films in low voltage electrowetting,” *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011.
- [19] J. C. Baret, “Surfactants in droplet based microfluidics,” *Lab on a Chip*, no. 12, pp. 422–433, 2012.
- [20] O. Raccurt, J. Berthier, P. Clementz, M. Borella, and M. Plissonnier, “On the influence of surfactants in electrowetting systems,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 11, pp. 2217–2223, 2007.
- [21] B. Raj, M. Dhindsa, N. R. Smith, R. Laughlin, and J. Heikenfeld, “Ion and Liquid Dependent Dielectric Failure in Electrowetting Systems,” *Langmuir*, vol. 25, no. 20, pp. 12387–12392, 2009.
- [22] K. Robert Lange, “Surfactants: A practical Handbook.” 1999.
- [23] K. J. M. Pasupati Mukerjee, “Critical Micelle Concentrations of Aqueous Surfactant Systems.” 1971.
- [24] Shaun Berry, “Electrowetting Phenomenon for Microsized Fluidic Devices,” 2008.
- [25] A. G. Banpurkar, K. P. Nichols, and F. Mugele, “Electrowetting-based microdrop tensiometer,” *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 24, no. 19, pp. 10549–51, Oct. 2008.
- [26] Ιωάννης Γ. Λιγνός, “Πειραματική διερεύνηση φαινομένων ηλεκτροδιαβροχής,” 2009.
- [27] H. J. J. Verheijen and M. W. J. Prins, “Reversible Electrowetting and Trapping of Charge: Model and Experiments,” *Langmuir*, vol. 15, no. 20, pp. 6616–6620, 1999.
- [28] A. G. Papathanasiou, A. T. Papaioannou, and A. G. Boudouvis, “Illuminating the connection between contact angle saturation and dielectric breakdown in electrowetting through leakage current measurements,” *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 3, pp. 34901–34904, 2008.

Παράρτημα

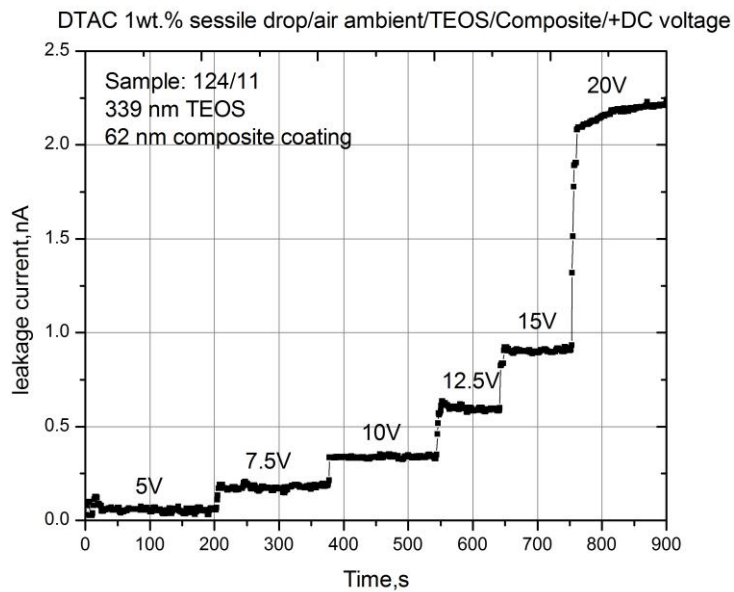
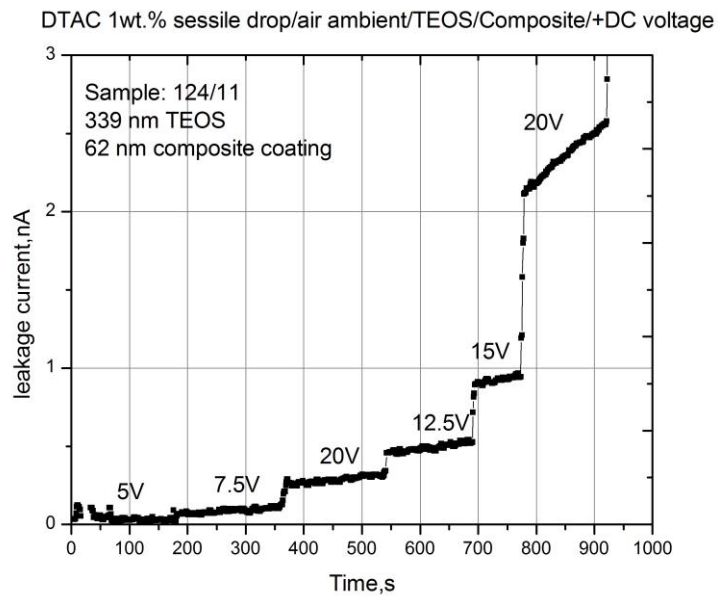
Α. Πειράματα ρευμάτων διαρροής απο το διηλεκτρικό για σταγόνες SDS και DTAC για +DC και -DC τάση (κεφάλαιο 5)

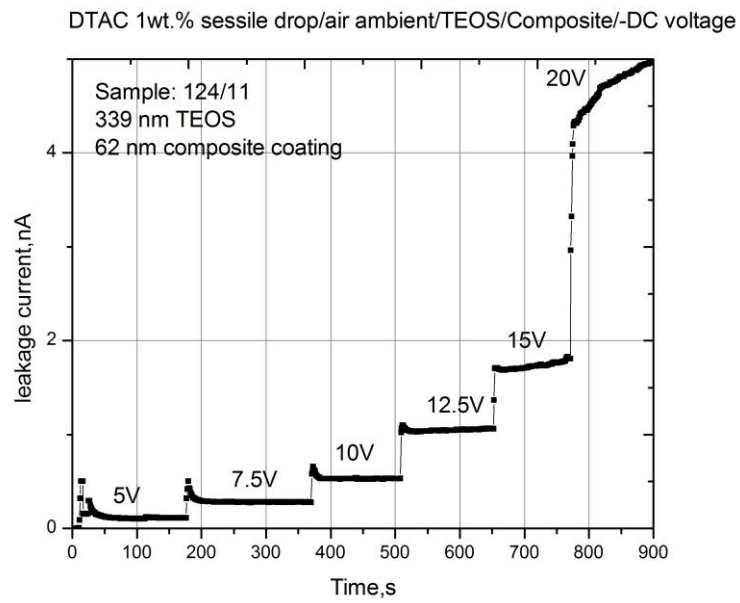
Δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα ρεύματος διαρροής-χρόνου οι επαναληπτικές μετρήσεις που έγιναν για την εξαγωγή των πειραμάτων στο κεφάλαιο 5 και οι οποίες είναι σε συμφωνία με τα συμπεράσματα του κεφαλαίου.





Πίνακας 1 : Σταγόνα 1wt.% SDS, +DC και -DC εφαρμοζόμενη τάση : Διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης





Πίνακας 2 : Σταγόνα 1wt.% DTAC ,+DC και -DC εφαρμοζόμενη τάση : Διάγραμμα ρεύματος διαρροής από το διηλεκτρικό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης