



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΙΚΡΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΙΩΡΓΟΣ ΠΙΣΣΑΝΟΣ

**«ΜΝΗΜΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΤΩΝ ΝΙΤΡΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕ
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΜΕΤΡΙΕΣ»**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΗΣ, ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΕΡΕΥΝΩΝ, ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

:

Ερευνητικός Δημητράκης	Επιβλέπων: Παναγιώτης	Ακαδημαϊκός Τσουκαλάς	Επιβλέπων: Δημήτριος
Ίδρυμα: ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ		Ίδρυμα: ΕΘΝΙΚΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ	ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

[ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΑΚΗΣ, ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΕΡΕΥΝΩΝ, ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ]

[ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΜΦΕ]

[ΙΩΑΝΝΗΣ ΡΑΠΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΕΜΦΕ]

[ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ/2023]

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει τίτλο <<Μνήμες αντιστατών νιτριδίων του πυριτίου με διαφορετικές στοιχειομετρίες>>. Η κατασκευή και ο ηλεκτρικός, οπτικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ».

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον διευθυντή ερευνών Παναγιώτη Δημητράκη για την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας καθώς και για την συνεχή βοήθεια, στήριξη του όπως και τις πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας. Η πραγματοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον βοηθό ερευνών Αλέξανδρο Μαυροπούλη για την πολύ σημαντική βοήθειά του. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κ. Δημήτριο Τσουκαλά, τον κ. Ιωάννη Ράπτη, που δέχτηκαν να συμμετέχουν στην επιτροπή αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, για την συνεχή υποστήριξή τους σε όλο το χρονικό διάστημα των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

..ΓΙΩΡΓΟΣ ΠΙΣΣΑΝΟΣ.....

Όνομα Επώνυμο

© (20XX) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συνεχής πρόοδος της τεχνολογίας έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη όλο και μεγαλύτερου όγκου πληροφορίας. Επομένως αναγκαία είναι και η αποθήκευση της συγκεκριμένης πληροφορίας. Μια σχετικά καινούργια διάταξη με την συγκεκριμένη δυνατότητα είναι οι αντιστάτες μνήμης ή memristor ή ReRAM μνήμες. Στα memristor η πληροφορία αποθηκεύεται σε μορφή αντίστασης καθώς μπορούν, με την εφαρμογή κατάλληλης τιμής και πολικότητας τάσης να εναλλάσσονται μεταξύ τουλάχιστον δυο καταστάσεων (τιμών) αντίστασης, την κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS-High resistance state) και την κατάσταση χαμηλής αντίστασης(LRS-Low resistance state). Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται resistance switching και η εκάστοτε τιμή της αντίστασης μπορεί να διατηρηθεί και χωρίς τροφοδοσία. Γι' αυτό τον λόγο τα memristor ανήκουν στην κατηγορία των λεγόμενων μη-πτητικών μνημών (non-volatile memories). Η δομή των memristor συνήθως αποτελείται από ένα διηλεκτρικό υλικό, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα σε δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια ή ένα μεταλλικό και ένα ημιαγώγιμο ηλεκτρόδιο. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η τεχνολογία SOI (silicon on insulator) στην δομή των memristor, περισσότερα για την δομή τους θα αναλυθούν στα αντίστοιχα κεφάλαια της εργασίας. Κύριο μέλημα της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του διηλεκτρικού υλικού που χρησιμοποιείται στους αντιστάτες, και συγκεκριμένα το νιτρίδιο του πυριτίου (SiN_x). Τα νιτρίδια που μελετήθηκαν παρασκευάστηκαν μέσω της αντίδρασης του διχλωροσιλανίου (SiCl_2H_2) με την αμμωνία (NH_3), με την μέθοδο LPCVD. Ποιο συγκεκριμένα μελετάται η επίδραση της διαφορετικής στοιχειομετρίας του στρώματος νιτρίδιου του πυριτίου των αντιστατών, στις οπτικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες, πραγματοποιώντας ηλεκτρικό και οπτικό χαρακτηρισμό μέσω μετρήσεων ελλειψομετρίας, ρεύματος-τάσης (I-V), φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης (impedance spectroscopy) και χωρητικότητας (C-V). Επιπλέον, αναλύονται οι μηχανισμοί αγωγιμότητας που λαμβάνουν χώρα εντός των διηλεκτρικών καθώς και οι διεργασίες κατασκευής των memristor που πραγματοποιήθηκαν στον καθαρό χώρο του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”.

Λέξεις Κλειδιά: αντιστάτες, memristor, μνήμες, resistive switching, non-volatile memories, silicon on insulator, νιτρίδιο του πυριτίου, στοιχειομετρία, ηλεκτρικός χαρακτηρισμός, οπτικός χαρακτηρισμός.

ABSTRACT

The constant progress of technology has resulted in the increase of the quantity of the available digital information and data. Therefore, the storage of this information is necessary. A relative new device with this capability are the memristors or ReRAM memories. At those devices the information is stored in the form of resistance because they are able to switch between two states, the state of high resistance (HRS) and the state of low resistance (LRS). This phenomenon is called resistive switching and the value of the resistance can be maintained without power supply. For this reason, the memristors belong in the category of non-volatile memories. The structure of the memristors consists of a dielectric film (usually ceramic) that lies between two electrodes or a metallic and a semiconducting electrode. In the present thesis the technology SOI (silicon on insulator) is used in the structure of the memristors, more about the structure of the memristors will be analyzed later. Also, main concern of this thesis is the study of the dielectric film specifically silicon nitride (SiN_x). Those films were deposited with the LPCVD method by the reaction of dichlorosilane (SiCl_2H_2) with ammonia (NH_3). More specifically, the effect of the different stoichiometry of the film of silicon nitride of the memristors at their optical and electrical properties were studied by carrying out electrical and optical characterization through measurements of ellipsometry, current-voltage(I-V), impedance spectroscopy, capacitance-voltage(C-V) measurements. Also, the conducting mechanisms that take place inside the dielectric films and the fabrication processes that carried out at the clean room facilities of the Institute of Nanoscience and Nanotechnology NCSR “DEMOKRITOS” are analyzed.

Keywords: memristor, memory, resistive switching, silicon on insulator, silicon nitride, stoichiometry, electrical characterization, optical characterization, conductive mechanisms, fabrication processes.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Μνήμες υπολογιστών.....	12
1.2 Αντιστάτες Μνήμης - Memristor.....	12
2 ΝΙΤΡΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ(Si3N4).....	14
2.1 Γενικά.....	14
2.2 Παγίδες.....	15
2.5 Διεργασίες κατασκευής δειγμάτων RRAM.....	17
3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.....	21
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	27
4.1 Κατασκευή Δειγμάτων.....	27
.....	28
4.2 Μεθοδολογία Μετρήσεων.....	30
4.2.1 Μετρήσεις ρεύματος-τάσης (I-V).....	30
4.2.2 Μετρήσεις φασματοσκοπίας εμπέδησης.....	32
4.2.3 Μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης (C-V).....	33
4.2.4 Μετρήσεις Ελλειψομετρίας.....	33
4.2.5 Μετρήσεις X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).....	33
4.2.6 Μετρήσεις κατάρρευσης φορτίου (charge breakdown measurements).....	33
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	35
5.1 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικού/οπτικού χαρακτηρισμού δειγμάτων SNT, SNTST1, SNTST2.....	35
5.1.1 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτινών X (XPS).....	35
5.1.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ελλειψομετρίας.....	36

5.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης (C-V).....	37
5.1.4 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπίας εμπέδησης (impedance spectroscopy measurements)	38
5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικού χαρακτηρισμού δειγμάτων S2,S2S1,S2S2	39
5.2.1 Αποτελέσματα μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης (C-V).....	39
5.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπίας εμπέδησης	41
5.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων ρεύματος-τάσης (I-V)	43
5.2.4 Αποτελέσματα μετρήσεων κατάρρευσης φορτίου.	48
5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικού χαρακτηρισμού δειγμάτων S2,S2O1,S2O2	50
5.3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης (C-V).....	50
5.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπίας εμπέδησης	51
5.3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων ρεύματος-τάσης (I-V)	53
5.2.4 Αποτελέσματα μετρήσεων κατάρρευσης φορτίου.	58
5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα μετρήσεων.....	60
5.4.1 Συγκριτικά αποτελέσματα δειγμάτων SNT,SNTST1,SNTST2.....	60
5.4.2 Συγκριτικά αποτελέσματα δειγμάτων S2,S2S1,S2S2,S2O1,S2O2	61
6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	67
6.1 Ανακεφαλαίωση, συμπεράσματα.....	67
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	68
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	69

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 5 1 Διαγράμματα ελλειψομετρικών γωνιών Ψ και Δ συναρτήσει του μήκους κύματος για το δείγμα (a) SNT, (b) Δείγμα SNTST1, (c) Δείγμα SNTST2.	36
Διάγραμμα 5 2 Διαγράμματα δείκτη διάθλασης για το δείγμα SNT, (b) Αντίστοιχα για το δείγμα SNTST1, (c) Αντίστοιχα για το δείγμα SNTST2.	37
Διάγραμμα 5 3 Διαγράμματα χωρητικότητας-τάσης (C-V) για τα δείγματα (a) SNT, (b) SNTST1, (c) SNTST2.....	38
Διάγραμμα 5 5 Διαγράμματα πραγματικού μέρους διηλεκτρικής σταθεράς συνάρτησή της συχνότητας (ϵ' -f) για το δείγμα (a) SNT, (b) SNTST1, (c) SNTST2.....	39
Διάγραμμα 5 6 (a) Μετρήσεις C-V για διαφορετικές συχνότητες για το δείγμα S2. (b) Αντίστοιχα για το S2S1. (c) Αντίστοιχα για το δείγμα S2S2.	40
Διάγραμμα 5 7 Διαγράμματα μέγιστης χωρητικότητας συνάρτησή εμβαδού για το (a) Δείγμα S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	40

Διάγραμμα 5 8 Διαγράμματα πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς συνάρτησή της συχνότητας για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	41
Διάγραμμα 5 9 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης για τα fresh δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	42
Διάγραμμα 5 10 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2 ενώ έχουν επέλθει στην κατάσταση υψηλής αντίσταση (HRS).....	42
Διάγραμμα 5 11 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα προσομοίωσης EIS Analyzer, και από τα πειραματικά δεδομένα για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2 καθώς έχουν επέλθει στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS).....	43
Διάγραμμα 5 12 Διαγράμματα ρεύματος-τάσης για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	44
Διάγραμμα 5 13 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές Vset που προκύπτουν για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	44
Διάγραμμα 5 14 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές Vreset που προκύπτουν για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	45
Διάγραμμα 5 15 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το SET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	46
Διάγραμμα 5 16 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το RESET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	46
Διάγραμμα 5 17 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το SET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	47
Διάγραμμα 5 18 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το RESET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	47
Διάγραμμα 5 19 Μηχανισμός αγωγιμότητας MSCLC κατά το SET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	48
Διάγραμμα 5 20 Μηχανισμός αγωγιμότητας MSCLC κατά το RESET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.....	48
Διάγραμμα 5 21 Διαγράμματα κατάρρευσης φορτίου για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	49
Διάγραμμα 5 22 Διαγράμματα tbd-Vbd για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	49
Διάγραμμα 5 23 Διαγράμματα tbd-Vbd ⁻¹ για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.	50
Διάγραμμα 5 24 Μετρήσεις C-V για διαφορετικές συχνότητες για το δείγμα (a) S2, (b) Αντίστοιχα για το S2O1, (c) Αντίστοιχα για το δείγμα S2O2.....	50
Διάγραμμα 5 25 Διαγράμματα μέγιστης χωρητικότητας συνάρτησή εμβαδού για (a) Δείγμα S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	51
Διάγραμμα 5 26 Διαγράμματα πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς συναρτήσης της συχνότητας για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	51
Διάγραμμα 5 27 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης για τα fresh δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	52
Διάγραμμα 5 28 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους της εμπέδησης για τα δείγματα στην κατάσταση HRS (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	52
Διάγραμμα 5 29 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα προσομοίωσης EIS Analyzer, και από τα πειραματικά δεδομένα για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	53
Διάγραμμα 5 30 Διαγράμματα ρεύματος-τάσης για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	54

Διάγραμμα 5 31 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές V_{set} που προκύπτουν για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2	54
Διάγραμμα 5 32 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές V_{reset} που προκύπτουν για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	55
Διάγραμμα 5 33 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	56
Διάγραμμα 5 34 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	56
Διάγραμμα 5 35 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	57
Διάγραμμα 5 36 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	57
Διάγραμμα 5 37 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας MSCLC κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	58
Διάγραμμα 5 38 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας MSCLC κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.	58
Διάγραμμα 5 39 Διαγράμματα κατάρρευσης φορτίου για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	59
Διάγραμμα 5 40 Διαγράμματα t_{bd} - V_{bd} για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	59
Διάγραμμα 5 41 Διαγράμματα t_{bd} - V_{bd} για τα δείγματα (α) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.....	59
Διάγραμμα 5 42 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη διάθλασης για τα δείγματα SNT,SNTST1,SNTST2.	60
Διάγραμμα 5 43 Διάγραμμα πραγματικού μέρους της διηλεκτρική σταθεράς των δειγμάτων SNT,SNTST1,SNTST2.	61
Διάγραμμα 5 44 Συγκριτικό διάγραμμα C-V.	61
Διάγραμμα 5 45 Συγκριτικό διάγραμμα C-V.	62
Διάγραμμα 5 46 Συγκριτικό διάγραμμα ϵ'	62
Διάγραμμα 5 47 Συγκριτικό διάγραμμα I-V	63
Διάγραμμα 5 48 Συγκριτικό διάγραμμα $-\text{Im}gZ$ - $\text{Real}Z$ για fresh δείγματα.....	63
Διάγραμμα 5 49 Συγκριτικά διαγράμματα $-\text{Im}Z$ - $\text{Re}Z$, τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση LRS. .	64
Διάγραμμα 5 50 Συγκριτικό διάγραμμα $-\text{Im}gZ$ - $\text{Real}Z$, τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση HRS.Διάγραμμα 5 51 Συγκριτικά διαγράμματα $-\text{Im}gZ$ - $\text{Real}Z$, τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση LRS.....	64
Διάγραμμα 5 52 Συγκριτικό διάγραμμα $-\text{Im}gZ$ - $\text{Real}Z$, τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση HRS.	65
Διάγραμμα 5 53 Συγκριτικά διαγράμματα για τις τιμές (α) V_{set} , (b) V_{reset}	65

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 1 Σχήμα VCM μηχανισμού resistive switching.(a) Μονωτής πριν εφαρμογή τάσης. (b) Σχηματισμός αγώγιμου διαύλου με την εφαρμογή τάσης στο πάνω ηλεκτρόδιο, διαδικασία SET, κατάσταση χαμηλής αντίστασης(LRS). (c) Πήξη του αγώγιμου διαύλου με την εφαρμογή τάσης αντίθετης πολικότητας διαδικασία RESET, κατάσταση υψηλής αντίστασης(HRS) ^[2]	13
---	----

Σχήμα 1 2 Σχηματική αναπαράσταση ECM μηχανισμού. (a) Ηλεκτροχημικά ενεργά άτομα μετάλλου οξειδώνονται σε ιόντα στην άνοδο και μετά μεταφέρονται στην κάθοδο όπου οξειδώνονται. (b) Σχηματισμός αγώγιμου μονοπατιού, κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS). (c) Με την αντιστροφή της εφαρμοζόμενης πολικότητας πραγματοποιείται ηλεκτροχημική διάλυση του αγώγιμου μονοπατιού, και το σύστημα επαναφέρεται στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS) ^[3]	13
Σχήμα 2 1 Τροχιακά δεσμών (N-Si) στο στοιχειομετρικό νιτρίδιο του πυριτίου (Si ₃ N ₄) ^[6]	15
Σχήμα 2 2 Ενεργειακά επίπεδα στο α-Si.	16
Σχήμα 2 3 Διαδικασία χημικής εναπόθεσης (CVD). ^[9]	17
Σχήμα 2 4 Αντιδραστήρας APCVD. ^[10]	18
Σχήμα 2 5 Αντιδραστήρας LPCVD. ^[11]	18
Σχήμα 2 6 Αντιδραστήρας PECVD. ^[12]	19
Σχήμα 2 7 Σύστημα ιοντικής εμφύτευσης. ^[13]	19
Σχήμα 2 8 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας αρνητικής και θετικής λιθογραφίας ^[13]	20
Σχήμα 2 9 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας λιθογραφίας και εγχάραξης. ^[14]	20
Σχήμα 2 10 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας λιθογραφίας και εγχάραξης. ^[14]	20
Σχήμα 2 11 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας sputtering. ^[15]	21
Σχήμα 3 1 Μηχανισμός αγωγιμότητας Schottky.....	22
Σχήμα 3 2 Μηχανισμός αγωγιμότητας Fowler-Nordheim	23
Σχήμα 3 3 Μηχανισμός αγωγιμότητας Direct Tunneling.....	23
Σχήμα 3 4 Μηχανισμός αγωγιμότητας Poole-Frenkel	24
Σχήμα 4 1 Δομή των δειγμάτων memristor που μελετήθηκαν	29
Σχήμα 5 1 Μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε.	43

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 4 1 Αντιδραστήρες LPCVD.	28
Εικόνα 4 2 HP 4155A Semiconductor Parameter Analyzer.	30
Εικόνα 4 3 Σταθμός ακίδων.	31
Εικόνα 4 4 (a) Zurich instruments mfiia 500 kHz/5 MHz impedance analyzer, (b) Ισοδύναμο κύκλωμα διάταξης.	32
Εικόνα 4 5 M-2000F, J.A. Woollam Co., Inc.....	33
Εικόνα 4 6 Keysight B2902A	34

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Μνήμες υπολογιστών

Οι σύγχρονες μνήμες υπολογιστών είναι κυρίως ημιαγώγιμες μνήμες, δηλαδή μνήμες που η τεχνολογία τους βασίζεται στην τεχνολογία των ημιαγωγών. Οι ημιαγώγιμες μνήμες μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Τις πτητικές μνήμες, που απαιτούν τροφοδοσία για να διατηρήσουν την αποθηκευμένη πληροφορία, παράδειγμα πτητικών μνημών είναι οι RAM (Random Access Memory) μνήμες, και τις μη-πτητικές μνήμες που μπορούν να διατηρήσουν την αποθηκευμένη πληροφορία ακόμα και χωρίς κάποια τροφοδοσία, παράδειγμα μη-πτητικών μνημών είναι οι Flash memory μνήμες.

1.2 Αντιστάτες Μνήμης - Memristor

Ένα ανερχόμενο είδος μη πτητικής μνήμης είναι οι αντιστάτες μνήμης ή memristor ή ReRAM (Resistive random access memory) των οποίων η θεωρία θεμελιώθηκε το 1971 από τον Leon O.Chua και αποτελούν το 4ο θεμελιώδες παθητικό ηλεκτρονικό στοιχείο μαζί με την αντίσταση, τον πυκνωτή και το πηνίο. Μερικά από τα πλεονεκτήματα των memristor είναι:

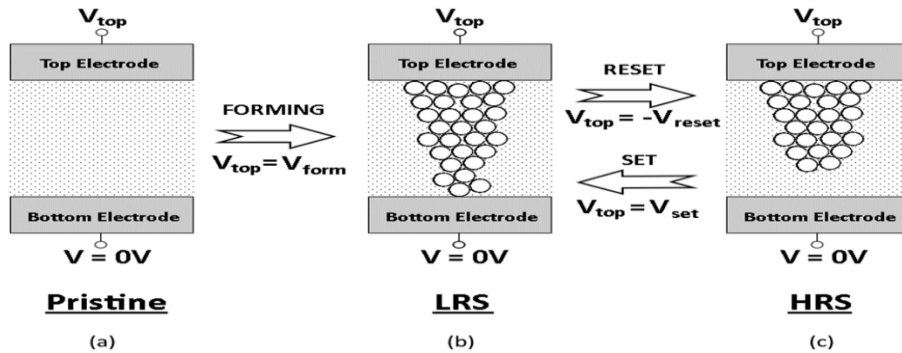
- Έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε διατάξεις μικρότερες των 2nm
- Έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων δομών
- Συμβατότητα με τεχνολογίες CMOS

Η δομή των memristor τις περισσότερες περιπτώσεις αποτελείται από ένα διηλεκτρικό υλικό (συνήθως κεραμικό) το οποίο βρίσκεται ανάμεσα σε δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια ή ανάμεσα σε ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο το οποίο βρίσκεται πάνω από το διηλεκτρικό υλικό, και σε ένα ηλεκτρόδιο ημιαγωγού το οποίο βρίσκεται κάτω από το διηλεκτρικό υλικό. Η ικανότητα των memristor να λειτουργήσουν ως μνήμες βασίζεται στην δυνατότητα μεταβολής της αγωγιμότητας του διηλεκτρικού υλικού με την εφαρμογή τάσης κατάλληλης τιμής και πολικότητας. Εφαρμόζοντας τάση κατάλληλης τιμής μπορεί να δημιουργηθεί ένα αγωγίμο μονοπάτι εντός του μονωτικού υλικού αυξάνοντας την αγωγιμότητα του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται SET και το διηλεκτρικό αποκτά χαμηλή αντίσταση (LRS-Low Resistance State) και ο αντιστάτης λέμε ότι βρίσκεται στην κατάσταση μνήμης 1. Η κατάσταση αυτή μπορεί να δημιουργηθεί ακόμα και αν σταματήσει η τροφοδοσία τάσης στον αντιστάτη. Ωστόσο με την εφαρμογή τάσης αντίθετης πολικότητας πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία, που ονομάζεται RESET, και το διηλεκτρικό υλικό αποκτά ξανά υψηλή αντίσταση (HRS-High Resistance State). Τότε λέμε ότι ο αντιστάτης βρίσκεται στην κατάσταση μνήμης 0. Το παραπάνω φαινόμενο, δηλαδή η εναλλαγή ανάμεσα στις δυο καταστάσεις αντίστασης LRS και HRS ονομάζεται resistive switching και είναι ο λόγος που μπορούν τα memristor να αξιοποιηθούν ως συσκευές μνήμης. Έτσι τα memristor ονομάζονται και Re-RAM (Resistive random-access memories) μνήμες.

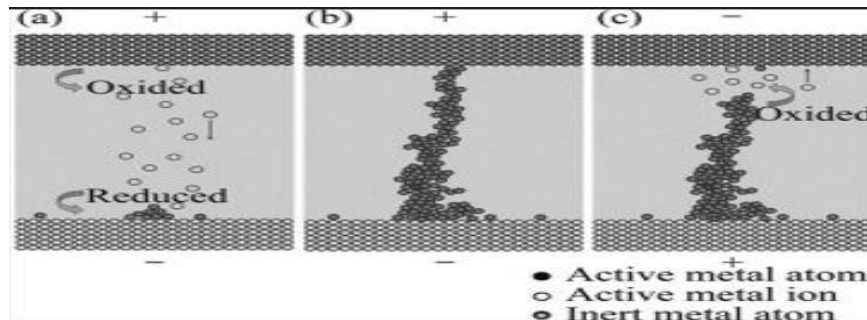
Το φαινόμενο resistive switching δηλαδή η εναλλαγή της αγωγιμότητάς της αντίστασης, μπορεί να εξηγηθεί μέσω του σχηματισμού ενός αγωγίμου διαύλου (conductive filament).

Υπάρχουν 3 είδη διαφορετικών μηχανισμών σχηματισμού του αγωγίμου διαύλου:

- ECM (Electric Metallization Mechanism): Ο οποίος σχετίζεται με την μεταφορά μεταλλικών κατιόντων των μεταλλικών ηλεκτροδίων της μνήμης μέσα από το διηλεκτρικό.
- TCM (Thermochemical Mechanism): Σχετίζεται με στοιχειομετρικές αλλαγές στο οξείδιο, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας με την διεύλεση ρεύματος.
- VCM (Valence Change Mechanism): Σχετίζεται με ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος του διηλεκτρικού υλικού. Οι ατέλειες αυτές είναι κενά οξυγόνου με θετικό φορτίο, συνεπώς τα ηλεκτρόνια παγιδεύονται σε αυτές ^[1].



Σχήμα 1 1 Σχήμα VCM μηχανισμού resistive switching. (a) Μονωτής πριν εφαρμογή τάσης. (b) Σχηματισμός αγώγιμου διαύλου με την εφαρμογή τάσης στο πάνω ηλεκτρόδιο, διαδικασία SET, κατάσταση χαμηλής αντίστασης(LRS). (c) Ρήξη του αγώγιμου διαύλου με την εφαρμογή τάσης αντίθετης πολικότητας διαδικασία RESET, κατάσταση υψηλής αντίστασης(HRS)^[2].



Σχήμα 1 2 Σχηματική αναπαράσταση ECM μηχανισμού. (a) Ηλεκτροχημικά ενεργά άτομα μετάλλου οξειδώνονται σε ιόντα στην άνοδο και μετά μεταφέρονται στην κάθοδο όπου οξειδώνονται. (b) Σχηματισμός αγώγιμου μονοπατιού, κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS). (c) Με την αντιστροφή της εφαρμοζόμενης πολικότητας πραγματοποιείται ηλεκτροχημική διάλυση του αγώγιμου μονοπατιού, και το σύστημα επαναφέρεται στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS)^[3].

2 ΝΙΤΡΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ(Si3N4)

2.1 Γενικά

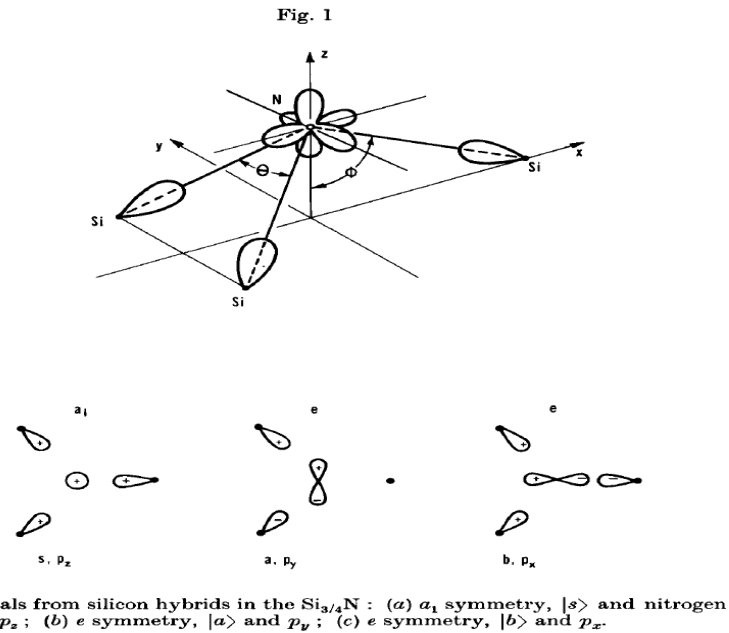
Παραγωγή Si3N4: Το νιτρίδιο του πυριτίου μπορεί να παραχθεί με τους εξής τρόπους:

- Με την αντίδραση της σιλάνης με την αμμωνία στους 700-900°C σε ατμοσφαιρική πίεση με βάση την αντίδραση: $3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$
- Με την αντίδραση της διχλωροσιλάνης (DCS) με την μέθοδο LPCVD (Low pressure CVD) στους 750-800°C με βάση την αντίδραση: $3\text{SiCl}_2 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{HCl} + 6\text{H}_2$
- Παραγωγή με πλάσμα, όπου η σιλάνη αντιδρά με το άζωτο, σχηματίζοντας το νιτρίδιο του πυριτίου, με βάση την αντίδραση : $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{SiNH} + 3\text{H}_2$

Η ύπαρξη του οξυγόνου στα αέρια που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του νιτρίδιου του πυριτίου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία οξειδίων στα παραγόμενα υμένια (όπως το SiO₂ ή το SiO_xO_y). Αυτό συμβαίνει επειδή ο δεσμός Si-O είναι πιο θερμοδυναμικά σταθερός από τον δεσμό SiN.^[4]

Το νιτρίδιο του πυριτίου με την κανονική στοιχειομετρία Si₃N₄ (c-Si₃N₄) εμφανίζεται σε 3 κρυσταλλικές μορφές: α,β,γ ενώ το άμορφο νιτρίδιο του πυριτίου SiN_x (a-SiN_x) εμφανίζεται σε διάφορες μορφές που εμφανίζουν μια πληθώρα: φυσικών, χημικών, ηλεκτρικών και μηχανικών ιδιοτήτων.^[5]

Για το νιτρίδιο του πυριτίου, ισχύει: x Si-rich < x = 1.3 (stoichiometric) < N-rich, δηλαδή πως το νιτρίδιο του πυριτίου που είναι πλούσιο σε πυρίτιο έχει χαμηλότερη στοιχειομετρία από το αντίστοιχο στοιχειομετρικό, και το νιτρίδιο του πυριτίου που είναι πλούσιο σε άζωτο έχει μεγαλύτερη στοιχειομετρία από το αντίστοιχο στοιχειομετρικό. Το ενεργειακό του χάσμα υπολογίζεται στα 4.3eV. Επίσης, σχηματίζει τετραεδρική μορφή που είναι αποτέλεσμα του sp³ υβριδισμού. Στην περίπτωση του στοιχειομετρικού νιτρίδιου του πυριτίου (Si₃N₄) οι άκρες του τετραέδρου καταλαμβάνονται από 4 άτομα αζώτου (N). Το άζωτο εμφανίζεται sp² υβριδισμό και σχηματίζει 3 N-Si δεσμούς σε επίπεδη δομή με γωνία 120°.



Σχήμα 2 1 Τροχιακά δεσμών (N-Si) στο στοιχειομετρικό νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4)^[6].

2.2 Παγίδες

Η εναπόθεση του Si_3N_4 μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως με χημική εναπόθεση σε χαμηλή πίεση (LPCVD), χημική εναπόθεση σε ατμοσφαιρική πίεση (APCVD), χημική εναπόθεση με πλάσμα (PECVD), φυσική εναπόθεση (PVD), μέθοδο εναπόθεσης ατομικού στρώματος (ALD).

Το νιτρίδιο του πυριτίου έχει μεγάλο αριθμό παγίδων καθώς το πυρίτιο έχει 4 εξώτατα ηλεκτρόνια και σχηματίζει τετραεδρική δομή ως αποτέλεσμα sp^3 υβριδισμού^[7]. Στο στοιχειομετρικό νιτρίδιο του πυριτίου, στις άκρες της τετραεδρικής δομής βρίσκονται τέσσερα άτομα αζώτου. Το άζωτο έχει sp^2 υβριδισμό, έτσι στο Si_3N_4 σχηματίζονται τρεις N-Si δεσμοί σε επίπεδη δομή με γωνία δεσμού 120° . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ζευγάρι ηλεκτρονίων που δεν είναι δεσμευμένο να έχει τροχιακό που είναι κάθετο στο επίπεδο.

Κάτω υπό κανονικές συνθήκες κάθε άτομο πυριτίου πρέπει να ενωθεί με τέσσερα άτομα αζώτου. Παρ'όλα αυτά σε άμορφες δομές όλοι οι δεσμοί με το πυρίτιο δεν ικανοποιούνται και κάθε άτομο πυριτίου ενώνεται κατά μέσο όρο με 3.7 άτομα αζώτου. Όμοια κάτω υπό κανονικές συνθήκες, κάθε άτομο αζώτου πρέπει να ενωθεί με 3 άτομα πυριτίου, σε άμορφες δομές παρ'όλα αυτά ενώνεται κατά μέσο όρο με 2.78 άτομα πυριτίου. Παρατηρείται ότι ο λόγος είναι ίδιος για το στοιχειομετρικό νιτρίδιο του πυριτίου τύπου a που έχει δημιουργηθεί από LPCVD (Low pressure CVD), $4/3=3.7/2.78=1.38$.

Ελεύθερες ρίζες

Οι ελεύθερες ρίζες στο νιτρίδιο του πυριτίου λειτουργούν ως επίπεδα παγίδων ηλεκτρονίων. Η ρίζα ($N_3 \equiv Si^*$) είναι το κέντρο K που του δίνει την ικανότητα λειτουργίας ως μνήμης^[8]. Οι βαθιές παγίδες στο νιτρίδιο του πυριτίου είναι ρίζες ιόντων πυριτίου $\equiv Si^+$, $\equiv Si^-$. Οι παγίδες ηλεκτρονίων βρίσκονται 1.6eV κάτω από την ζώνη αγωγιμότητας ενώ οι παγίδες οπών βρίσκονται 1.8eV πάνω από την ζώνη αγωγιμότητας. Άτομα πυριτίου με ένα δεσμευμένο ηλεκτρόνιο και ελεύθερες ρίζες μηδενικού φορτίου $\equiv Si \cdot 0$ υπάρχουν πάντα στο νιτρίδιο του πυριτίου ανεξάρτητα από τον τρόπο εναπόθεσης του. Το κέντρο K μπορεί να έχει τρεις διαφορετικές τιμές φορτίου: K^+ ($N_3 \equiv Si^+$), K^0 ($N_3 \equiv Si^-$), K^- ($N_3 \equiv Si^0$). Οι ρίζες ιόντων πυριτίου με αρνητικό ή θετικό φορτίο μπορούν να θεωρηθούν παγίδες (ρίζες ανιόντων και ρίζες κατιόντων αντίστοιχα). Ασκώντας θετικό δυναμικό στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο της δομής, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το πυρίτιο μέσω του λεπτού στρώματος πυριτίου και καταλαμβάνονται από φορτισμένες παγίδες στον κύριο όγκο του νιτρίδιου του πυριτίου.

Ρηχές παγίδες

Οι ρίζες $\equiv N^+$ μπορούν να λειτουργήσουν ως ρηχές παγίδες ηλεκτρονίων που βρίσκονται κοντά στην ζώνη αγωγιμότητας στο Si_3N_4 τύπου a. Οι θέσεις των επιπέδων που αντιστοιχούν σε ρηχές παγίδες σε σχέση με τις επιτρεπτές ζώνες^[7]. Οι ρηχές παγίδες ηλεκτρονίων μπορούν να είναι ρίζες κατιόντων αζώτου $\equiv N^+$ που σχηματίζονται κατά το σπάσιμο των δεσμών $\equiv N-H$ και $\equiv Si-N$ που ακολουθείται από την κατάληψη των οπών από ελεύθερες ρίζες αζώτου.

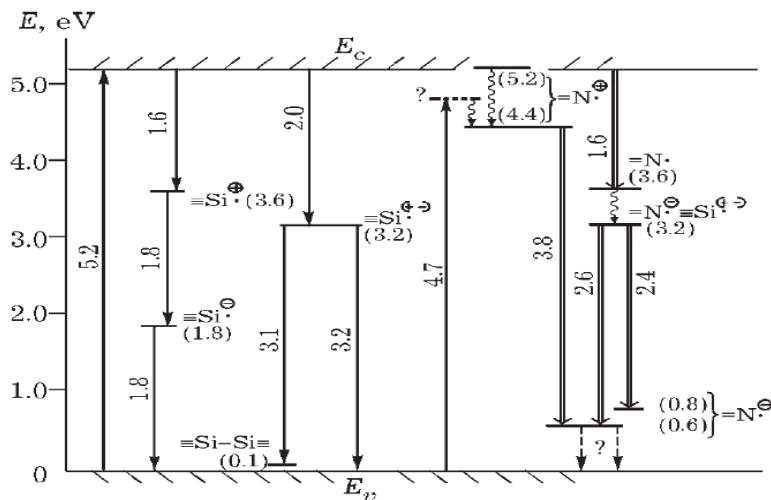


Fig. 5. Energy levels and electron transitions in a-Si₃N₄.

Σχήμα 2.2 Ενεργειακά επίπεδα στο a-Si.

2.5 Διεργασίες κατασκευής δειγμάτων RRAM

Η κατασκευή των δειγμάτων των αντιστατών που μελετήθηκαν πραγματοποιήθηκε εντός του καθαρού χώρου του ΕΚΕΦΕ “ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ”. Στον καθαρό χώρο εμποδίζεται η είσοδος σκόνης και σωματιδίων καθώς επικρατούν συνθήκες υπερπίεσης και σύστημα ανακύκλωσης και καθαρισμού του αέρα μέσω φίλτρων HEPA.

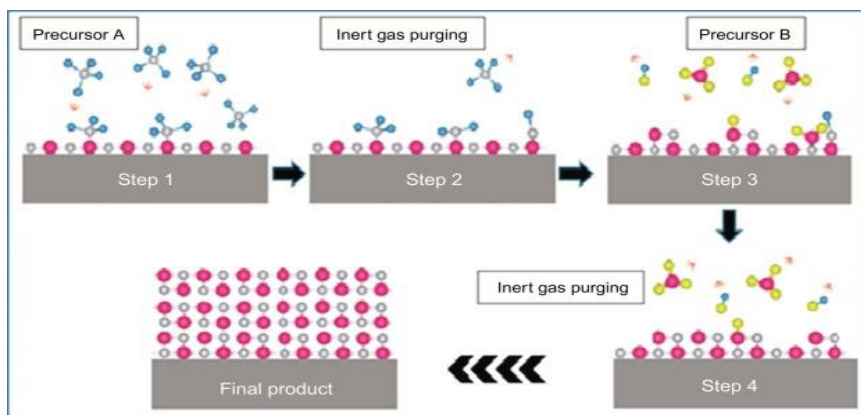
Καθαρισμός

Η διαδικασία κατασκευής των δειγμάτων ξεκινάει με τον καθαρισμό του δισκιδίου του μονοκρυσταλλικού πυριτίου που θα χρησιμοποιηθεί για το εκάστοτε δείγμα. Ο καθαρισμός πραγματοποιείται καθώς το πυρίτιο είναι εκτεθειμένο στον ατμοσφαιρικό αέρα, συνεπώς στην επιφάνεια του μπορεί να έχουν συσσωρευτεί οργανικά υπολείμματα καθώς και να έχει δημιουργηθεί οξείδιο του πυριτίου.

Χημική εναπόθεση ατμών (Chemical Vapor Deposition)

Κατά την χημική εναπόθεση ατμών το δισκίδιο του πυριτίου τροφοδοτείται με συγκεκριμένα πρόδρομα αέρια τα οποία αντιδρούν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την εναπόθεση ενός στερεού στρώματος από το επιθυμητό υλικό στην επιφάνεια του δισκιδίου. Η διαδικασία δημιουργίας ενός λεπτού στρώματος μέσω χημικής εναπόθεσης ατμών αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

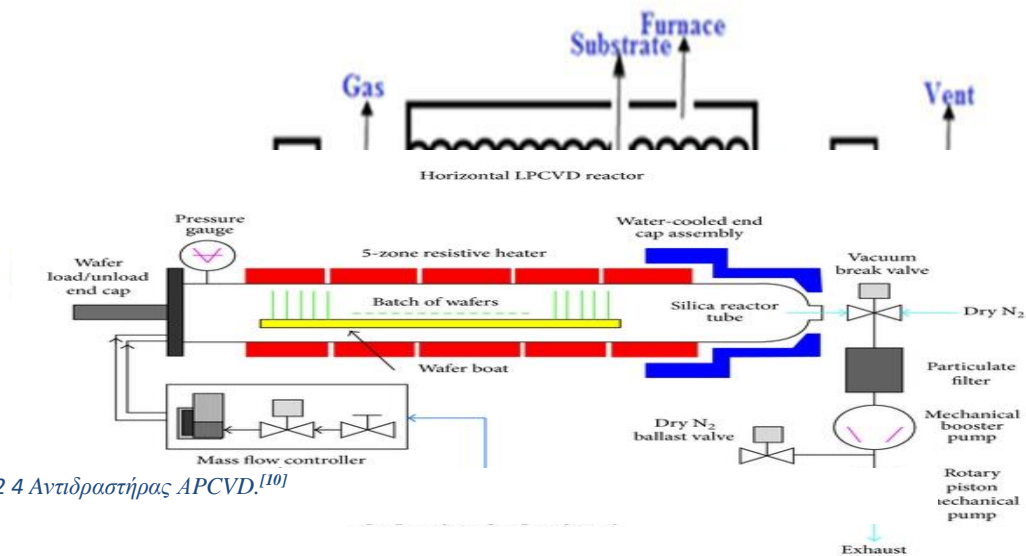
- Στην επιφάνεια του δισκιδίου δημιουργούνται συσσωματώματα από τα πρώτα άτομα των πρόδρομων αερίων.
- Καθώς τα συσσωματώματα μεγαλώνουν αρχίζουν και δημιουργούν τους πρώτους κρυστάλλους.
- Οι κρύσταλλοι αυξάνονται σε μέγεθος και σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του υποστρώματος.



Σχήμα 2 3 Διαδικασία χημικής εναπόθεσης (CVD).^[9]

Παρουσιάζονται τρία είδη αντιδραστήρων χημικής εναπόθεσης, οι αντιδραστήρες ατμοσφαιρικής πίεσης (APCVD), οι αντιδραστήρες χαμηλής πίεσης (LPCVD), και οι αντιδραστήρες με πλάσμα (PECVD).

- Οι αντιδραστήρες APCVD περιλαμβάνουν τρεις ζώνες, μια κεντρική ζώνη όπου συμβαίνουν οι αντιδράσεις, και δυο ζώνες που περιέχουν αέριο άζωτο.

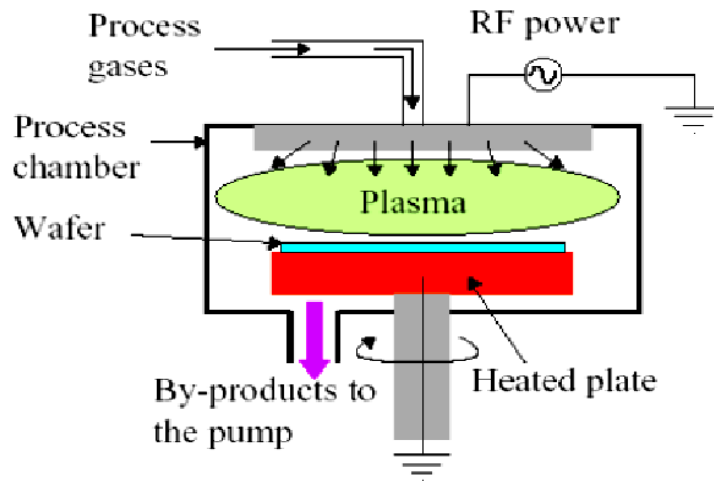


Σχήμα 2 4 Αντιδραστήρας APCVD.^[10]

Σχήμα 2 5 Αντιδραστήρας LPCVD.^[11]

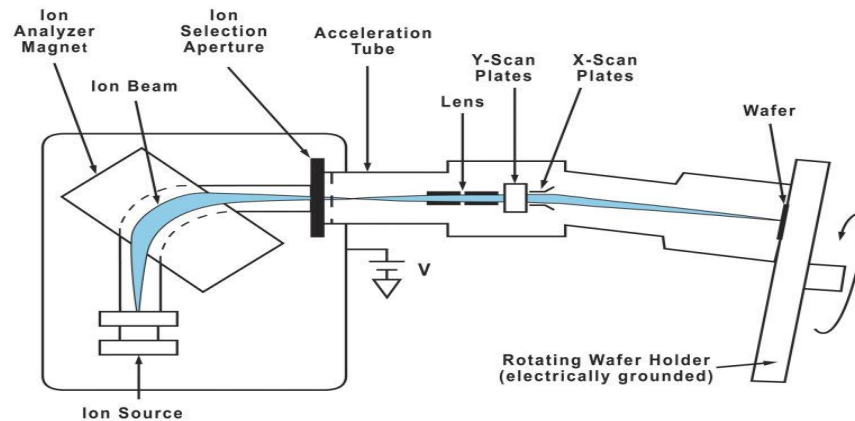
- Οι αντιδραστήρες LPCVD λειτουργούν σε χαμηλές πιέσεις (0.1 έως 1 torr). Διαθέτουν τρεις ζώνες.

- Οι αντιδραστήρες PECVD λειτουργούν σε πιέσεις από 1 έως 10 torr, και δίνουν την δυνατότητα εναπόθεσης με γρήγορους ρυθμούς σε χαμηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2 6 Αντιδραστήρας PECVD.^[12]

Εμφύτευση (Implantation): Ιόντα επιταχύνονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο και σημαδεύουν το δισκίδιο με σκοπό να εμφυτευθούν στο πυρίτιο. Τα ιόντα αυτά λειτουργούν ως προσμίξεις και αλλάζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υποστρώματος.

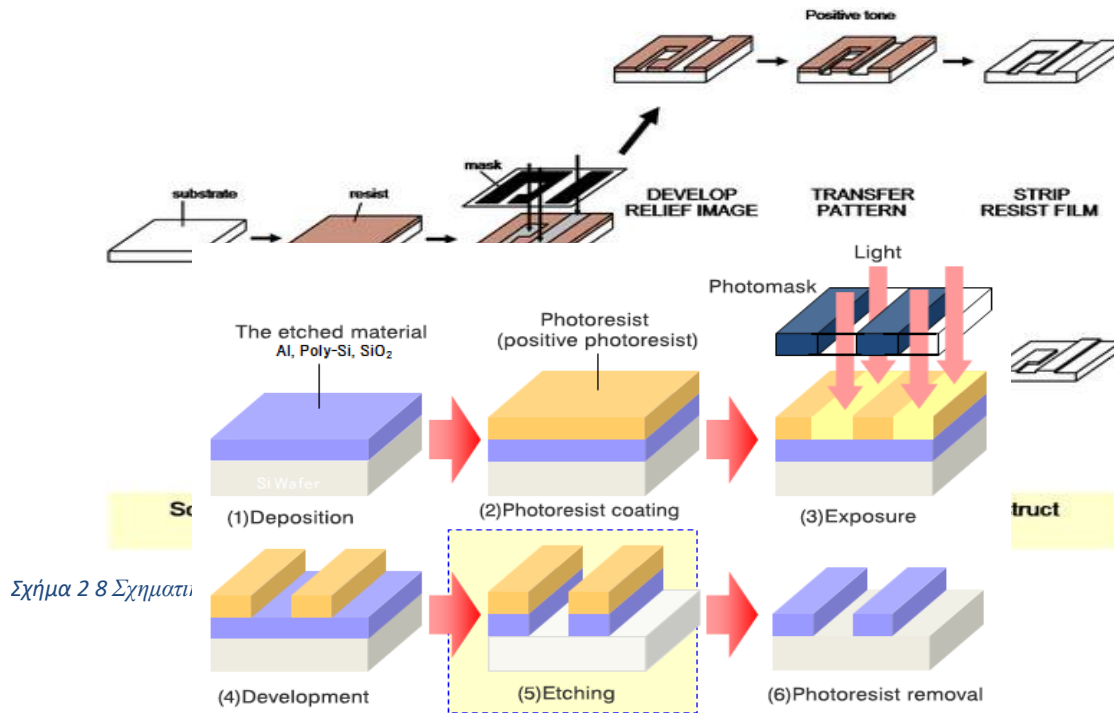


Σχήμα 2 7 Σύστημα ιοντικής εμφύτευσης.^[13]

Ανόπτηση (Annealing): Κατά την διαδικασία της ανόπτησης, τα δισκίδια θερμαίνονται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η ανόπτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να απομακρυνθούν οι προσμείξεις από την επιφάνεια του δισκιδίου.

Λιθογραφία (Lithography): Κατά την διαδικασία της λιθογραφίας πάνω στην επιφάνεια του δισκιδίου σχηματίζεται ένα επιθυμητό μοτίβο. Η διαδικασία της λιθογραφίας αποτελείται από τα εξής βήματα:

Αρχικά το δισκίο επικαλύπτεται με μια φωτοευαίσθητη πολυμερική ουσία (ρητίνη) η οποία έχει την δυνατότητα να αντιδράει με το φως. Έπειτα, τοποθετείται μια μάσκα πάνω από την ρητίνη η οποία έχει συγκεκριμένα σχέδια και μας επιτρέπει να εκθέτουμε την ρητίνη σε συγκεκριμένα σημεία σε υπεριώδες φως. Έτσι ελέγχουμε το σχήμα που θέλουμε να αποτυπώσουμε πάνω στο δισκίο. Αυτό συμβαίνει διότι η ρητίνη όταν εκτίθεται σε ακτινοβολία UV αλλάζει η χημεία της, μέσω φυσικοχημικών αντιδράσεων. Υπάρχουν δυο είδη ρητίνης, η ρητίνη θετικού τόνου που όταν εκτίθεται σε ακτινοβολία UV γίνεται διαλυτή σε ειδικό διαλύτη, και η ρητίνη αρνητικού τόνου, που συμβαίνει το αντίθετο.

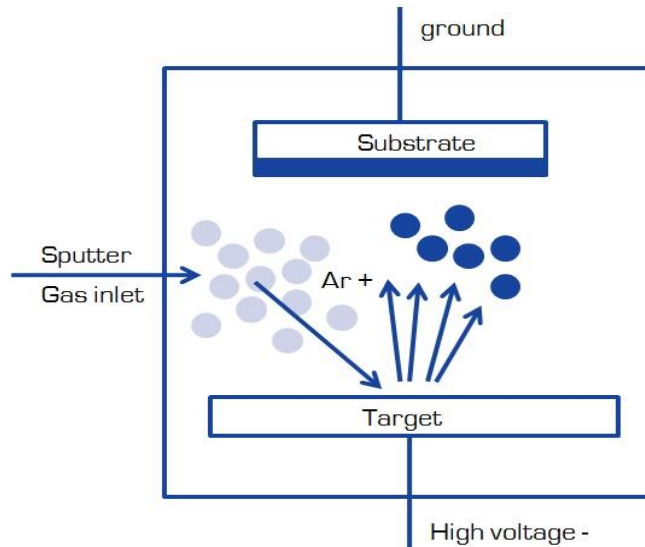


Σχήμα 2 8 Σχηματι

Σχήμα 2 9 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας λιθογραφίας και εγχάραξης.^[14]

Εγχάραξη (Etching): Κατά την διαδικασία της εγχάραξης αφαιρείται κάποιο υλικό από το δισκίο του πυριτίου. Υπάρχουν δυο είδη εγχάραξης. Η υγρή εγχάραξη και η ξηρή εγχάραξη. Κατά την υγρή εγχάραξη το υλικό που είναι να αφαιρεθεί αντιδρά με ένα υγρό διάλυμα. Κατά την ξηρή εγχάραξη ή στην εγχάραξη με πλάσμα, το υλικό που είναι να αφαιρεθεί αντιδρά με αέρια αντιδραστήρια και παράγει αέρια προϊόντα που έπειτα αφαιρούνται.

Sputtering: Το sputtering είναι μια μέθοδος φυσικής εναπόθεσης (PVD). Με το sputtering μπορούμε να εναποθέσουμε στρώματα από το επιθυμητό υλικό σε ένα υπόστρωμα. Η διαδικασία εναπόθεσης είναι η εξής: Αρχικά αφαιρούνται άτομα από τον επιθυμητό στόχο (το επιθυμητό υλικό που θέλουμε να εναποθέσουμε), συγκρούοντας θετικά ιόντα στον στόχο αυτό. Τα άτομα που αφαιρούνται έπειτα μεταφέρονται σε μορφή ατμού στο υπόστρωμα όπου σχηματίζουν το εναποτιθέμενο στρώμα.



Σχήμα 2 11 Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας sputtering.^[15]

Τεχνολογία πυριτίου σε μονωτή (SOI-Silicon on insulator): Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στα δείγματα αντιστατών που μελετήθηκαν χρησιμοποιείται η τεχνολογία πυριτίου σε μονωτή (SOI-silicon on insulator). Η τεχνολογία πυριτίου σε μονωτή είναι μια τεχνολογία στην κατασκευή ημιαγωγικών διατάξεων η οποία παράγει διατάξεις με καλύτερη απόδοση και χαμηλότερη κατανάλωση από ότι οι παραδοσιακές τεχνολογίες κατασκευής ημιαγωγικών διατάξεων. Στην τεχνολογία αυτή τοποθετείται ένα λεπτό μονωτικό στρώμα όπως το διοξείδιο του πυριτίου ανάμεσα από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου και το πυρίτιο του υποστρώματος.

3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

Μηχανισμός αγωγιμότητας Schottky

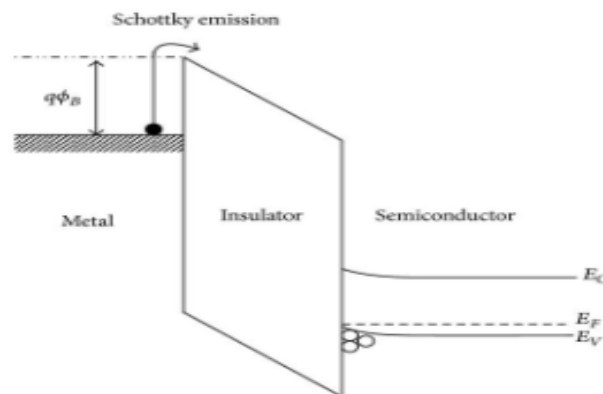
Η θερμιονική εκπομπή (ή εκπομπή Schottky) πραγματοποιείται όταν ενεργοποιημένα θερμικά ηλεκτρόνια ξεπερνάνε το ενεργειακό φράγμα μεταξύ ζώνη σθένους και ζώνης αγωγιμότητας και εισέρχονται στην ζώνη αγωγιμότητας. Η εκπομπή Schottky είναι ένας από τους μηχανισμούς αγωγιμότητας που παρατηρείται πιο συχνά στα οξειδία και ειδικά σε μεγάλες θερμοκρασίες.^[17]

Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να συσχετισθεί με το ηλεκτρικό πεδίο και την θερμοκρασία μέσω της παραπάνω σχέσης:

$$J_{SE} = \frac{4\pi q m^* (kT)^2}{h^3} \exp\left[\frac{-q\left(\Phi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon}}\right)}{kT}\right]$$

$$J_{SMSSE} = \alpha T^{3/2} E \mu \left(\frac{m^*}{m_0}\right)^{-1/2} \exp\left[\frac{-q\left(\Phi_B - \sqrt{qE/4\pi\epsilon}\right)}{kT}\right]$$

Στην περίπτωση που η μέση ελεύθερη διαδρομή που διανύουν τα ηλεκτρόνια είναι μικρότερη από τον



Σχήμα 3 1 Μηχανισμός αγωγιμότητας Schottky.

φραγμό Schottky, τότε η εξίσωση Schottky, παίρνει την μορφή^[17,18]:

Μηχανισμός αγωγιμότητας Fowler-Nordheim, Direct Tunneling

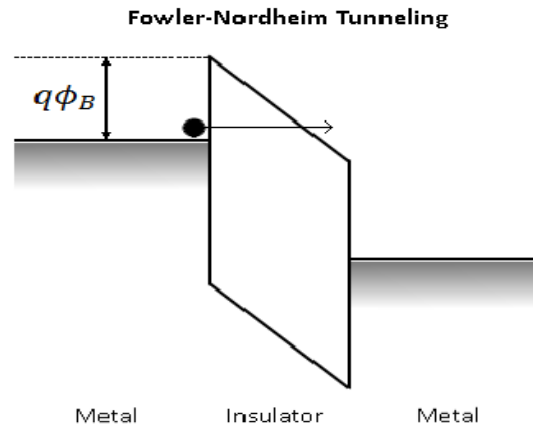
Υπό την παρουσία υψηλού ηλεκτρικού πεδίου, οι μηχανισμοί Fowler-Nordheim (F-N) και Direct-Tunneling μπορούν να λάβουν χώρα στο οξειδίο. Γενικά, ο μηχανισμός Direct Tunneling είναι κυρίαρχος για οξειδία μικρότερα των 3nm^[20], ενώ ο μηχανισμός Fowler-Nordheim εμφανίζεται για οξειδία με μεγαλύτερο πάχος. Η πυκνότητα ρεύματος λόγω του μηχανισμού Fowler-Nordheim μπορεί να παρασταθεί από την εξίσωση^[21]:

$$J_{FN} = \frac{q^2}{8\pi h \Phi_B} E^2 \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2qm^*}}{3hE} \Phi_B^{3/2}\right)$$

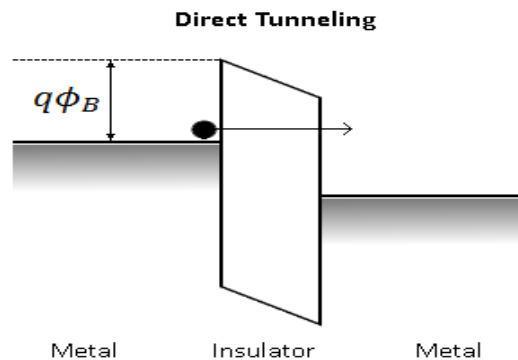
ενώ η πυκνότητα ρεύματος λόγω Direct-Tunneling μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση:

$$J_{DT} \approx \exp \left[\frac{-8\pi\sqrt{2q}}{3h} (m^* \Phi_B)^{3/2} \kappa * t_{ox,eq} \right]$$

Μηχανισμός αγωγιμότητας Poole-Frenkel



Σχήμα 3 5 Μηχανισμός αγωγιμότητας Fowler-Nordheim

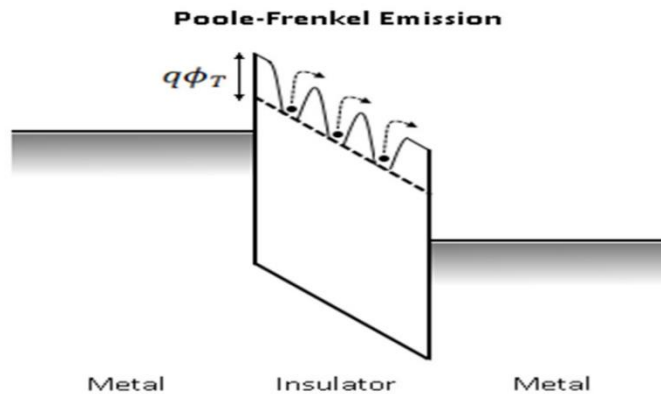


Σχήμα 3 4 Μηχανισμός αγωγιμότητας Direct Tunneling

Ο μηχανισμός Poole-Frenkel πραγματοποιείται όταν παγιδευμένα ηλεκτρόνια διεγείρονται στην ζώνη αγωγιμότητας του οξειδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο μειώνει τον φραγμό του δυναμικού Coulomb των ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται η πιθανότητα για θερμική διέγερση από τις παγίδες^[20]. Η εκθετική εξάρτηση της έκφρασης Poole-Frenkel είναι παρόμοια με την εκθετική εξάρτηση της εκπομπής Schottky, με την διαφορά ότι το ύψος του φραγμού (Φ_B) αντικαθίσταται με το βάθος του πηγαδιού δυναμικού (Φ_T).

Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να δοθεί από την έκφραση:

$$J_{PF} = q\mu N_C E \exp\left[\frac{-q(\Phi_T - \sqrt{qE/\pi\epsilon})}{kT}\right]$$



Σχήμα 3 6 Μηχανισμός αγωγιμότητας Poole-Frenkel

Ωμική αγωγιμότητα (Ohmic conduction)

Υπάρχει ένας μικρός αριθμός ευκίνητων ηλεκτρονίων που δημιουργούνται λόγω θερμικής διέγερσης, παρόλο που το ενεργειακό χάσμα στο οξειδίο είναι μεγάλο. Τα ηλεκτρόνια αυτά συμβάλλουν στην ωμική αγωγιμότητα στην οποία η πυκνότητα του ρεύματος είναι ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου, και δίνεται από την σχέση:

$$J_{ohmic} = \sigma E = q\mu N_C E \exp\left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right]$$

Ιοντική αγωγιμότητα (Ionic conduction)

Η κίνηση των ιόντων κάτω από την επίρεια ηλεκτρικού πεδίου συμβάλλει στην ιοντική αγωγιμότητα που είναι παρόμοια με μια διαδικασία διάχυσης^[24]. Η πυκνότητα ρεύματος στην περίπτωση της ιοντικής αγωγιμότητας δίνεται από την έκφραση:

$$J_{ionic} \propto vr \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G^\ddagger}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{1}{2} \frac{r\epsilon}{kT} E\right) - \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{r\epsilon}{kT} E\right) \right\}$$

Στην περίπτωση χαμηλού ηλεκτρικού πεδίου ($E \gg kT/re$), η πυκνότητα ρεύματος έχει γραμμική εξάρτηση από το πεδίο και δίνεται από την σχέση:

$$J_{ionic(lowE)} \propto \left(vr^2 \frac{e}{kT} \right) \cdot E \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G^\ddagger}{kT}\right)$$

Στην περίπτωση υψηλού ηλεκτρικού πεδίου ($E \gg kT/re$), η πυκνότητα ρεύματος έχει εκθετική εξάρτηση από το ηλεκτρικό πεδίο και δίνεται από την σχέση:

$$J_{ionic(highE)} \propto vr \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G^\ddagger}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{\frac{1}{2}vrE}{kT}\right)$$

Μηχανισμός αγωγιμότητας περιοχής φορτίων χώρου (Space Charge Limited Conduction)

Ο μηχανισμός SCLC αποτελείται από 3 μέρη: Την ωμική περιοχή, την περιοχή που ισχύει ο νόμος του τετραγώνου, και την περιοχή όπου υπάρχει απότομη αύξηση για υψηλές τιμές ηλεκτρικού πεδίου. Στην περιοχή όπου υπάρχουν χαμηλά ηλεκτρικά πεδία ο μηχανισμός αγωγιμότητας αποτελείται κυρίως από θερμικά παραγόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Καθώς αυξάνεται το ηλεκτρικό πεδίο εμφανίζεται τετραγωνική εξάρτηση του ρεύματος από την τάση, η πυκνότητα των ηλεκτρονίων που εισάγονται από το πάνω ηλεκτρόδιο (electrode injected), σταδιακά ξεπερνάει την ισορροπία και κυριαρχεί στην αγωγιμότητα. Σύμφωνα με την θεωρία SCLC για την περίπτωση ενός διακεκριμένου επιπέδου παγιδών, η πυκνότητα ρεύματος για υψηλό ηλεκτρικό πεδίο δίνεται από την σχέση:

$$J_{SCLC} = \frac{9}{8} \epsilon_i \mu \theta \frac{V^2}{d^3}$$

Μηχανισμός TAT (Trap Assisted Tunneling)

Ο μηχανισμός Trap Assisted Tunneling αποδίδεται στα ρεύματα που προέρχονται από tunneling καθώς και από τις ατέλειες στο διηλεκτρικό στρώμα. Σε αντίθεση με διαδικασίες tunneling ενός βήματος όπως ο μηχανισμός Fowler-Nordheim, οι παγίδες (κενά οξυγόνου) στο στρώμα του οξειδίου βοηθούν τα ηλεκτρόνια να πραγματοποιήσουν tunnel από την κάθοδο στην άνοδο μέσω διαδικασίας 2 βημάτων^[25]. Τα ηλεκτρόνια αιχμαλωτίζονται από τις παγίδες στην κάθοδο και έπειτα εκπέμπονται στην άνοδο. Η γενική έκφραση για τον μηχανισμό TAT δίνεται από την σχέση:

$$J_{TAT} = A \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2qm^*}}{3hE} \Phi_T^{3/2}\right)$$

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Κατασκευή Δειγμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν 3 δείγματα: SNT,SNTST1,SNTST2 αντιστατών των οποίων η δομή δεν είχε τεχνολογία SOI, και εμφυτευμένο πυρίτιο πάνω από το στρώμα του νιτριδίου του πυριτίου, καθώς και 5 δείγματα αντιστατών: S2,S2S1,S2S2,S2O1,S2O1 των οποίων η δομή αναλύεται παρακάτω. Η κατασκευή όλων των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε εντός του καθαρού χώρου του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ». Σε όλα τα δείγματα αντιστατών χρησιμοποιήθηκε τεχνολογία SOI (silicon on insulator). Η διαδικασία κατασκευής ήταν παρόμοια σε όλα τα δείγματα με την διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ροές διγλωροσιλάνης και αμμωνίας κατά την κατασκευή των δειγμάτων με την μέθοδο LPCVD (Low Pressure CVD), καθώς και στο γεγονός ότι σε 2 από τα δείγματα που μελετήθηκαν προστέθηκε οξυγόνο πάνω από το στρώμα νιτριδίου του πυριτίου. Μερικές από τις πληροφορίες για την κατασκευή των δειγμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

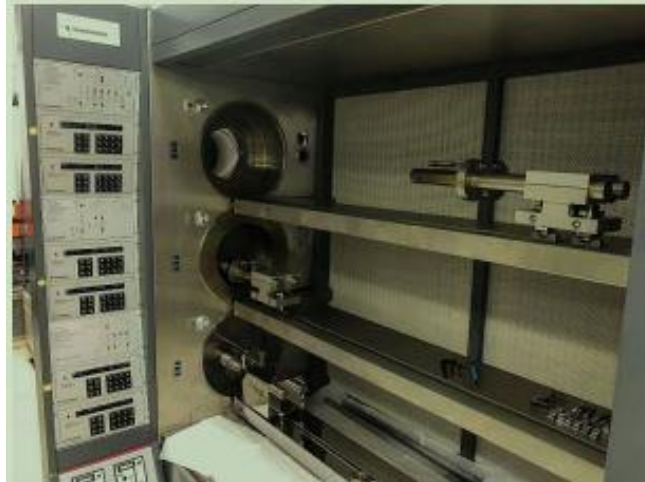
Όνομασία	S2	S2S1	S2S2	S2O1	S2O2
Υπόστρωμα	SOI	SOI	SOI	SOI	SOI
Διάμετρος	1" x 1"	1" x 1"	1" x 1"	1" x 1"	1" x 1"
Αγωγιμότητα	p type	p type	p type	p type	p type
Ειδική αντίσταση ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1-10	1-10	1-10	1-10	1-10

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των αντιστατών που μελετήθηκαν.

Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.1 σε όλα τα δείγματα χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία SOI (silicon on insulator). Επίσης η διάμετρος όλων των δειγμάτων ήταν 1" x 1". Τα αρχικά δισκίδια που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα δείγματα ήταν p type, και η ειδική τους αντίσταση από 1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$. Η σειρά των διεργασιών για την κατασκευή τους που πραγματοποιήθηκε ήταν η εξής:

- Καθαρισμός όλων των δειγμάτων με χρήση διαλύματος Piranha 1:1 και υδατικού διαλύματος υδροφθορικού οξέος (BHF). Τα δείγματα αφέθηκαν στο διάλυμα για 15min.
- Εναπόθεση στρώματος SiO_2 πάχους 2nm με την μέθοδο LPCVD. Η εναπόθεση πραγματοποιήθηκε με την χρήση του αερίου TEOS $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, στους 710° για 300 λεπτά.
- Εμφύτευση φωσφόρου με ενέργεια 40keV, με δόση 5×10^{15} , 50 μA για 20 λεπτά.
- Ανόπτηση με N_2 στους 950° για 20 λεπτά.
- Ξεχωριστή επεξεργασία των δειγμάτων. Αρχικά πραγματοποιήθηκε καθαρισμός των τριών δειγμάτων: S2,S2O1,S2O2, όπου με χρήση υδροφθορικού οξέος αφαιρέθηκε το αέριο TEOS, και έπειτα χρησιμοποιήθηκε ξανά BHF και Piranha, για τον καθαρισμό των δειγμάτων.

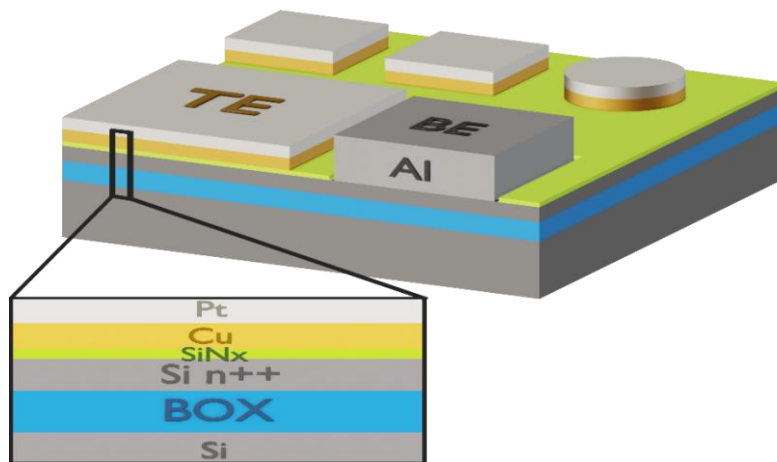
- Εναπόθεση νιτρίδιου του πυριτίου μέσω χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) στα δείγματα S2,S2O1,S2O2, στην συγκεκριμένη περίπτωση στοιχειομετρικού νιτρίδιου του πυριτίου (Si₃N₄), στο οποίο οι ροές των πρόδρομων αερίων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του ήταν 20sccm διγλωροσιλανίου (DCS) και 60sccm αμμωνίας (NH₃).



Εικόνα 4 1 Αντιδραστήρες LPCVD.

- Επεξεργασία του δείγματος S2S2. Πραγματοποιήθηκε καθαρισμός του δείγματος όπως στο προηγούμενο βήμα, για αφαίρεση του TEOS και καθαρισμό του δείγματος, και ακολούθησε εναπόθεση νιτρίδιου του πυριτίου (Si_Nx) ξανά με CVD, για την παραγωγή του οποίου οι ροές των πρόδρομων αερίων που χρησιμοποιήθηκαν (DCS,NH₃) ήταν 60sccm και 60sccm αντίστοιχα.
- Ακολούθησε η ίδια διαδικασία και για το τελευταίο δείγμα S2S1, με την διαφορά ότι το στρώμα του νιτρίδιου του πυριτίου που εναποθέτηθηκε ξανά με CVD, είχε ροές πρόδρομων αερίων 20sccm DCS και 20sccm NH₃.
- Οξειδωση του Si₃N₄. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της εγχάραξης, ρίχνοντας ιόντα οξυγόνου στα δείγματα: Στο δείγμα S2O1 για 60s, με ροή οξυγόνου 25 sccm, και ισχύ 200W, και στο δείγμα S2O2 για 120s, με ροή πάλι 25 sccm, και ισχύ 200W
- Χημικός καθαρισμός με Piranha 1:1, ισοπροπανόλη και ακετόνη
- Οπτική λιθογραφία ώστε να σχηματιστούν τα κατάλληλα ανοίγματα μέσω εγχάραξης στα διάφορα στρώματα της διάταξης και έπειτα να γίνει η εναπόθεση των μετάλλων και να γίνουν οι μεταλλικές επαφές στα ανοίγματα αυτά. Αφού εναποτεθεί η ρητίνη πραγματοποιείται έκθεση της φωτοευαίσθητης ρητίνης μέσω ειδικής μάσκας σε ακτινοβολία, και με χρήση developer αφαιρείται από τα σημεία που εκτέθηκαν στο φως.
- Εγχάραξη όλων των δειγμάτων.
- Έπειτα αφαιρέθηκε η ρητίνη με ισοπροπανόλη και ακετόνη από τα σημεία τα οποία εγχάραχτηκαν.
- Οπτική λιθογραφία, παρόμοια διαδικασία με την προηγούμενη, σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιείται αρνητική λιθογραφία.
- Υγρή εγχάραξη του στρώματος Si₃N₄ σε διάλυμα BHF για 11 λεπτά.

- Εναπόθεση στρώματος Al 100nm, η οποία πραγματοποιείται με την χρήση εξαχνωτή αλουμινίου, το στρώμα αυτό αποτελεί και το κάτω ηλεκτρόδιο της διάταξης. Έπειτα αφαιρείται η ρητίνη με την προπανόλης και ακετόνης, αφήνοντας το μέταλλο στα επιθυμητά σημεία (metal lift-off).
- Αρνητική οπτική λιθογραφία με παρόμοιες συνθήκες με τις προηγούμενες περιπτώσεις.
- Sputtering στρώματος χαλκού (Cu) 30nm και πλατίνας (Pt) 30nm, αφαίρεση ρητίνης με χρήση ακετόνης και προπανόλης, αφήνοντας το μέταλλο στα επιθυμητά σημεία (metal lift-off), που θα αποτελέσουν και τα πάνω ηλεκτρόδια.
- Ανόπτηση όλων των δειγμάτων σε N₂, στους 130° για 15 λεπτά.



Σχήμα 4.1 Δομή των δειγμάτων memristor που μελετήθηκαν

4.2 Μεθοδολογία Μετρήσεων.

4.2.1 Μετρήσεις ρεύματος-τάσης (I-V).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιούνται οπτικές και ηλεκτρικές μετρήσεις συνολικά οοχτώ δειγμάτων αντιστατών (memristor) έτσι ώστε να χαρακτηριστούν ηλεκτρικά και οπτικά. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις I-V (ρεύματος-τάσης). Από τις συγκεκριμένες μετρήσεις μπορούν να παρατηρηθούν οι τάσεις που σχηματίζεται ο αγωγίμος διάυλος στους αντιστάτες και επέρχονται στις καταστάσεις SET ή RESET (κατάσταση χαμηλής και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα). Αυτό είναι δυνατόν καθώς στις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από τα δεδομένα που λαμβάνονται εμφανίζεται σε συγκεκριμένες τιμές τάσεων απότομες αλλαγές στο ρεύμα. Επιπρόσθετα, κατασκευάζονται συγκριτικά διαγράμματα για τα διαφορετικά δείγματα. Το όργανο ρυθμίζεται έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μέτρηση διπλής σάρωσης τάσης (double sweep). Επίσης ρυθμίζονται τα επιθυμητά όρια της τάσης που θα γίνει η σάρωση, καθώς και το ρεύμα περιορισμού I_{cc} , δηλαδή η ανώτερη τιμή της έντασης του ρεύματος που θα επιτρέψει το όργανο να διέλθει από την διάταξη που μετρείται, προστατεύοντας την έτσι από πιθανή κατάρρευση (breakdown). Τα όρια της τάσης ρυθμίζονται έτσι ώστε να παρατηρηθεί απότομη αύξηση ή ελάττωση του ρεύματος. Μετρήσεις λαμβάνονται για διαφορετικά ρεύματα περιορισμού (I_{cc}) προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά των memristor.



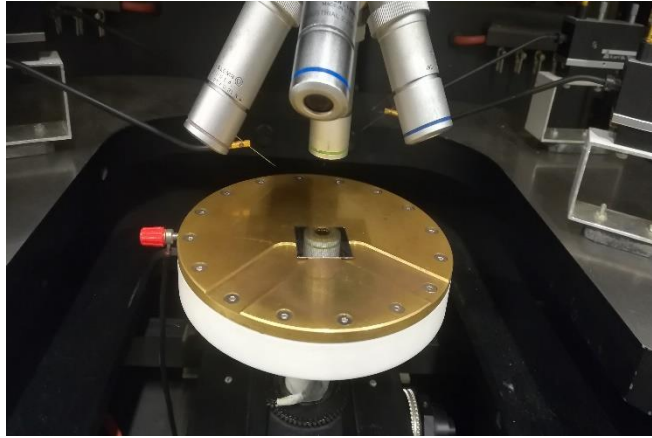
Μηχανισμός αγωγιμότητας	Διάγραμμα
Schottky Emission	$\ln(I) - V^{0.5}$
Fowler - Nordheim Tunneling (FN)	$\ln(I/V^2) - 1/V$
Poole - Frenkel Emission (PF)	$\ln(I/V) - V^{0.5}$
	$\log(I) - \log(V)$
Trap-assisted Tunneling (TAT)	$\ln(I) - 1/V$

Εικόνα 4 2 HP 4155A Semiconductor Parameter Analyzer.

Πίνακας 4 2 Διαγράμματα τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε μηχανισμό αγωγιμότητας

Επιπλέον μέσω των καμπυλών ρεύματος-τάσης είναι δυνατόν να κατασκευαστούν τα κατάλληλα διαγράμματα για την μελέτη των μηχανισμών αγωγιμότητας που επικρατούν στην εκάστοτε μέτρηση. Όταν παρατηρείται μια ευθύγραμμη περιοχή στο εκάστοτε διάγραμμα είναι ενδεικτικό ότι στην περιοχή αυτή επικρατεί ο μηχανισμός ο οποίος αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο διάγραμμα.

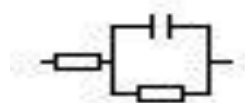
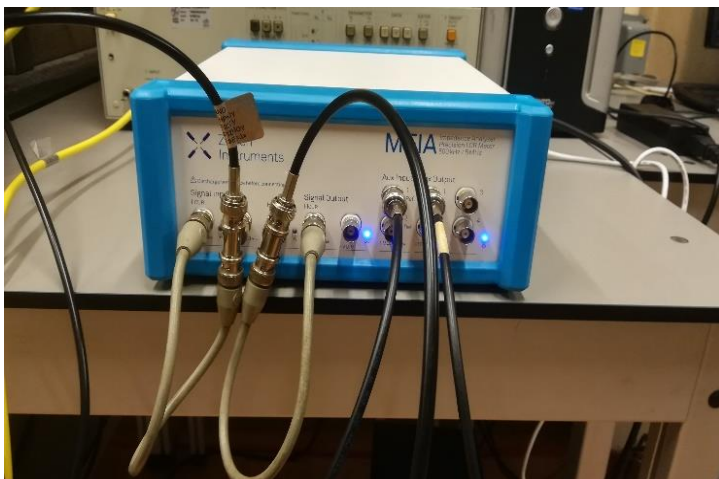
Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε (HP 4155A) συνδέθηκε με καλώδια triax σε ένα σταθμό ακίδων οι οποίες χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση επαφής με τα δείγματα. Τα δείγματα τοποθετούνται πάνω στην ειδική βάση του σταθμού ακίδων. Χρησιμοποιούνται δυο ακίδες για την λήψη των μετρήσεων, η μια ακουμπάει στο πάνω ηλεκτρόδιο της διάταξης (Pt) και μια στο κάτω ηλεκτρόδιο της διάταξης (Al).



Εικόνα 4 3 Σταθμός ακίδων.

4.2.2 Μετρήσεις φασματοσκοπίας εμπέδησης.

Οι μετρήσεις φασματοσκοπίας εμπέδησης λήφθηκαν με το όργανο (Zurich Instruments MFIA 500 kHz/5 MHz impedance analyzer). Στις συγκεκριμένες μετρήσεις πραγματοποιούνται λήψεις της χωρητικότητας, συνάρτησή της συχνότητα καθώς και του πραγματικού και φανταστικού μέρους της εμπέδησης: $\text{Real}Z, \text{Im}Z (Z', Z'')$ σαν συνάρτηση της συχνότητας. Για αυτές τις μετρήσεις εφαρμόζεται τάση εξαρτώμενη από τον χρόνο με μεταβλητή γωνιακή συχνότητα και σταθερό πλάτος: $V(\omega, t) = V_0 * \cos(\omega t)$. Η εφαρμογή της τάσης οδηγεί στη διηλεκτρική πόλωση των τοπικών φορτίων και στη μεταφορά των φορέων του δείγματος. Στην περίπτωση που έχω συχνότητες μικρότερες των 10^8 Hz , στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται οι διατάξεις (αντιστάτες) μπορούν να παρομοιαστούν με έναν πυκνωτή που βρίσκεται παράλληλα με μια αντίσταση η οποία είναι συνδεδεμένη με μια αντίσταση στη σειρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Η αντίσταση R_s σχετίζεται με την αντίσταση του ηλεκτροδίου της καθόδου, την αντίσταση από τις επαφές των καλωδίων κλπ., η αντίσταση R_p σχετίζεται με την μεταφορά φορτίων από τα ηλεκτρόδια προς το διηλεκτρικό στρώμα, και την πτώση τάσης στην διεπιφάνεια διηλεκτρικού-υποστρώματος. Επίσης σχετίζεται με την αντίσταση του αγωγίμου διαύλου του διηλεκτρικού. Η χωρητικότητα C_p περιγράφει την δυνατότητα πόλωσης του υλικού και την ιδιότητα του να αποθηκεύει φορτίο^[22]. Επίσης μέσω του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της εμπέδησης είναι δυνατόν να υπολογιστεί το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς (ϵ').



Εικόνα 4 4 (a) Zurich instruments mfia 500 kHz/5 MHz impedance analyzer, (b) Ισοδύναμο κύκλωμα διάταξης.

4.2.3 Μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης (C-V).

Επίσης λαμβάνονται μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης. Κατά την διάρκεια μίας μέτρησης χωρητικότητας-τάσης (C-V), εφαρμόζεται τάση DC στην οποία προστίθεται εναλλασσόμενη τάση μικρού πλάτους. Λόγω αυτής της τάσης προκαλείται μεταβολή του φορτίου ΔQ της διάταξης. Μέσω των μετρήσεων C-V είναι δυνατόν να μελετηθεί η απόκριση των φορέων των διατάξεων που μελετώνται.

4.2.4 Μετρήσεις Ελλειψομετρίας.

Μετρήσεις ελλειψομετρίας πραγματοποιήθηκαν στα 3 δείγματα: SNT, SNTST1, SNTST2. Από τις μετρήσεις ελλειψομετρίας λήφθηκαν δεδομένα για τον δείκτη διάθλασης (n), για το πάχος των δειγμάτων, καθώς και για τις ελλειψομετρικές γωνίες Ψ, Δ . Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο όργανο M-2000F της J.A. Woollam Co., Inc



Εικόνα 4 5 Εικόνα 4 6 M-2000F, J.A. Woollam Co., Inc

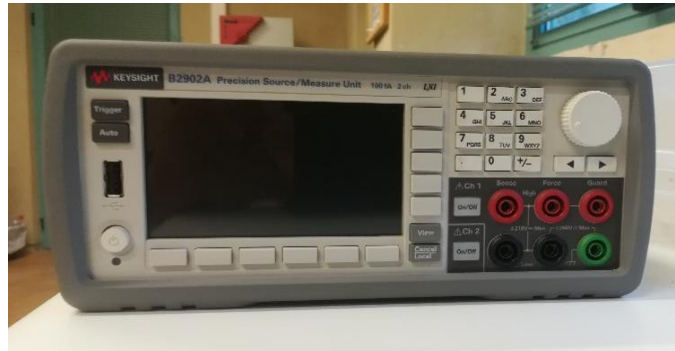
4.2.5 Μετρήσεις X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

Μετρήσεις φωτοηλεκτρονίων ακτινών X πραγματοποιήθηκαν στα 3 δείγματα που αναφέρθηκαν και παραπάνω (SNT, SNTST1, SNTST2). Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στο ινστιτούτο επιστημών χημικής μηχανικής (ITE) στην Πάτρα, και λήφθηκαν αποτελέσματα για τις ατομικές συγκεντρώσεις του πυριτίου και του αζώτου, όπως επίσης για την στοιχειομετρία του στρώματος νιτρίδιου του πυριτίου ($[N]/[Si]$), καθώς για το πάχος των δυο στρωμάτων.

4.2.6 Μετρήσεις κατάρρευσης φορτίου (charge breakdown measurements).

Κατά τις μετρήσεις κατάρρευσης φορτίου εφαρμόζεται μια σταθερή τάση στα δείγματα και παρατηρείται το ρεύμα που διαπερνά τους αντιστάτες κατά στην διάρκεια του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα μας ενδιαφέρει ο χρόνος που εμφανίζεται απότομη αύξηση στο ρεύμα και μεταβαίνει σε τιμές των mA. Όταν συμβαίνει αυτό έχουμε κατάρρευση του φορτίου και διαλύεται ο αγώγιμος διάλυτος και πλέον ο συγκεκριμένος πυκνωτής δεν είναι λειτουργικός. Ακόμα παρατηρείται ότι όσο μικρότερη

είναι η σταθερή τάση που εφαρμόζεται τόσο μεγαλύτερος χρόνος χρειάζεται για να παρατηρηθεί απότομη αύξηση στην τιμή του ρεύματος, και να επέλθει κατάρρευση φορτίου. Οι μετρήσεις αυτές λήφθηκαν με το όργανο Keysight B2902A που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4 7 Keysight B2902A

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.

5.1 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικού/οπτικού χαρακτηρισμού δειγμάτων SNT, SNTST1, SNTST2.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι ροές διχλωροσιλάνης (H_2SiCl_2) και αμμωνίας (NH_3) που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο LPCVD για την κατασκευή των στρωμάτων Si_3N_4 για κάθε δείγμα αντίστοιχα.

Samples	Flow $\text{SiH}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_3$
SNT	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow 20\text{sccm}$
	$\text{NH}_3 \rightarrow 60\text{sccm}$
SNTST1	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow 20\text{sccm}$
	$\text{NH}_3 \rightarrow 20\text{sccm}$
SNTST2	$\text{SiH}_2\text{Cl}_2 \rightarrow 60\text{sccm}$
	$\text{NH}_3 \rightarrow 60\text{sccm}$

Πίνακας 5.1 Ροές $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{SiCl}_2$ που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των στρωμάτων Si_3N_4 στα δείγματα SNT, SNTST1, SNTST2.

5.1.1 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτινών X (XPS).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την μέθοδο XPS (X-ray photoelectron spectroscopy)

	% atomic concentration Si, N		% Si2p components			Stoichiometry x in the SiN_x layer (= [N]/[Si])	Layer thickness (± 0.2)nm
	Si	N	Si^0	SiN_x	Si oxide	[N]/[Si]	d_{SiN_x}
SNT	53.2	46.8	5.8	76.4	17.8	1.19	6.5
SNTST1	54.7	45.3	10.0	72.6	17.4	1.21	5.2
SNTST2	52.2	47.7	1.8	81.7	16.5	1.18	9.4

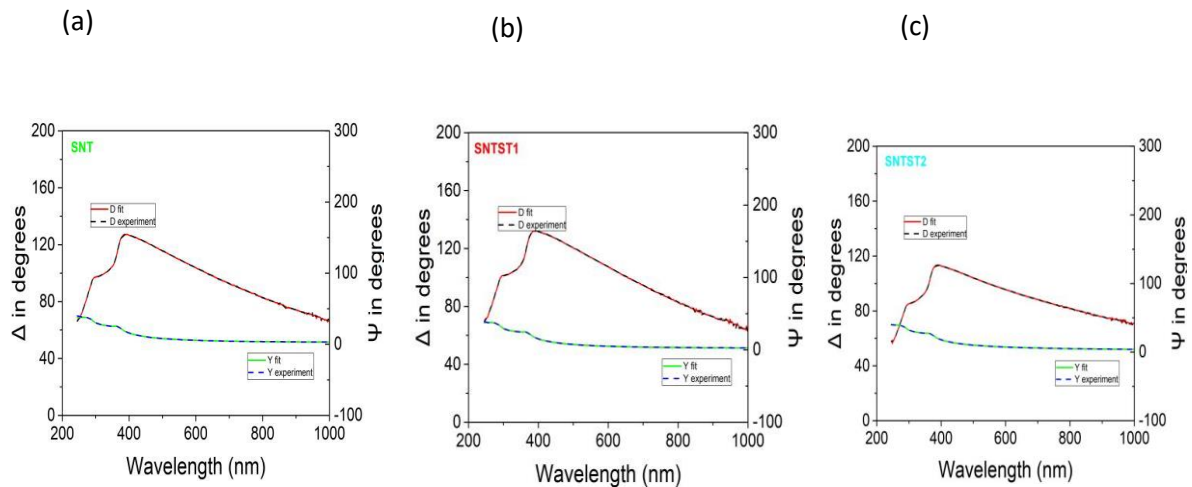
Από την συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνουμε πληροφορίες για τις ατομικές συγκεντρώσεις του πυριτίου και του αζώτου, καθώς και για την στοιχειομετρία των δυο στρωμάτων N και Si, καθώς και για το πάχος

κάθε στρώματος SiNx. Όπως παρατηρείται το δείγμα SNTST1 (οι ροές για την κατασκευή του στρώματος νιτριδίου του πυριτίου ήταν 20sccm DCS και 20sccm NH3) έχει στοιχειομετρία $x=1.19$, το δείγμα SNT (οι ροές για την κατασκευή του στρώματος νιτριδίου του πυριτίου ήταν 60sccm DCS και 20sccm NH3) έχει στοιχειομετρία $x=1.21$, ενώ το δείγμα SNTST2 (οι ροές για την κατασκευή του στρώματος νιτριδίου του πυριτίου ήταν 60sccm DCS και 60sccm NH3) έχει στοιχειομετρία $x=1.18$.

5.1.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ελλειψομετρίας.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις ελλειψομετρίας.

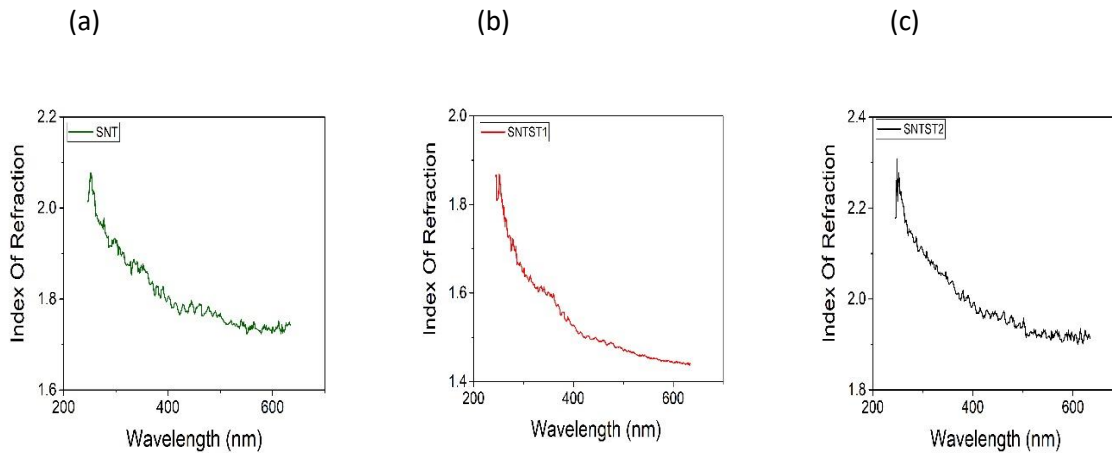
Αρχικά παρουσιάζονται διαγράμματα των ελλειψομετρικών γωνιών Ψ, Δ (τα οποία περιγράφουν την αλλαγή στην πόλωση που υφίσταται όταν η ακτίνα μέτρησης αντιδρά με την επιφάνεια του δείγματος).



Διάγραμμα 5.1 Διαγράμματα ελλειψομετρικών γωνιών Ψ και Δ συναρτήσει του μήκους κύματος για το δείγμα (a) SNT, (b) Δείγμα SNTST1, (c) Δείγμα SNTST2.

Από τα διαγράμματα διακρίνεται ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων συμφωνεί με τα δεδομένα που προέκυψαν από τα δείγματα και το fitting είναι σωστό.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται διαγράμματα του δείκτη διάθλασης (n) όπως προέκυψαν από την ελλειψομετρία για τα 3 διαφορετικά δείγματα.



Διάγραμμα 5 2 Διαγράμματα δείκτη διάθλασης για το δείγμα SNT, (b) Αντίστοιχα για το δείγμα SNTST1, (c) Αντίστοιχα για το δείγμα SNTST2.

Παρατηρείται πως ο δείκτης διάθλασης λαμβάνει μικρότερες τιμές καθώς η στοιχειομετρία του Si₃N₄ (με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου XPS) αυξάνεται, δηλαδή τις μεγαλύτερες τιμές παίρνει το δείγμα SNTST2 μετά το δείγμα SNT και τέλος το δείγμα SNTST1.

Επίσης από την ελλειψομετρία προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για το πάχος των δειγμάτων

Samples	Flow SiH ₂ Cl ₂ /NH ₃	Thickness
SNT	SiH ₂ Cl ₂ →20sccm NH ₃ →60sccm	83.87 ± 0.07 Å
SNTST1	SiH ₂ Cl ₂ →20sccm NH ₃ →20sccm	83.62 ± 0.25 Å
SNTST2	SiH ₂ Cl ₂ →60sccm NH ₃ →60sccm	102.11 ± 0.26 Å

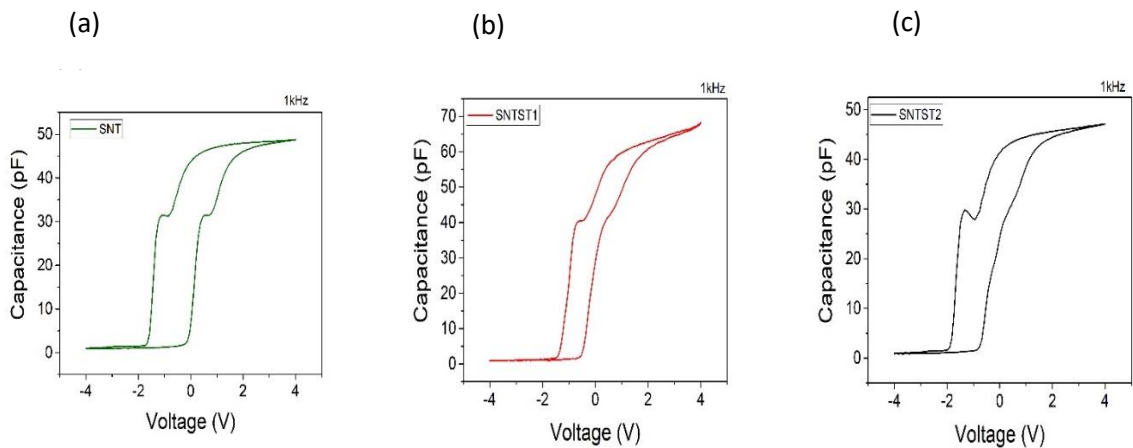
Πίνακας 5 2 Αποτελέσματα παχών από μετρήσεις ελλειψομετρίας..

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα από την ελλειψομετρία συμφωνούν με τα αποτελέσματα από την XPS στο γεγονός ότι το στρώμα του νιτριδίου του πυριτίου στο δείγμα SNTST1 είναι λεπτότερο σε σχέση με τα άλλα δυο δείγμα, ενώ το δείγμα SNTST2 έχει στρώμα νιτριδίου του πυριτίου με το μεγαλύτερο πάχος.

5.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης (C-V).

Συνεχίζοντας παρουσιάζονται διαγράμματα χωρητικότητας-τάσης όπως προέκυψαν για τα 3 δείγματα.

Η τάση που εφαρμόζεται είναι από -4 έως 4 V, με συχνότητα του εναλλασσόμενου σήματος στα 1kHz.

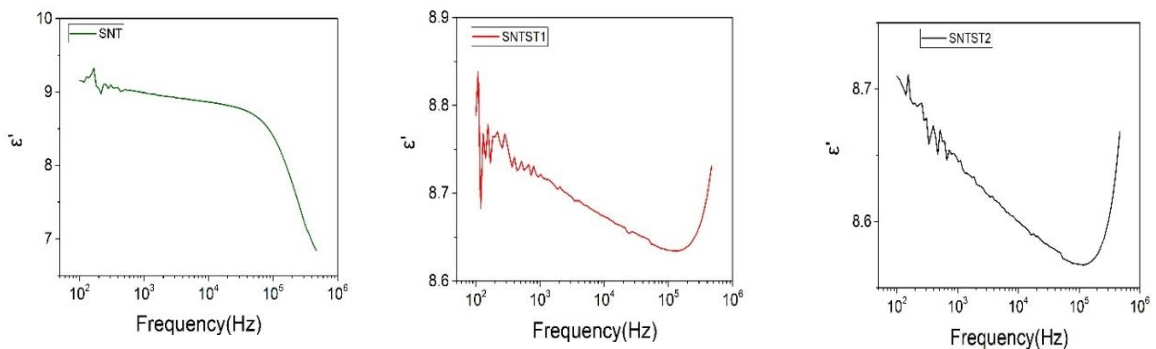


Διάγραμμα 5 3 Διάγραμμα 5 4 Διαγράμματα χωρητικότητας-τάσης (C-V) για τα δείγματα (a) SNT, (b) SNTST1, (c) SNTST2.

Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται πως τα δείγματα SNT2 (νιτρίδιο του πυριτίου πλούσιο σε άζωτο) και το δείγμα SNT (στοιχειομετρικό νιτρίδιο του πυριτίου) εμφανίζουν παρόμοιες καμπύλες C-V με ελαφρώς υψηλότερες τιμές στο δείγμα SNT, το δείγμα SNTST1 εμφανίζει υψηλότερες τιμές χωρητικότητας σε μεγαλύτερες τιμές τάσεων.

5.1.4 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπίας εμπέδησης (impedance spectroscopy measurements)

Από τις μετρήσεις φασματοσκοπίας εμπέδησης λήφθηκαν δεδομένα για το πραγματικό, και το φανταστικό μέρος της εμπέδησης από τα οποία έπειτα υπολογίστηκε το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς όπου και παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα. Η συχνότητα που εφαρμόζεται είναι από 100Hz έως 510kHz.



Διάγραμμα 5 5 Διαγράμματα πραγματικού μέρους διηλεκτρικής σταθεράς συνάρτησή της συχνότητας ($\epsilon' - f$) για το δείγμα (a) SNT, (b) SNTST1, (c) SNTST2.

Παρατηρείται πως τα δείγματα SNTST1,SNTST2 τα οποία είναι πλούσια σε πυρίτιο, και πλούσιο σε άζωτο αντίστοιχα εμφανίζουν κοντινές τιμές (8.8-8.6) με το δείγμα SNTST1 να εμφανίζει ελαφρά μεγαλύτερες τιμές σε όλο το εύρος συχνοτήτων, ενώ το δείγμα SNT (στοιχειομετρικό), εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς, καθώς και ότι η ϵ' μειώνεται απότομα στις υψηλές τιμές συχνότητας, ενώ αντίθετα στα δείγματα SNT,SNTST1 η ϵ' αυξάνεται απότομα στις υψηλές τιμές συχνότητας.

5.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικού χαρακτηρισμού δειγμάτων S2,S2S1,S2S2

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των τριών δειγμάτων αντιστατών S2,S2S1,S2S2. Υπενθυμίζεται στον πίνακα 5.3 η αντιστοιχία των δειγμάτων SNT, SNTST1, SNTST2 που αναλύθηκαν παραπάνω με τα δείγματα αντιστατών που θα παρουσιαστούν παρακάτω.

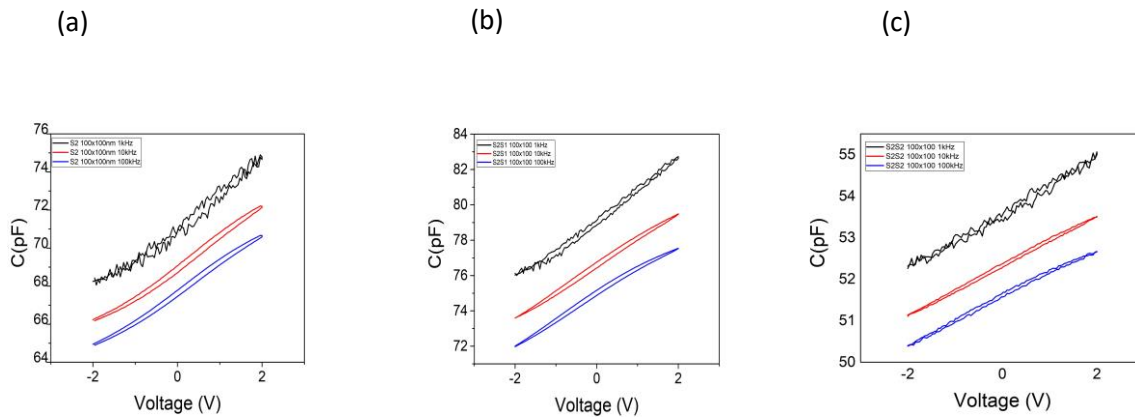
SNT→S2	S2 + O → S2O1
SNTST1→S2S1	S2 ++ O → S2O2
SNTST2→S2S2	

Πίνακας 5 3 Αντιστοιχία δειγμάτων SNT,SNTST1,SNTST2 με τα δείγματα memristor S2,S2S1,S2S2 που μελετήθηκαν.

Το δείγμα S2 κατασκευάστηκε με βάση το δείγμα SNT όπου το στρώμα νιτριδίου του πυριτίου είναι στοιχειομετρικό, όπως και τα δείγματα S2O1, S2O2, τα οποία έχουν επέλθει την ίδια κατεργασία με το δείγμα S2, ωστόσο έχει πραγματοποιηθεί οξείδωση του στρώματος Si3N4 με την μέθοδο της εγχάραξης, ρίχνοντας ιόντα οξυγόνου στα δείγματα, στο δείγμα S2O1 για 60s, ενώ στο δείγμα S2O2 για 120s. Το δείγμα S2S1 έχει κατασκευαστεί με βάση το δείγμα SNTST1, ενώ το δείγμα S2S2 έχει κατασκευαστεί με βάση το δείγμα SNTST2.

5.2.1 Αποτελέσματα μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης (C-V)

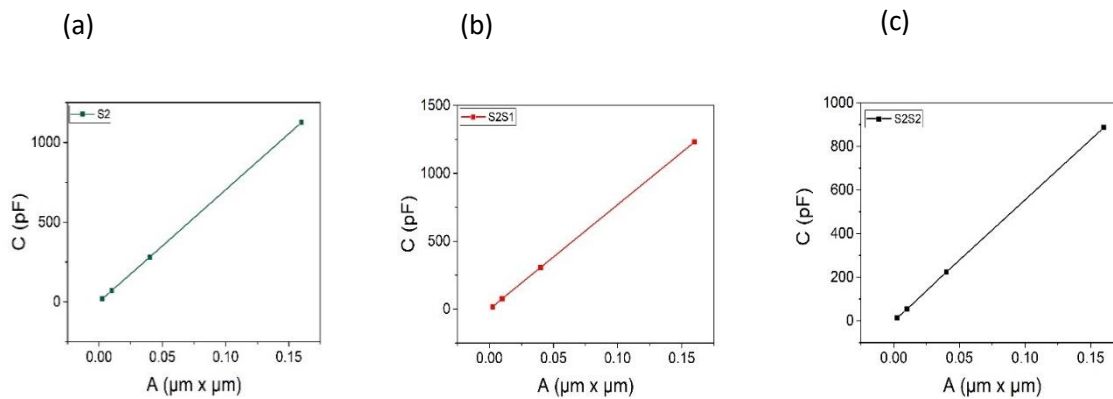
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης για τα δείγματα S2,S2S1,S2S2 για διαφορετικές συχνότητες σήματος (1,10,100kHz) εναλλασσόμενης τάσης (100mV) που προστίθεται στην συνεχή τάση η οποία παίρνει τιμές από -3V έως 3V.



Διάγραμμα 5.6 (α) Μετρήσεις C-V για διαφορετικές συχνότητες για το δείγμα S2. (β) Αντίστοιχα για το S2S1. (γ) Αντίστοιχα για το δείγμα S2S2.

Παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η συχνότητα του σήματος της εναλλασσόμενης τάσης μειώνεται η μετρούμενη χωρητικότητα για όλα τα δείγματα. Επίσης παρατηρείται πως το δείγμα S2S1 εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας, έπειτα ακολουθεί το δείγμα S2 και τέλος το δείγμα S2S2. Σημειώνεται πως και στα διαγράμματα C-V των μη εμφυτευμένων δειγμάτων (SNT, SNTST1, SNTST2), μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας εμφανίζονται για το δείγμα S2S1.

Κατόπιν παρουσιάζονται διαγράμματα τις μέγιστης χωρητικότητας που εμφανίζει κάθε από τα παραπάνω τρία δείγματα, συνάρτησή του εμβαδού του πυκνωτή που μετρείται κάθε φορά (50x50μm, 100x100μm, 200x200μm, 400x400μm).

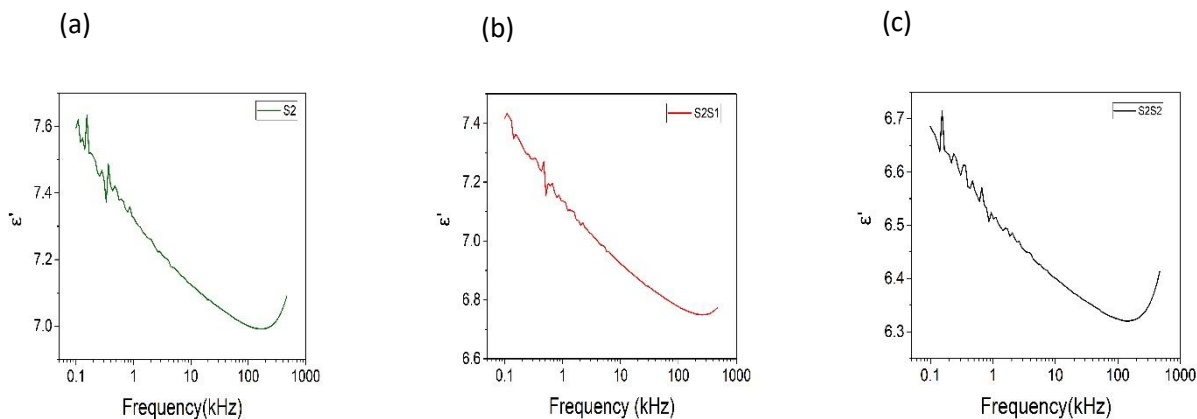


Διάγραμμα 5.7 Διαγράμματα μέγιστης χωρητικότητας συνάρτησή εμβαδού για το (α) Δείγμα S2, (β) S2S1, (γ) S2S2

Παρατηρείται όπως αναμένεται ότι η χωρητικότητα έχει γραμμική σχέση με το εμβαδόν για όλα τα δείγματα.

5.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπίας εμπέδησης

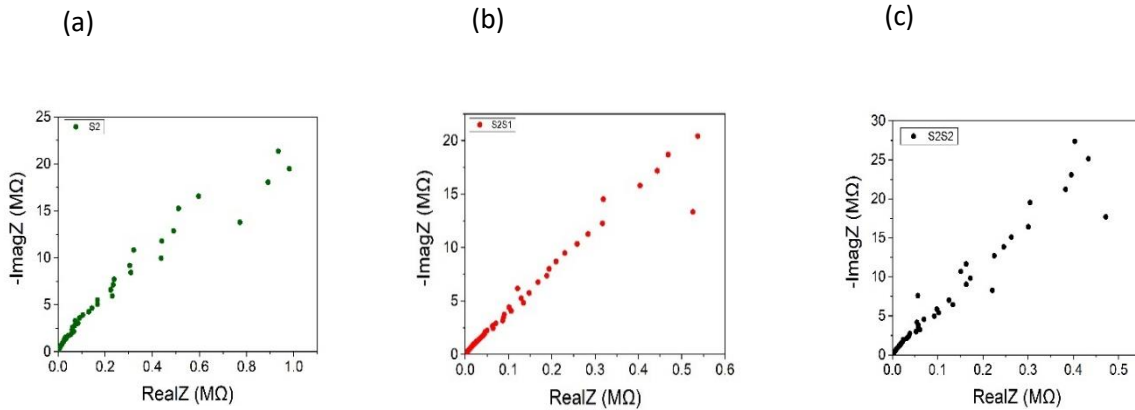
Αρχικά παρουσιάζονται διαγράμματα του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς όπως υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις των τιμών της πραγματικού και του φανταστικού μέρους της εμπέδησης. Οι τιμές της συχνότητας που εφαρμόστηκαν είναι από 100Hz έως 1MHz.



Διάγραμμα 5 8 Διαγράμματα πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς συνάρτησή της συχνότητας για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2

Παρατηρείται πως το δείγμα S2 εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς και ακολουθεί το δείγμα S2S1 και έπειτα το δείγμα S2S2, κάτι το οποίο συμφωνεί με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τα δείγματα SNT, SNTST1, SNTST2 που έχουν ίδια στοιχειομετρία αντίστοιχα με τα δείγματα S2,S2S1,S2S2.

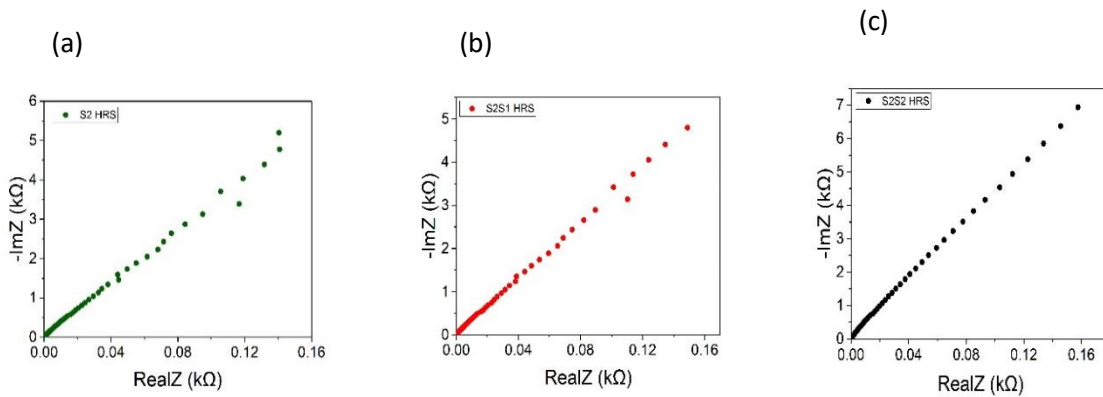
Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα διαγράμματα του φανταστικού μέρους της εμπέδησης συνάρτησή του πραγματικού μέρους της εμπέδησης. Αρχικά για την περίπτωση που τα δείγματα είναι fresh, και δεν έχουν επέλθει στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS) ή στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS).



Διάγραμμα 5.9 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης για τα fresh δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.

Παρατηρείται πως ειδικά στις χαμηλές συχνότητες ακολουθείται γραμμική συμπεριφορά από όλα τα δείγματα, ενώ στις υψηλότερες τιμές συχνότητας τα σημεία είναι κάπως πιο διεσπαρμένα.

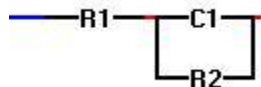
Ακολουθούν τα διαγράμματα για φανταστικού-πραγματικού μέρους της εμπέδησης για τα ίδια δείγματα ενώ βρίσκονται στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS).



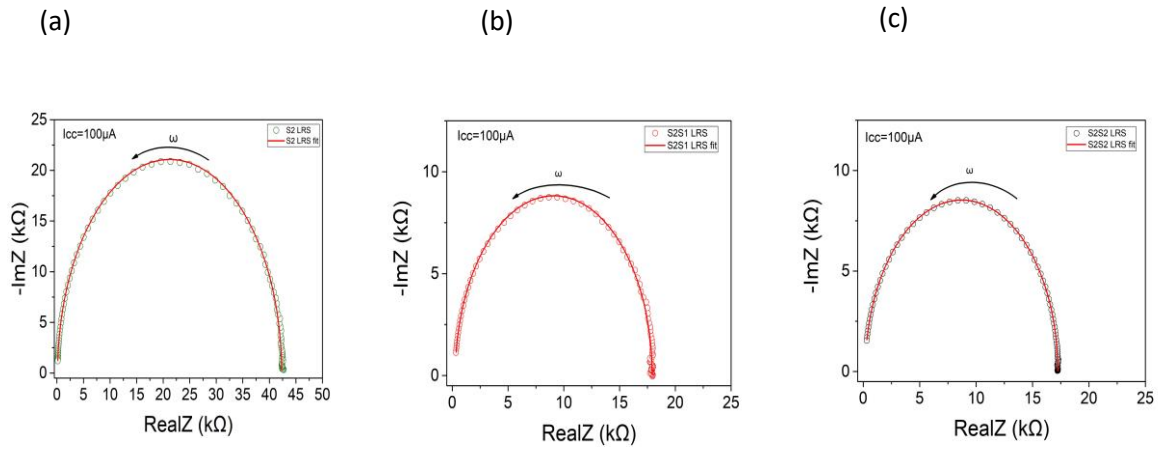
Διάγραμμα 5.10 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2 ενώ έχουν επέλθει στην κατάσταση υψηλής αντίσταση (HRS).

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως ακολουθείται γραμμική συμπεριφορά σε όλο το εύρος συχνοτήτων.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους της αντίστασης όταν τα δείγματα βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS). Επιπλέον στα συγκεκριμένα διαγράμματα έχει πραγματοποιηθεί fitting δεδομένων όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα EIS Analyzer, στο οποίο τοποθετούνται τα πειραματικά δεδομένα και πραγματοποιείται προσομοίωση με το αντίστοιχο μοντέλο που επιλέγεται (σχήμα 5.1).



Σχήμα 5 1 Μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε.



Διάγραμμα 5 11 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα προσομοίωσης EIS Analyzer, και από τα πειραματικά δεδομένα για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2 καθώς έχουν επέλθει στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS).

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν με τα δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση με το αντίστοιχο μοντέλο, για το fitting χρησιμοποιείται το μοντέλο Newton. Επίσης παρατηρείται ότι σε όλα τα δείγματα στα διαγράμματα εμφανίζεται το χαρακτηριστικό ημικύκλιο που αναμένεται από την βιβλιογραφία.

Επίσης από το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης λαμβάνουμε τις τιμές των αντιστάσεων και του πυκνωτή (Σχ. 5.1) του μοντέλου προσομοίωσης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αυτές οι τιμές, καθώς και η συχνότητα για την οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του φανταστικού μέρους της εμπέδησης.

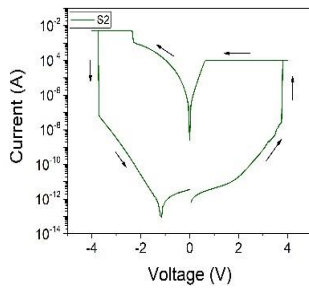
	S2	S2S1	S2S2
C1(pF)	2.73E+02	2.93E+02	2.13E+02
R1(Ohm)	132.57	271.49	173.37
R2(Ohm)	4226	17652	17069
f(Hz) at max ImagZ	1.36E+04	2.96E+04	4.56E+04

Πίνακας 5 4 Τιμές αντίστοιχου μοντέλου προσομοίωσης.

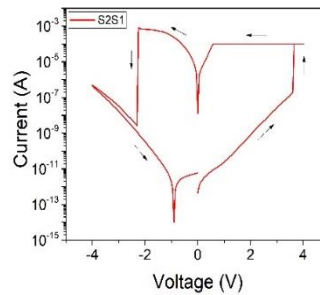
5.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων ρεύματος-τάσης (I-V)

Αρχικά παρουσιάζονται διαγράμματα ρεύματος- τάσης ενδεικτικά για τα τρία συγκεκριμένα διαγράμματα. Τα ρεύματα περιορισμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά το set είναι $I_{cc} = 100\mu A$ και κατά το reset $I_{cc} = 10mA$.

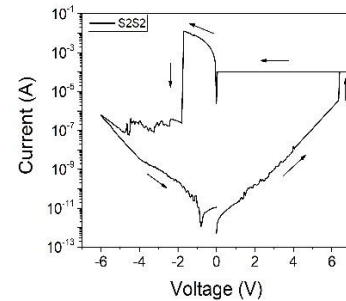
(a)



(b)



(c)



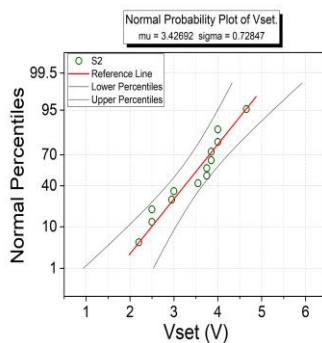
Διάγραμμα 5 12 Διαγράμματα ρεύματος-τάσης για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.

Παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά διαγράμματα ρεύματος-τάσης όπως αναμενόταν. Η τιμή του ρεύματος αυξάνεται και ελαττώνεται απότομα καθώς τα δείγματα μεταβαίνουν στην κατάσταση χαμηλής και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα, καθώς σαρώνουμε για θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων.

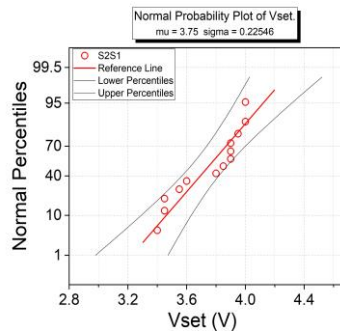
5.2.3.1 Στατιστικά διαγράμματα V_{set} , V_{reset}

Εν συνέχεια, παρουσιάζονται στατιστικά διαγράμματα που προέκυψαν από το σύνολο δεκατριών τιμών τάσεων κατά τις οποίες πραγματοποιείται SET και RESET στα δείγματα

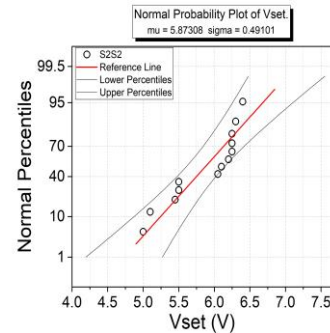
(a)



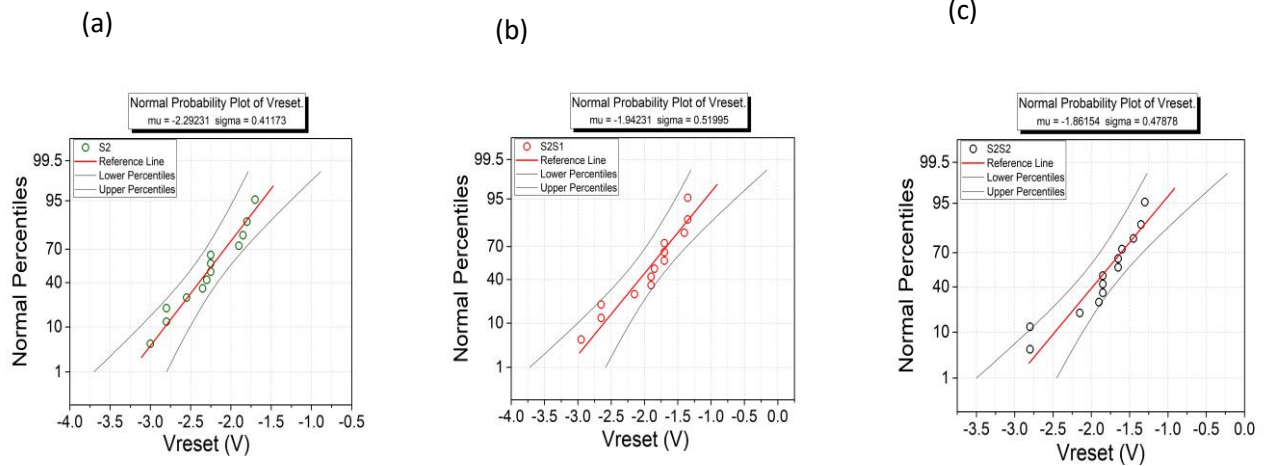
(b)



(c)



Διάγραμμα 5 13 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές V_{set} που προκύπτουν για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.



Διάγραμμα 5 14 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές V_{reset} που προκύπτουν για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για τις μέσες τιμές των τιμών τάσεων που πραγματοποιούν set και reset τα δείγματα.

	S2	S2S1	S2S2
Vset	3.43	3.75	5.87
Vreset	-2.29	-1.94	-1.86

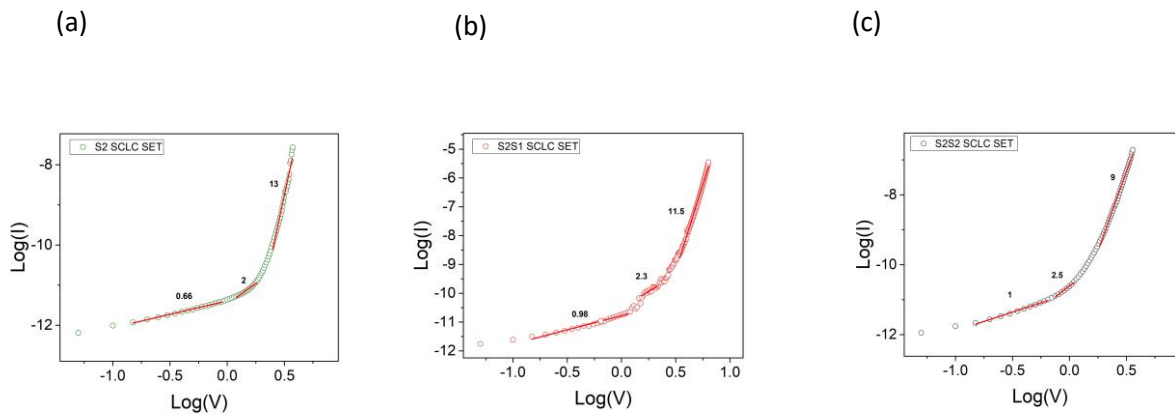
Πίνακας 5 5 Μέσες τιμές Vset & Vreset.

Παρατηρείται πως σε μεγαλύτερες τιμές τάσεων πραγματοποιεί set το δείγμα S2S2, ενώ ακολουθεί το δείγμα S2S1 και τέλος το δείγμα S2. Ακόμα παρατηρείται πως για τις τιμές V_{reset} ακολουθείται η αντίθετη σειρά, δηλαδή για μεγαλύτερες τιμές τάσεων πραγματοποιεί reset το δείγμα S2, ακολουθεί το δείγμα S2S1, και τέλος το δείγμα S2S2.

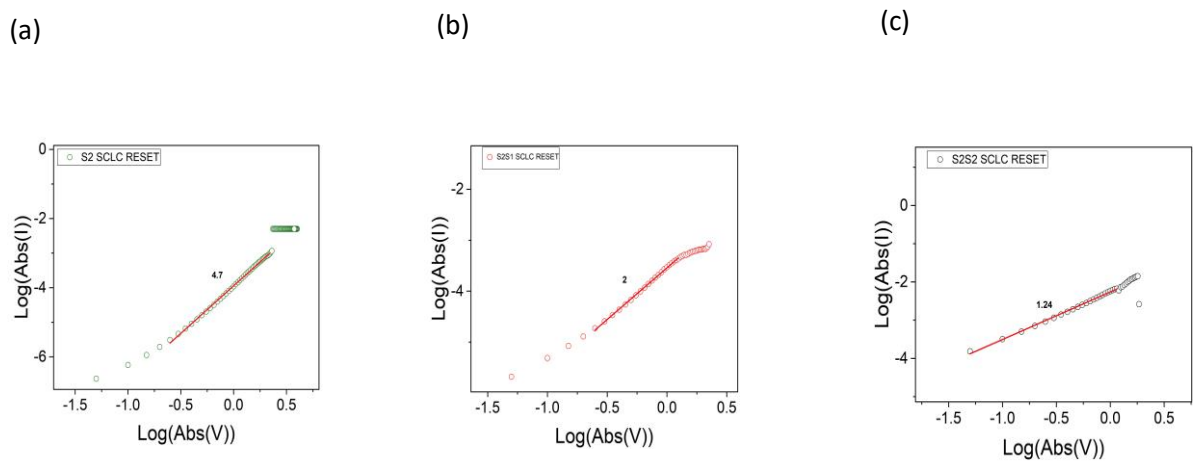
5.2.3.2 Μηχανισμοί αγωγιμότητας

Από τα διαγράμματα ρεύματος-τάσης που παρουσιάστηκαν αρχικά προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις των μηχανισμών αγωγιμότητας που εμφανίζονται καθώς οι αντιστάτες πραγματοποιούν set και reset και μεταβαίνουν στις καταστάσεις χαμηλής αντίστασης και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα μελετώνται οι μηχανισμοί αγωγιμότητας SCLC (space charge limited current), PF (Poole Frenkel), MSCLC (modified space charge limited current).

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τον μηχανισμό SCLC.



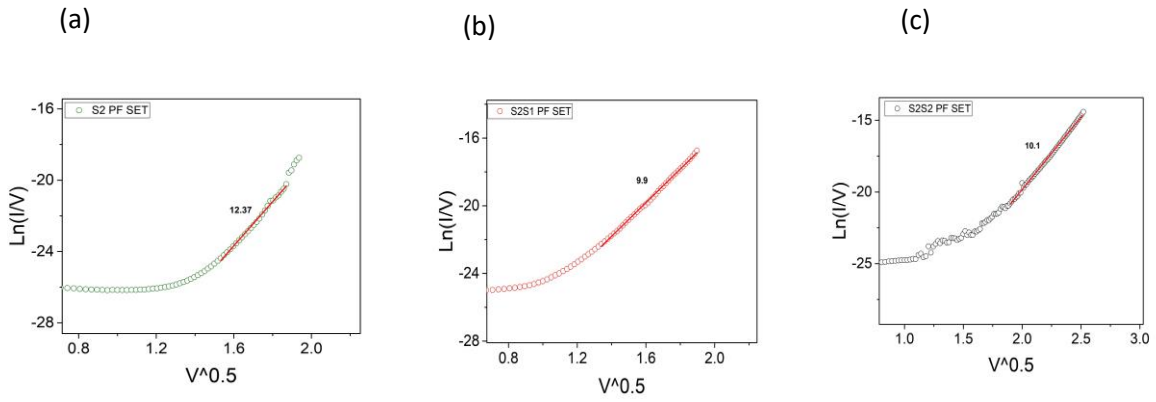
Διάγραμμα 5 15 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.



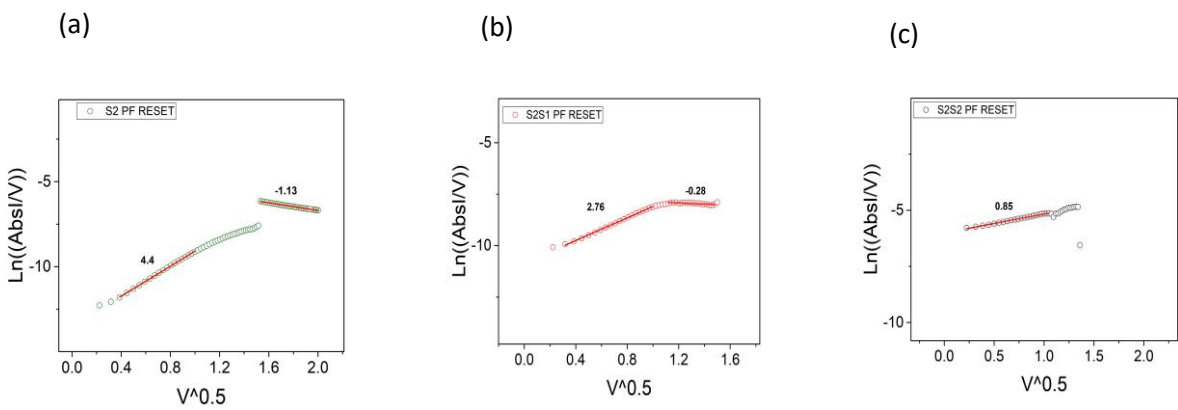
Διάγραμμα 5 16 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.

Παρατηρείται πως στα διαγράμματα που προκύπτουν καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν SET εμφανίζονται τρεις γραμμικές περιοχές με κλίσεις (α) κοντά στο ένα, (β) κοντά στο 2, (γ) μεγαλύτερη από 10, όπως αναμένεται από τον συγκεκριμένο μηχανισμό αγωγιμότητας, καθώς με βάση την βιβλιογραφία αποτελείται από τρεις περιοχές. Επίσης παρατηρείται ότι κατά το RESET εμφανίζεται ο μηχανισμός SCLC σε όλα τα δείγματα, καθώς εμφανίζονται γραμμικές περιοχές στις καμπύλες που προκύπτουν.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται διαγράμματα του μηχανισμού αγωγιμότητας Poole-Frenkel (P-F) καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν SET και RESET.



Διάγραμμα 5 17 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.

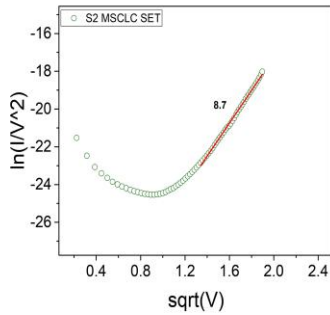


Διάγραμμα 5 18 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.

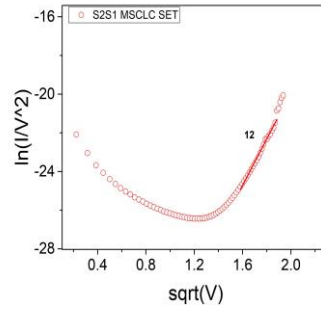
Παρατηρείται πάλι πως εμφανίζονται γραμμικές περιοχές τόσο κατά το SET όσο και κατά το RESET των δειγμάτων κάτι που δηλώνει την παρουσία του συγκεκριμένου μηχανισμού αγωγιμότητας (Poole-Frenkel).

Συνεχίζοντας, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον μηχανισμό Modified space charge limited current (MSCLC) καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν set και reset.

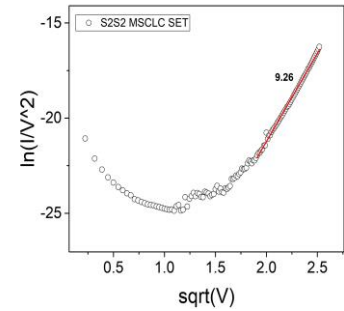
(a)



(b)

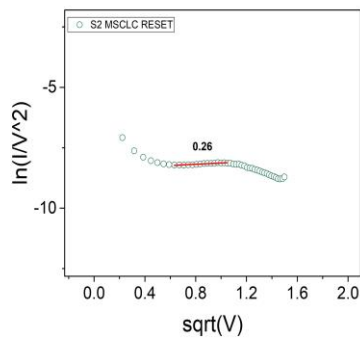


(c)

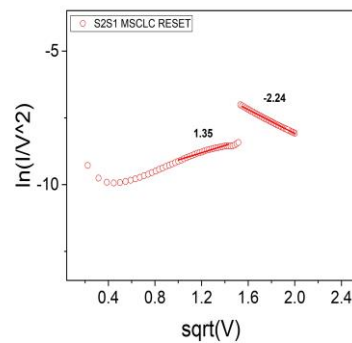


Διάγραμμα 5 19 Μηχανισμός αγωγιμότητας MSLC κατά το SET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.

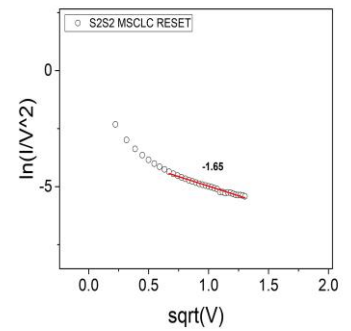
(a)



(b)



(c)

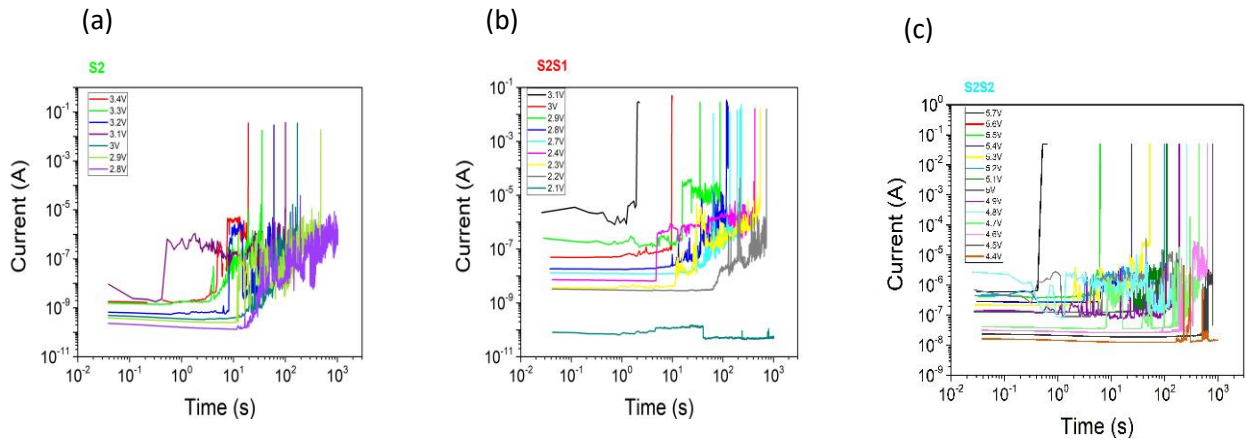


Διάγραμμα 5 20 Μηχανισμός αγωγιμότητας MSLC κατά το RESET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2S1, (c) S2S2.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι παρατηρούνται ευθύγραμμες περιοχές κάτι που υποδηλώνει την ύπαρξη του συγκεκριμένου μηχανισμού κατά το SET και το RESET των δειγμάτων.

5.2.4 Αποτελέσματα μετρήσεων κατάρρευσης φορτίου.

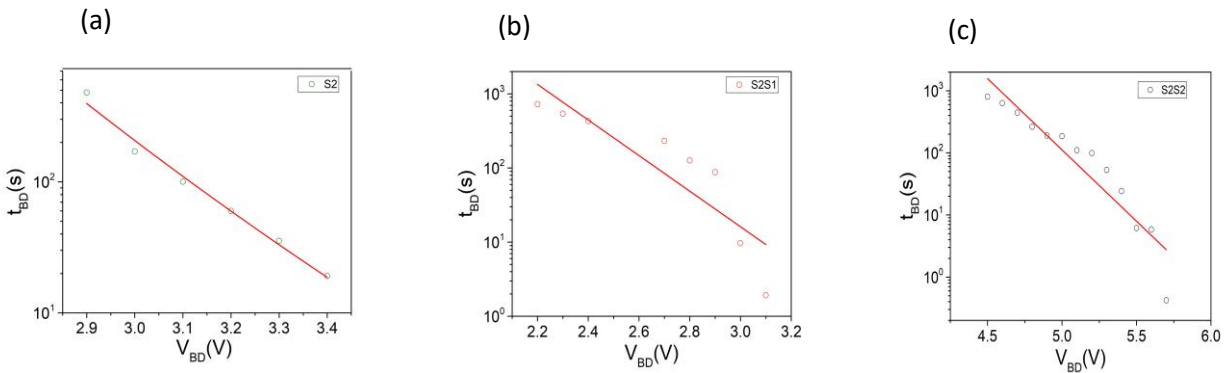
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες μετρήσεις για τα τρία δείγματα: S2,S2S1,S2S2.



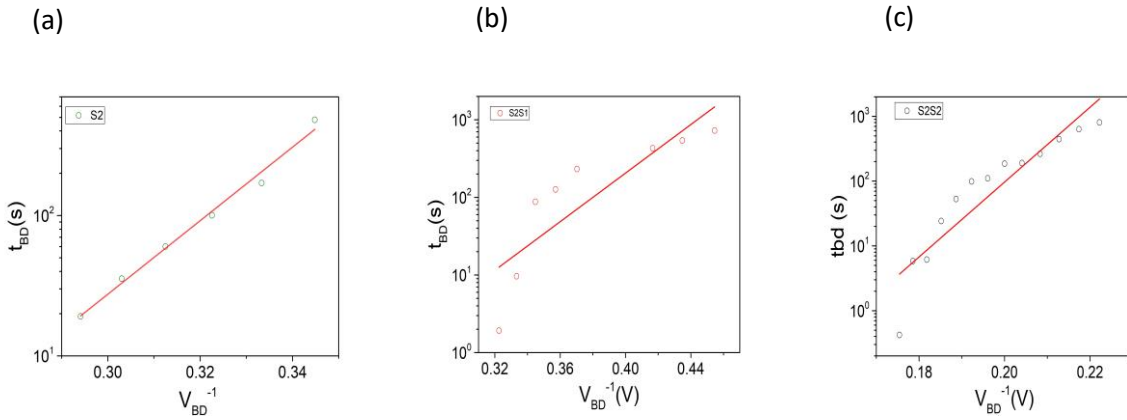
Διάγραμμα 5 21 Διαγράμματα κατάρρευσης φορτίου για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.

Παρατηρείται όπως αναμενόταν ότι καθώς μειώνεται η σταθερή τάση που εφαρμόζεται αυξάνεται ο χρόνος που χρειάζεται για να επέλθει κατάρρευση στα δείγματα και να εμφανιστεί απότομη αύξηση του ρεύματος. Οι τιμές του χρόνου που χρησιμοποιούνται είναι από μερικά second, μέχρι 1000 second.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται διαγράμματα του χρόνου που πραγματοποιείται η κατάρρευση συνάρτησή της εφαρμοζόμενης τάσης ($t_{BD}-V_{BD}$) και της αντίστροφης τιμής της τάσης ($t_{BD}-V_{BD}^{-1}$).



Διάγραμμα 5 22 Διαγράμματα $t_{BD}-V_{BD}$ για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.



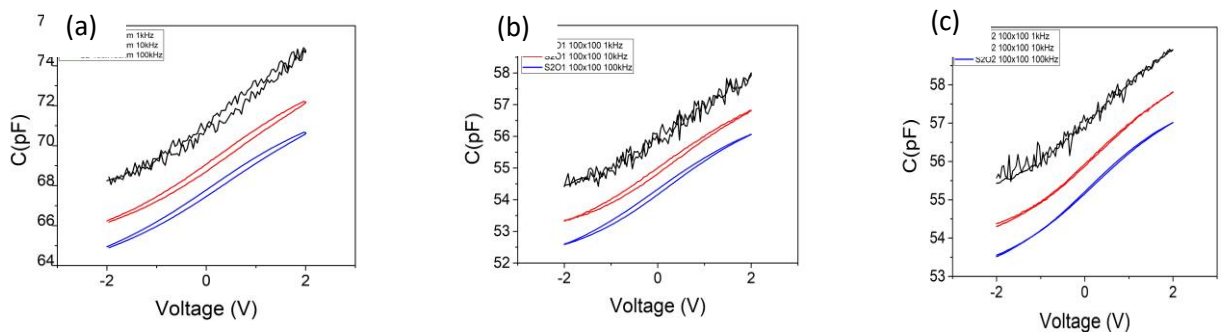
Διάγραμμα 5 23 Διαγράμματα $t_{BD}-V_{BD}^{-1}$ για τα δείγματα (α) S2, (β) S2S1, (γ) S2S2.

5.3 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικού χαρακτηρισμού δειγμάτων S2,S2O1,S2O2

Υπενθυμίζεται πως το στρώμα νιτριδίου του πυριτίου στα δείγματα S2O1, S2O2 έχει κατασκευαστεί με τις ίδιες συνθήκες με το δείγμα S2 (δηλαδή ροές H_2SiCl_2 , NH_4 60 και 20sccm αντίστοιχα), και η διαφορά έγκειται στο γεγονός πως έχει προστεθεί οξυγόνο πάνω από το στρώμα του νιτριδίου του πυριτίου.

5.3.1 Αποτελέσματα μετρήσεων χωρητικότητας-τάσης (C-V)

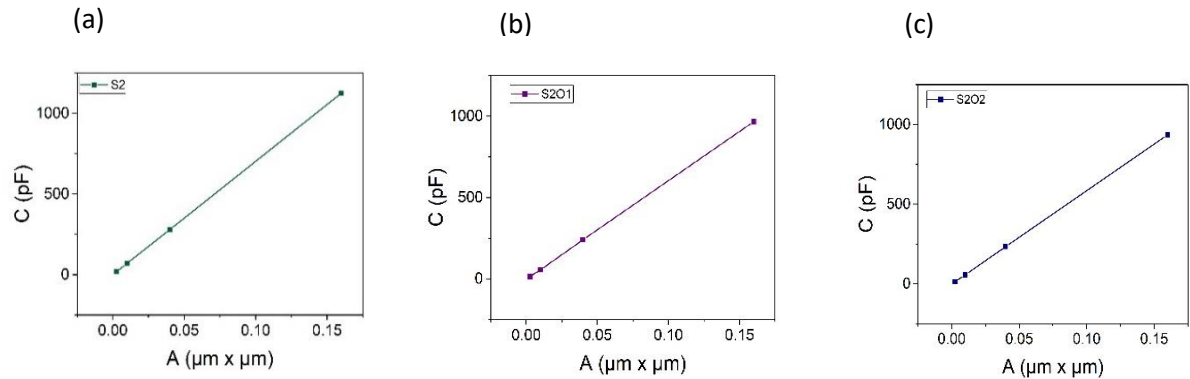
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις χωρητικότητας συναρτήσει της τάσης για τα δείγματα S2,S2S1,S2S2 για διαφορετικές συχνότητες σήματος (1,10,100kHz) εναλλασσόμενης τάσης (100mV) που προστίθεται στην συνεχή τάση με άκρα -3V έως 3V.



Διάγραμμα 5 24 Μετρήσεις C-V για διαφορετικές συχνότητες για το δείγμα (α) S2, (β) Αντίστοιχα για το S2O1, (γ) Αντίστοιχα για το δείγμα S2O2.

Παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η συχνότητα του σήματος της εναλλασσόμενης τάσης μειώνεται η μετρούμενη χωρητικότητα για όλα τα δείγματα. Επίσης παρατηρείται πως καθώς προστίθεται οξυγόνο οι τιμές της χωρητικότητας μειώνονται, το δείγμα S2O1 εμφανίζει μικρότερη χωρητικότητα από το δείγμα S2, και αντίστοιχα το δείγμα S2O2 εμφανίζει ελάχιστα μικρότερες τιμές από το δείγμα S2O1.

Κατόπιν παρουσιάζονται διαγράμματα τις μέγιστης χωρητικότητας που εμφανίζει κάθε από τα παραπάνω τρία δείγματα, συνάρτησή του εμβαδού του πυκνωτή που μετριέται κάθε φορά.

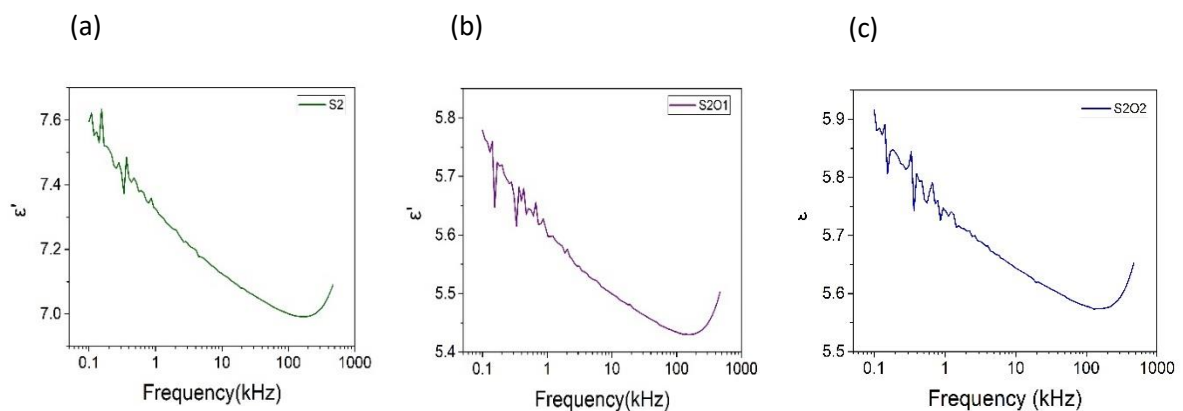


Διάγραμμα 5 25 Διαγράμματα μέγιστης χωρητικότητας συνάρτησή εμβαδού για (a) Δείγμα S2, (b) S2O1, (c) S2O2.

Παρατηρείται πάλι όπως αναμένεται ότι τα διαγράμματα ακολουθούν ευθεία, δηλαδή ότι η χωρητικότητα εμφανίζει γραμμική σχέση με το εμβαδόν.

5.3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοσκοπίας εμπέδησης

Αρχικά παρουσιάζονται διαγράμματα του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς όπως υπολογίστηκαν από τα αποτελέσματα των τιμών της πραγματικού και του φανταστικού μέρους της εμπέδησης

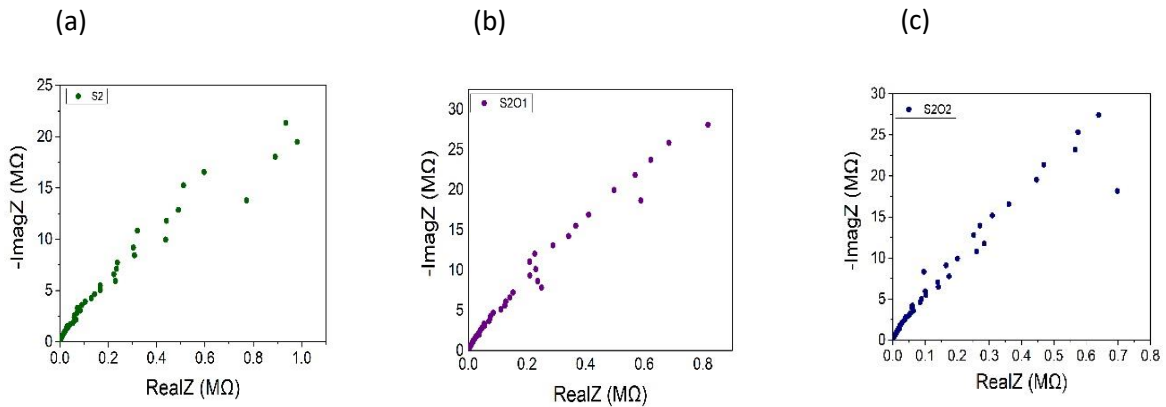


Διάγραμμα 5 26 Διαγράμματα πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς συναρτήσης της συχνότητας για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.

Παρατηρείται πως οι τιμές της ϵ' μειώνονται περίπου κατά δυο μονάδες στα δείγματα S2O1,S2O2 σε σχέση με το δείγμα S2.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα διαγράμματα του φανταστικού μέρους της εμπέδησης συναρτήση του πραγματικού μέρους της εμπέδησης. Αρχικά για την περίπτωση που τα δείγματα είναι fresh, και δεν

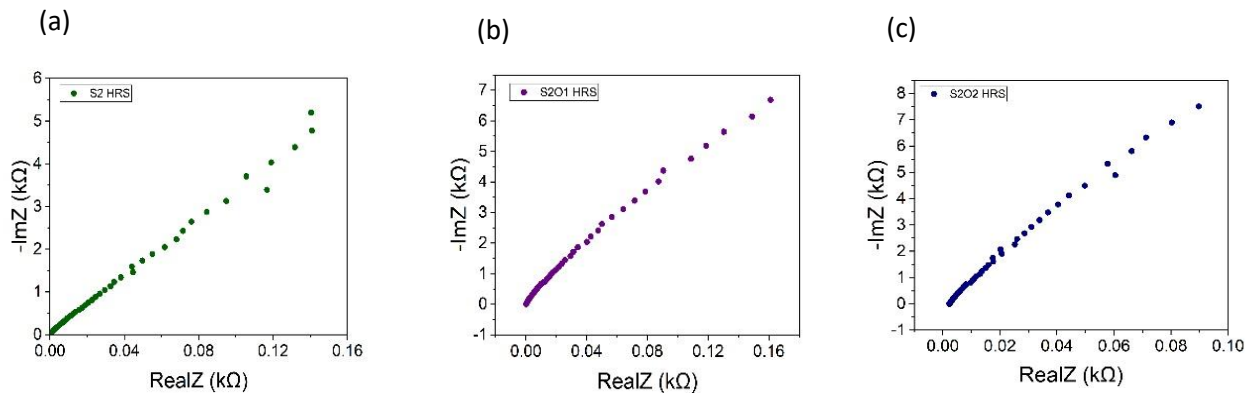
έχουν επέλθει στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS) ή στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS).



Διάγραμμα 5 27 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης για τα fresh δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2

Όπως και στην παρουσίαση των προηγούμενων δειγμάτων παρατηρείται ότι το φανταστικό μέρος της εμπέδησης εμφανίζει γραμμική σχέση με το πραγματικό μέρος της εμπέδησης.

Ακολουθούν τα διαγράμματα για φανταστικού-πραγματικού μέρους της εμπέδησης για τα ίδια δείγματα ενώ βρίσκονται στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS).



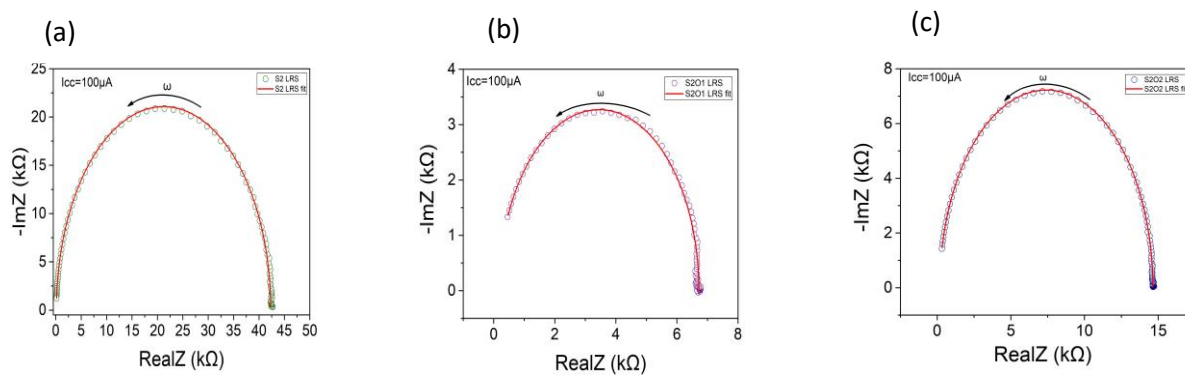
Διάγραμμα 5 28 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους της εμπέδησης για τα δείγματα στην κατάσταση HRS (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2

Και στα συγκεκριμένα διαγράμματα εμφανίζεται γραμμική σχέση μεταξύ των δυο ποσοτήτων.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους της αντίστασης όταν τα δείγματα βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS). Επιπλέον στα



συγκεκριμένα διαγράμματα έχει πραγματοποιηθεί fitting δεδομένων όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα EIS Analyzer, στο οποίο τοποθετούνται τα πειραματικά δεδομένα και πραγματοποιείται προσομοίωση με το αντίστοιχο μοντέλο που επιλέγεται (σχήμα 5.1).



Διάγραμμα 5 29 Διαγράμματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα προσομοίωσης EIS Analyzer, και από τα πειραματικά δεδομένα για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν με τα δεδομένα από το αντίστοιχο μοντέλο. Επίσης το δείγμα S2 (χωρίς την προσθήκη οξυγόνου) εμφανίζει τις πιο υψηλές τιμές σε σχέση με τα υπόλοιπα δυο δείγματα, ακολουθεί το δείγμα S2O2, και τέλος το δείγμα S2O1.

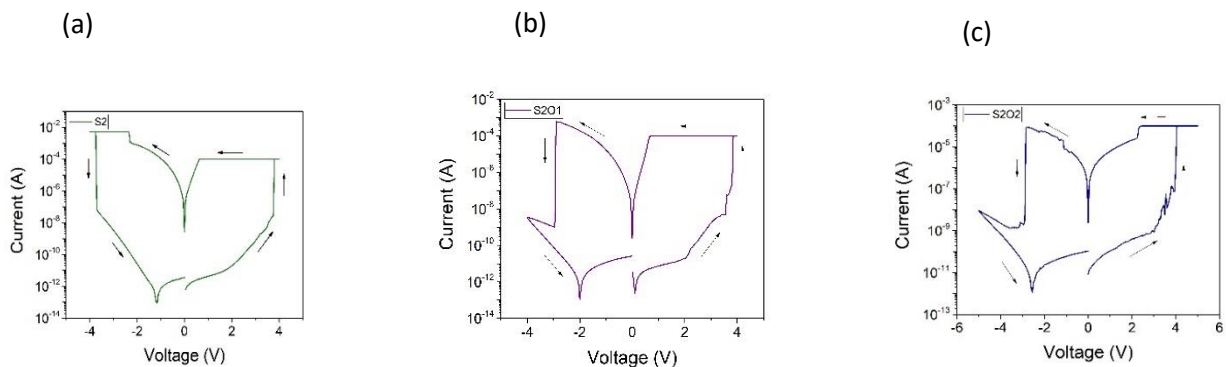
Επίσης από το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοίωσης λαμβάνουμε τιμές των αντιστάσεων και του πυκνωτή (Σχ. 5.2) του μοντέλου προσομοίωσης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αυτές οι τιμές, καθώς και η συχνότητα για την οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του φανταστικού μέρους της εμπέδησης.

	S2	S2O1	S2O2
C1(pF)	2.73E+02	2.39E+02	2.30E+02
R1(Ohm)	132.57	170.45	181.51
R2(Ohm)	4226	6542.4	14456
f(Hz) at max ImagZ	1.36E+04	9.98E+04	4.97E+04

Πίνακας 5 6 Τιμές αντίστοιχου μοντέλου προσομοίωσης.

5.3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων ρεύματος-τάσης (I-V)

Αρχικά παρουσιάζονται διαγράμματα ρεύματος- τάσης ενδεικτικά για τα τρία συγκεκριμένα διαγράμματα

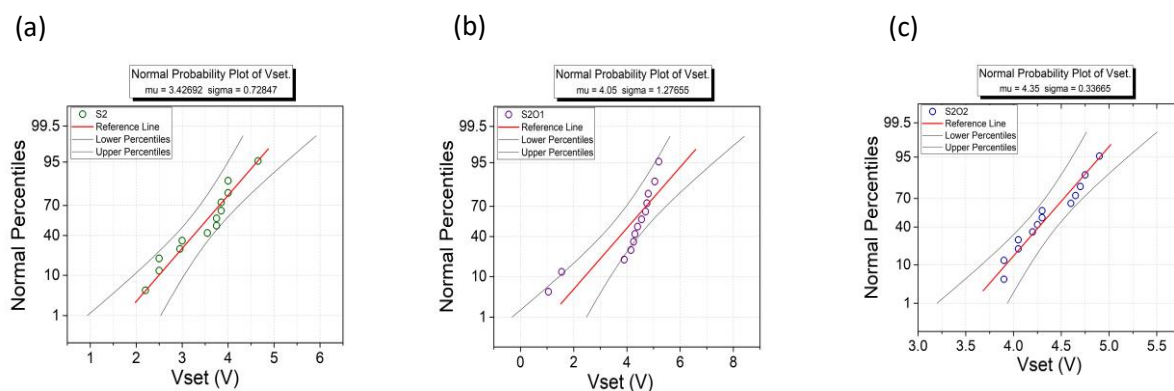


Διάγραμμα 5 30 Διαγράμματα ρεύματος-τάσης για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.

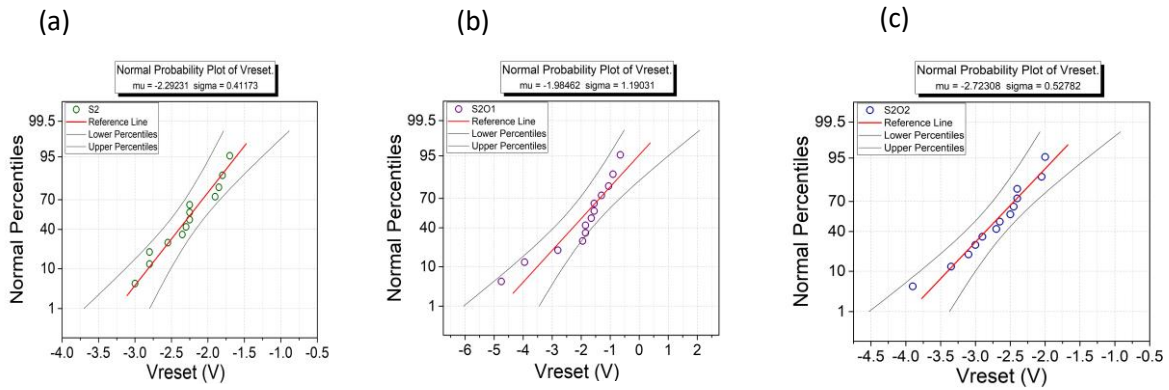
Παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά διαγράμματα ρεύματος-τάσης όπως αναμενόταν. Η τιμή του ρεύματος αυξάνεται και ελαττώνεται αντίστοιχα καθώς τα δείγματα μεταβαίνουν στην κατάσταση χαμηλής και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα, καθώς σαρώνουμε για θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων.

5.3.3.1 Στατιστικά διαγράμματα V_{set} , V_{reset}

Εν συνέχεια, παρουσιάζονται στατιστικά διαγράμματα που προέκυψαν από το σύνολο δεκατριών τιμών τάσεων κατά τις οποίες πραγματοποιείται SET και RESET στα δείγματα.



Διάγραμμα 5 31 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές V_{set} που προκύπτουν για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2



Διάγραμμα 5 32 Στατιστικά διαγράμματα για τις τιμές V_{reset} που προκύπτουν για τα δείγματα (a) S2, (b) S201, (c) S202.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για τις μέσες τιμές των τιμών τάσεων που πραγματοποιούν set και reset τα δείγματα.

Παρατηρείται πως καθώς προστίθεται οξυγόνο στο στρώμα νιτρίδιου του πυριτίου στα παραπάνω δείγματα αυξάνεται η τιμή της τάσης που πραγματοποιούν set.

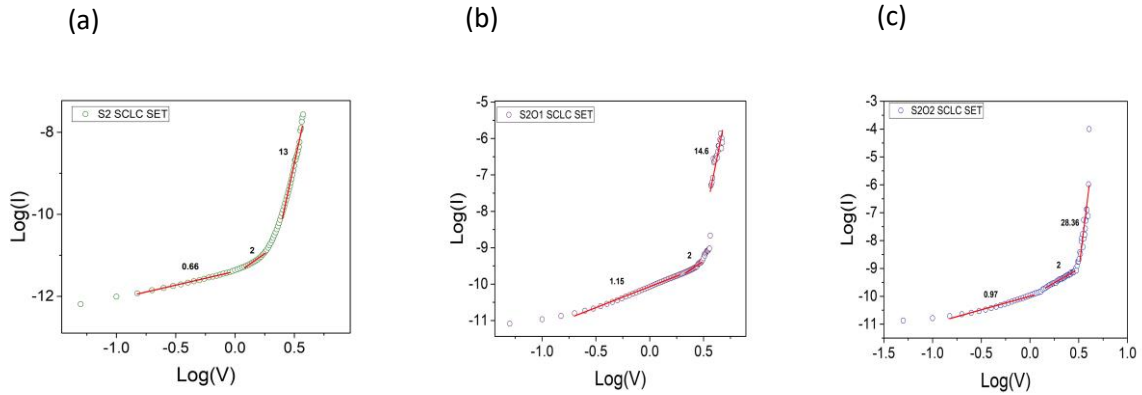
	S2	S201	S202
Vset	3.43	4	4.35
Vreset	-2.29	-1.98	-2.72

Πίνακας 5 7 Μέσες τιμές V_{set} & V_{reset} .

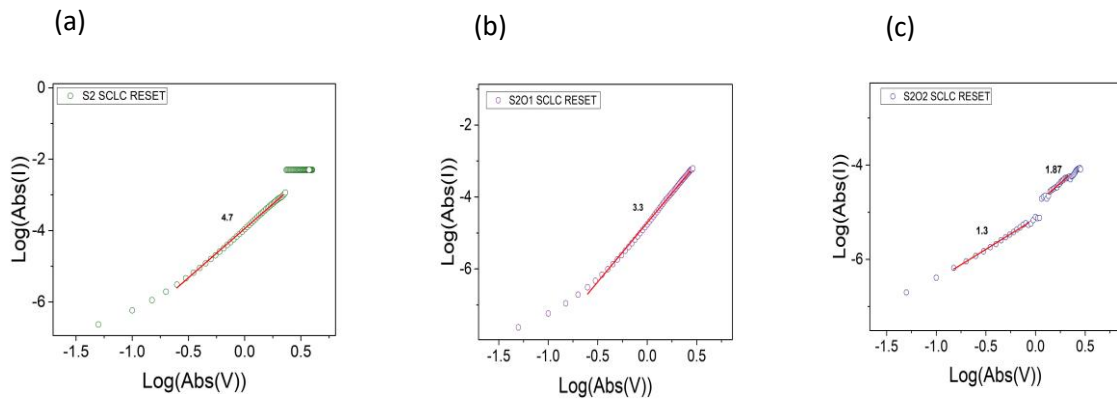
5.3.3.2 Μηχανισμοί αγωγιμότητας

Από τα διαγράμματα ρεύματος-τάσης που παρουσιάστηκαν αρχικά προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις των μηχανισμών αγωγιμότητας που εμφανίζονται καθώς οι αντιστάτες πραγματοποιούν set και reset και μεταβαίνουν στις καταστάσεις χαμηλής αντίστασης και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα μελετώνται οι μηχανισμοί αγωγιμότητας SCLC (space charge limited current), PF (Poole Frenkel), MSCLC (modified space charge limited current).

Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τον μηχανισμό SCLC.



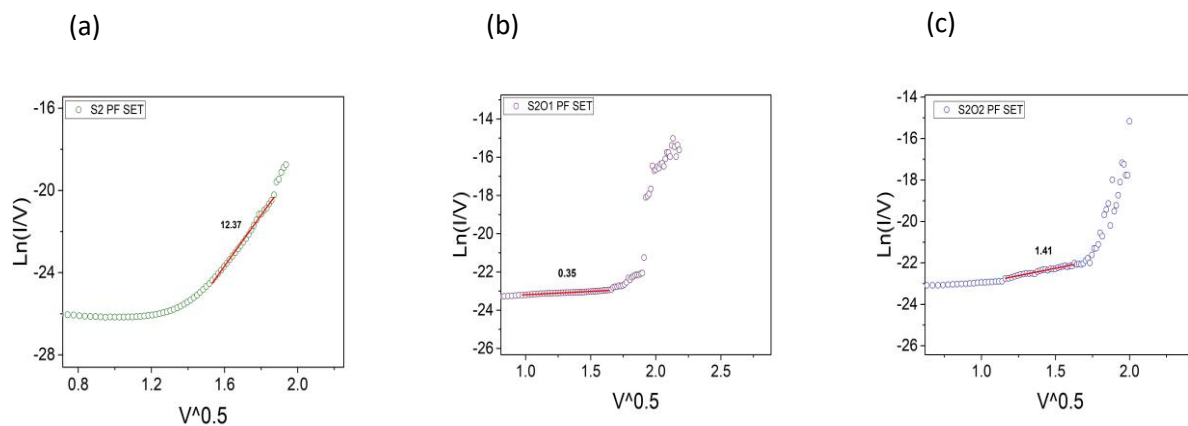
Διάγραμμα 5.33 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το SET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.



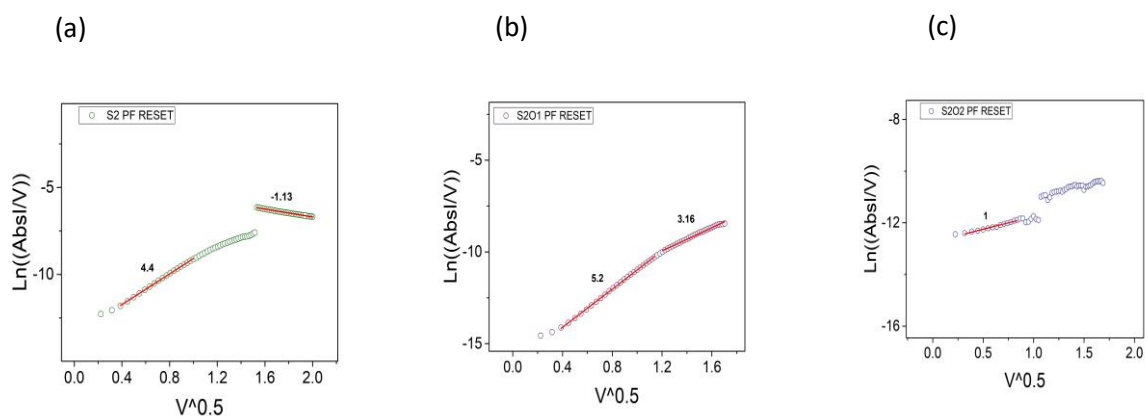
Διάγραμμα 5.34 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας SCLC κατά το RESET για τα δείγματα (a) S2, (b) S2O1, (c) S2O2.

Παρατηρείται πως τα διαγράμματα που προκύπτουν καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν SET κατά τον συγκεκριμένο μηχανισμό αγωγιμότητας εμφανίζονται τρεις γραμμικές περιοχές με κλίσεις (a) κοντά στο ένα, (b) κοντά στο 2, (c) μεγαλύτερη από 10, όπως αναμένεται από τον συγκεκριμένο μηχανισμό αγωγιμότητας, καθώς με βάση την βιβλιογραφία αποτελείται από τρεις περιοχές. Επίσης παρατηρείται ότι κατά το RESET εμφανίζεται ο μηχανισμός SCLC σε όλα τα δείγματα, καθώς παρατηρούνται γραμμικές περιοχές.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται διαγράμματα του μηχανισμού αγωγιμότητας Poole-Frenkel (P-F) καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν SET και RESET.



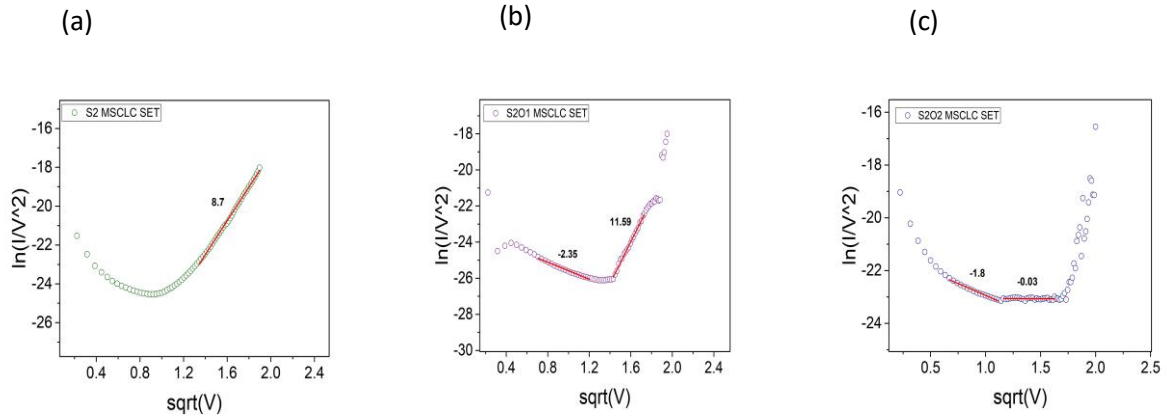
Διάγραμμα 5 35 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2.



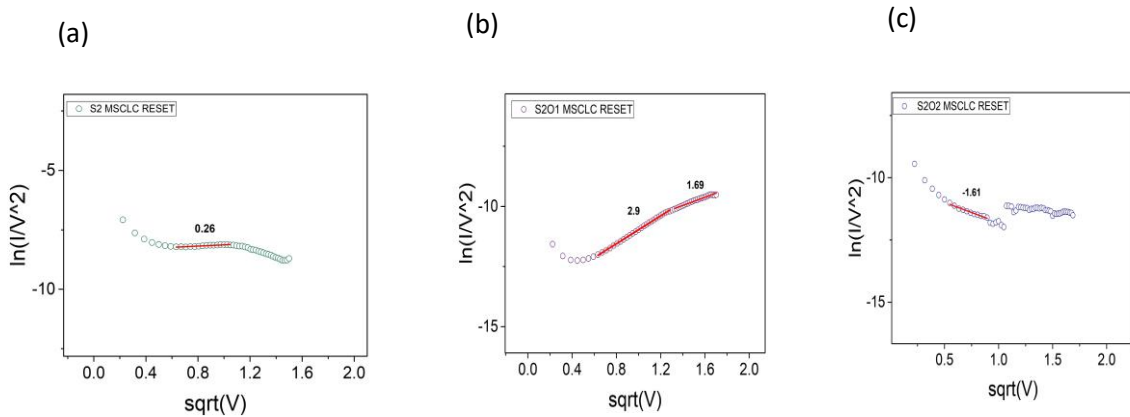
Διάγραμμα 5 36 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας PF κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2.

Παρατηρείται πως ο συγκεκριμένος μηχανισμός λαμβάνει χώρα καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν set και reset, καθώς εμφανίζονται γραμμικές περιοχές στα αντίστοιχα διαγράμματα.

Συνεχίζοντας, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τον μηχανισμό Modified space charge limited current (MSCLC) καθώς τα δείγματα πραγματοποιούν set και reset.



Διάγραμμα 5 37 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας MSCLC κατά το SET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2.

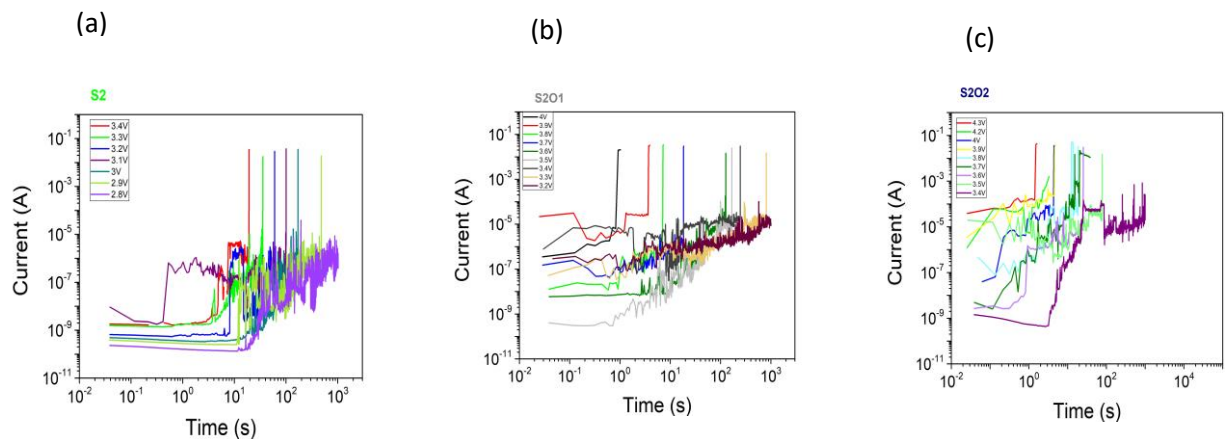


Διάγραμμα 5 38 Διαγράμματα μηχανισμού αγωγιμότητας MSCLC κατά το RESET για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2.

Τέλος, παρατηρείται πως εμφανίζονται γραμμικές περιοχές σε όλα τα δείγματα και για τις δυο περιπτώσεις, κάτι που σημαίνει πως λαμβάνει χώρα ο συγκεκριμένος μηχανισμός.

5.2.4 Αποτελέσματα μετρήσεων κατάρρευσης φορτίου.

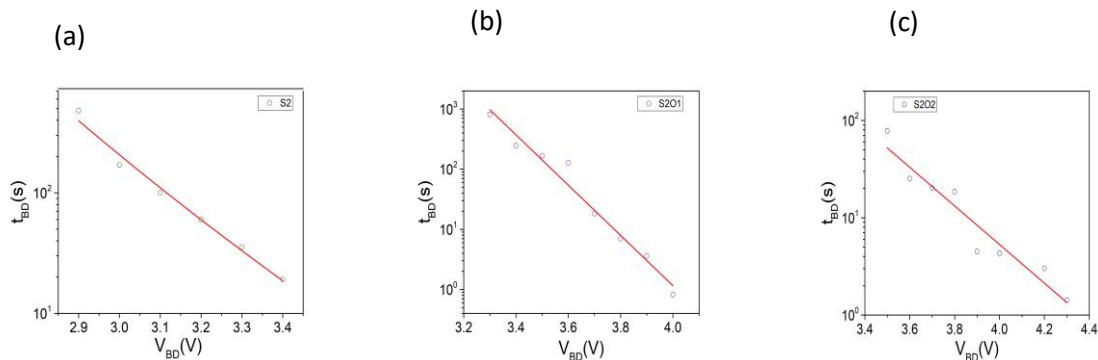
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις συγκεκριμένες μετρήσεις κατάρρευσης φορτίου (ρεύμα συναρτήση του χρόνου) για τα τρία δείγματα: S2,S2S1,S2S2.



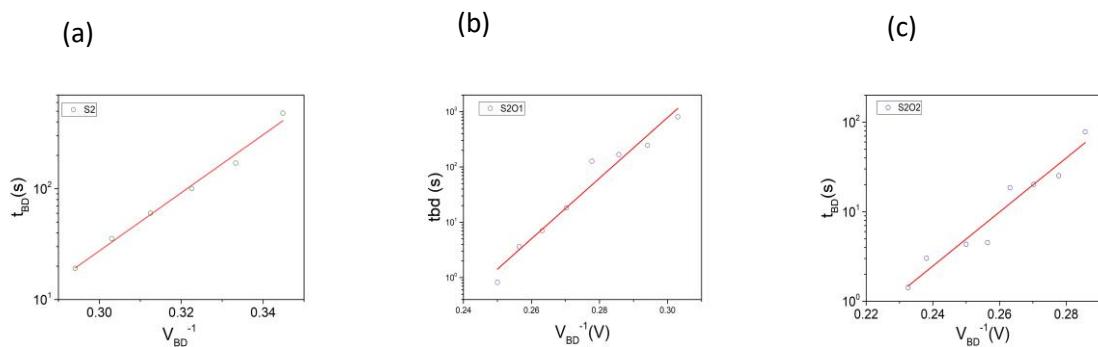
Διάγραμμα 5 39 Διαγράμματα κατάρρευσης φορτίου για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2

Παρατηρείται όπως αναμενόταν ότι καθώς μειώνεται η σταθερή τάση που εφαρμόζεται αυξάνεται ο χρόνος που χρειάζεται για να επέλθει κατάρρευση στα δείγματα και να εμφανιστεί απότομη αύξηση του ρεύματος.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται διαγράμματα του χρόνου που πραγματοποιείται η κατάρρευση συνάρτησή της εφαρμοζόμενης τάσης ($t_{BD}-V_{BD}$) και της αντίστροφης τιμής της τάσης ($t_{BD}-V_{BD}^{-1}$).



Διάγραμμα 5 40 Διαγράμματα $t_{BD}-V_{BD}$ για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2.



Διάγραμμα 5 41 Διαγράμματα $t_{BD}-V_{BD}^{-1}$ για τα δείγματα (α) S2, (β) S2O1, (γ) S2O2.

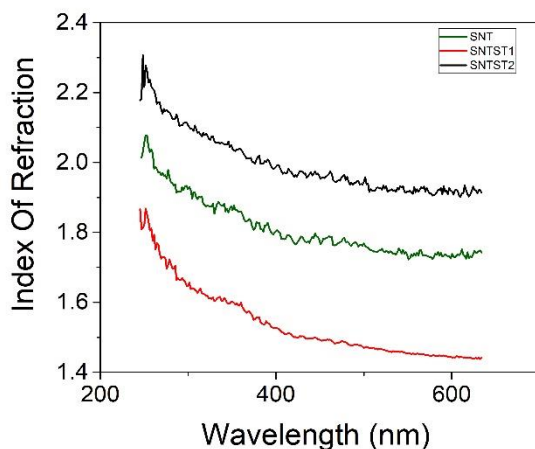
5.4 Συγκριτικά αποτελέσματα μετρήσεων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται διαγράμματα που προέκυψαν από μετρήσεις ηλεκτρικού και οπτικού χαρακτηρισμού κατά τα οποία πραγματοποιείται σύγκριση αρχικά των αρχικών δειγμάτων που μελετήθηκαν (SNT,SNTST1,SNTST2) και έπειτα των δειγμάτων των αντιστατών.

5.4.1 Συγκριτικά αποτελέσματα δειγμάτων SNT,SNTST1,SNTST2.

Αρχικά παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα για τους πυκνωτές SNT, SNTST1, SNTST2 (οι οποίοι αποτέλεσαν βάση για την κατασκευή των δειγμάτων των αντιστατών) όπως αναφέρθηκε.

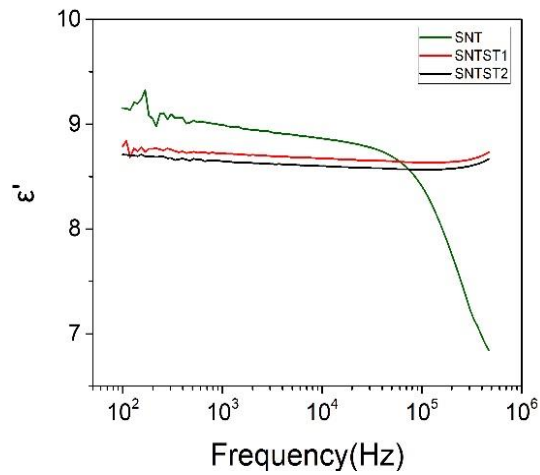
Αρχικά παρουσιάζονται διαγράμματα του δείκτη διάθλασης συνάρτησή του μήκους κύματος για τα τρία αυτά δείγματα από τα δεδομένα που προέκυψαν από την ελλειψομετρία.



Διάγραμμα 5 42 Συγκριτικό διάγραμμα δείκτη διάθλασης για τα δείγματα SNT,SNTST1,SNTST2.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως υψηλότερες τιμές εμφανίζει το δείγμα στο οποίο το νιτρίδιο του πυριτίου, έχει περισσότερη ποσότητα αζώτου σε σχέση με τα άλλα δύο δείγματα (SNTST2), ακολουθεί το δείγμα που έχει στοιχειομετρικό στρώμα νιτρίδιου του πυριτίου (SNT), και τέλος το δείγμα του οποίου το στρώμα νιτρίδιου του πυριτίου έχει την περισσότερη ποσότητα πυριτίου σε σχέση με τα άλλα δυο (SNTST1).

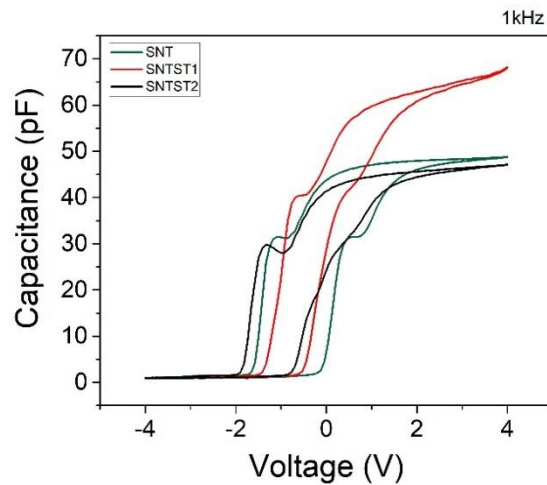
Εν συνεχεία, παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς για τα ίδια δείγματα.



Διάγραμμα 5 43 Διάγραμμα πραγματικού μέρους της διηλεκτρική σταθεράς των δειγμάτων SNT,SNTST1,SNTST2.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το δείγμα SNT εμφανίζει την υψηλότερη τιμή ϵ' σε σχέση με τα άλλα δυο δείγματα, τα δείγματα SNTST1,SNTST2 εμφανίζουν κοντινές τιμές, με το δείγμα SNTST1 να εμφανίζει ελάχιστα υψηλότερες τιμές.

Τέλος παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα της χωρητικότητας συνάρτησή της τάσης σε συχνότητα εναλλασσόμενου σήματος 1kHz.



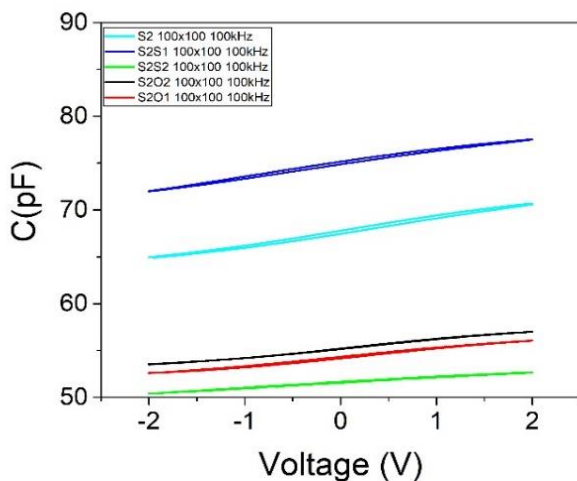
Διάγραμμα 5 44 Συγκριτικό διάγραμμα C-V.

Τα δείγματα SNT,SNTST2 εμφανίζουν κοντινές τιμές χωρητικότητας, ενώ το δείγμα SNTST1 εμφανίζει υψηλότερες τιμές χωρητικότητας σε σχέση με τα άλλα δυο.

5.4.2 Συγκριτικά αποτελέσματα δειγμάτων S2,S2S1,S2S2,S2O1,S2O2

5.4.2.1 Συγκριτικά αποτελέσματα C-V, ϵ' -f, I-V

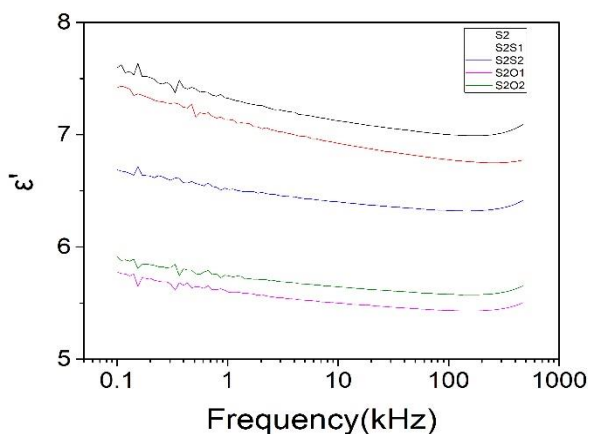
Αρχικά παρουσιάζεται διάγραμμα με όλες τις καμπύλες χωρητικότητας-τάσης που προέκυψαν για όλα τα δείγματα για συχνότητα του εναλλασσόμενου σήματος στα 100kHz, και για εμβαδόν 100x100 μ m.



Διάγραμμα 5 45 Συγκριτικό διάγραμμα C-V.

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι υψηλότερες τιμές εμφανίζει το δείγμα S2O2, ακολουθεί το δείγμα S2, έπειτα το δείγμα S2S1, και τέλος τα δείγματα S2O1 και S2.

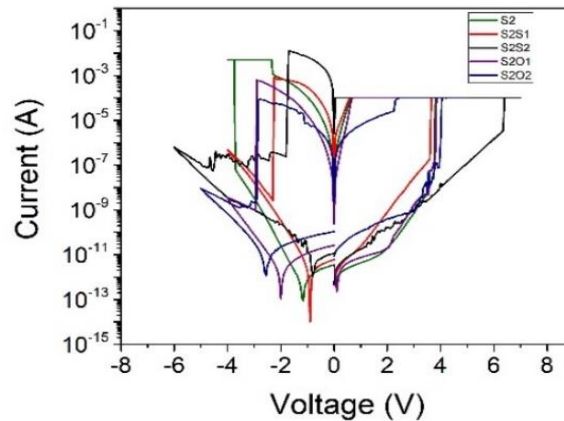
Ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα για το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς όπως υπολογίστηκε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πραγματικό και φανταστικό μέρος της εμπέδησης.



Διάγραμμα 5 46 Συγκριτικό διάγραμμα ϵ'

Υψηλότερες τιμές του ϵ' εμφανίζει το δείγμα S2, ακολουθεί το δείγμα S2S1, μετά το δείγμα S2S2, και τέλος τα δυο δείγματα στα οποία έχει προστεθεί οξυγόνο στο στρώμα νιτριδίου του πυριτίου, S2O2 και S2O1.

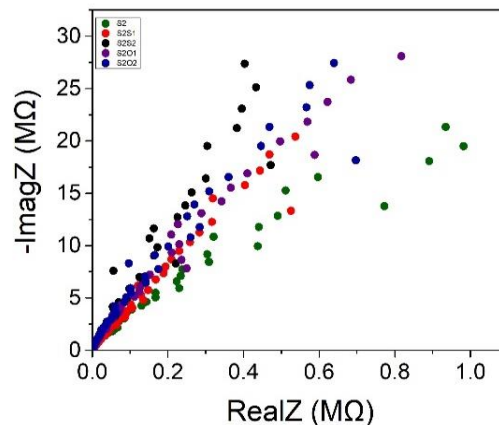
Εν συνεχεία παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα των καμπυλών ρεύματος-τάσης (I-V) για τα δείγματα των αντιστατών.



Διάγραμμα 5 47 Συγκριτικό διάγραμμα I-V

5.4.2.1 Συγκριτικά αποτελέσματα φανταστικού-πραγματικού μέρους εμπέδησης.

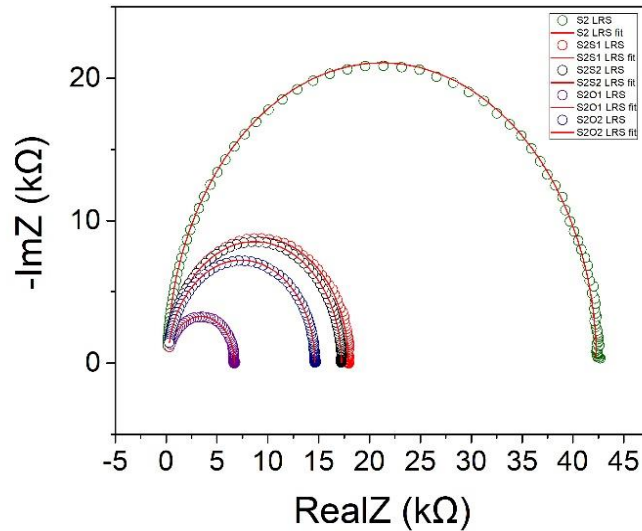
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διαγράμματα του φανταστικού μέρους συναρτήση του πραγματικού μέρους της εμπέδησης για τις τρεις καταστάσεις (fresh δείγματα, δηλαδή δεν έχει εφαρμοστεί κάποια τιμή ρεύματος, κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS) κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS)).



Διάγραμμα 5 48 Συγκριτικό διάγραμμα -ImagZ-RealZ για fresh δείγματα.

Παρατηρείται πως το δείγμα εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές του φανταστικού μέρους της εμπέδησης σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, ακολουθούν τα δείγματα S2S1,S2O1,S2O2 τα οποία εμφανίζουν κοντινές τιμές $\text{Im}Z$, και τέλος, τις μικρότερες τιμές έχει το δείγμα S2.

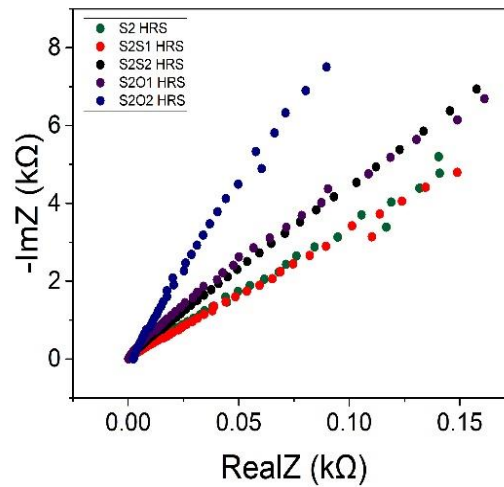
Έπειτα ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα $-\text{Im}Z-\text{Re}Z$ ενώ τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS).



Διάγραμμα 5 49 Συγκριτικά διαγράμματα $-\text{Im}Z-\text{Re}Z$, τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση LRS.

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται πως τις υψηλότερες τιμές του φανταστικού μέρους της εμπέδησης λαμβάνει το δείγμα S2, ακολουθούν τα δείγματα S2S1,S2S2 τα οποία λαμβάνουν κοντινές τιμες, και τέλος τα δείγματα S2O2 και S2O1.

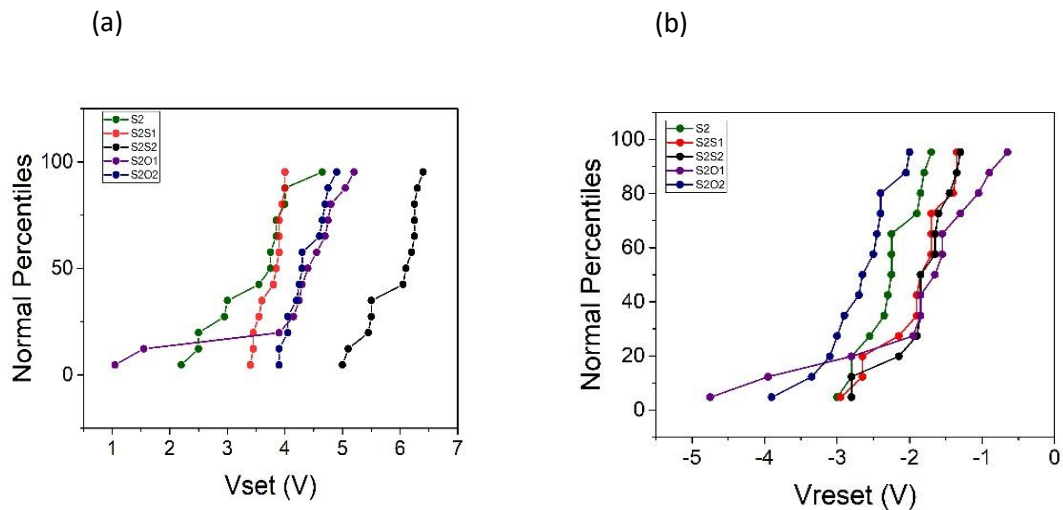
Έπειτα ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα $-ImZ-RealZ$ ενώ τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση υψηλής αντίστασης (HRS).



Διάγραμμα 5 52 Συγκριτικό διάγραμμα $-ImZ-RealZ$, τα δείγματα βρίσκονται στην κατάσταση HRS. Είναι ότι υψηλότερες τιμές του ImZ λαμβάνει το δείγμα S2S2, S2O1, και τέλος τα δείγματα S2S1, S2 που πάλι εμφανίζουν αρκετά κοντινές τιμές.

5.4.2.1 Συγκριτικά αποτελέσματα στατιστικών διαγραμμάτων

Τέλος, ακολουθείται παρουσίαση συγκριτικών διαγραμμάτων με τα αποτελέσματα των τιμών V_{set} και V_{reset} που προέκυψαν από τα στατιστικά διαγράμματα για όλα τα δείγματα των αντιστατών.



Διάγραμμα 5 53 Συγκριτικά διαγράμματα για τις τιμές (a) V_{set} , (b) V_{reset}

Από το διάγραμμα για τις τάσεις που πραγματοποιείται set, παρατηρείται πως το δείγμα S2S2 πραγματοποιεί set για μεγαλύτερες τιμές τάσεων, ακολουθούν τα δυο δείγματα με οξυγόνο S2O2,S2O1 τα οποία πραγματοποιούν set σε πολύ κοντινές τιμές τάσεων, και τέλος τα δείγματα S2S1,S2 που πάλι πραγματοποιούν set σε κοντινές τιμές.

Από το διάγραμμα για τις τάσεις που πραγματοποιείται reset, παρατηρείται πως τα δείγματα S2O1, S2S2, S2S1 εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές τάσεων που πραγματοποιείται reset, ενώ ακολουθούν τα δείγματα S2 και S2O2.

6 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Ανακεφαλαίωση, συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αρχικά μελετήθηκαν συνολικά 3 δείγματα αντιστατών (SNT,SNTST1,SNTST2), τα οποία δεν έχουν τεχνολογία SOI, καθώς και στρώμα εμφυτευμένου πυριτίου. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε ηλεκτρικός και οπτικός χαρακτηρισμός των συγκεκριμένων δειγμάτων, με σκοπό να παρατηρηθεί η επιρροή της διαφορετικής στοιχειομετρίας του στρώματος νιτριδίου του πυριτίου (διαφορετικές ροές H_2SiCl_2/NH_3 κατά την μέθοδο LPCVD) στις οπτικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Από τις μετρήσεις ελλειψομετρίας προκύπτει πως τα δείγματα ακολουθούν την παρακάτω κατά αύξουσα σειρά: SNTST2,SNT,SNTST1 για τον δείκτη διάθλασης. Από τα αποτελέσματα της ελλειψομετρίας και της μεθόδου XPS παρατηρείται πως τα δείγματα ακολουθούν την παρακάτω κατά αύξουσα σειρά: SNTST1,SNT,SNTST2 όσον αφορά το πάχος τους. Από τις καμπύλες C-V παρατηρείται πως το δείγμα SNTST1 λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας σε σχέση με τα άλλα δυο δείγματα, τα οποία εμφανίζουν κοντινές τιμές. Τέλος από τις μετρήσεις διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εμπέδησης προκύπτει πως τα δείγματα ακολουθούν την παρακάτω κατά αύξουσα σειρά: SNTST2,SNT,SNTST1 για το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς.

Συνεχίζοντας μελετήθηκαν 5 δείγματα αντιστατών (S2,S2S1,S2S2,S2O1,S2O2). Πραγματοποιήθηκε ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των συγκεκριμένων δειγμάτων ώστε να μελετηθεί η επιρροή της διαφορετικής στοιχειομετρίας του στρώματος νιτριδίου του πυριτίου, καθώς και η προσθήκη οξυγόνου, στις ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Από τις μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης προκύπτει ότι οι τιμές χωρητικότητας κατά αύξουσα σειρά είναι S2S2,S2,S2S1 για την πρώτη σύγκριση ενώ S2O2,S2O1,S2 για την δεύτερη. Συνεχίζοντας, από τις μετρήσεις διηλεκτρικής φασματοσκοπίας εμπέδησης προκύπτει ότι οι τιμές του πραγματικού μέρους της διηλεκτρικής σταθεράς κατά αύξουσα σειρά είναι S2S2,S2S1,S2 για την πρώτη σύγκριση ενώ S2O1,S2O2,S2 για την δεύτερη. Έπειτα παρουσιάζονται διαγράμματα του φανταστικού μέρους της εμπέδησης συναρτήσει του πραγματικού μέρους της εμπέδησης για τρεις καταστάσεις : τα δείγματα είναι fresh και δεν έχει εφαρμοστεί κάποια τιμή ρεύματος, τα δείγματα έχουν επέλθει στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS), και στην κατάσταση υψηλή αντίστασης (HRS). Από τα συγκεκριμένα διαγράμματα παρατηρείται αυτό που αναμενόταν δηλαδή πως όταν τα δείγματα είναι fresh και πως όταν είναι στην κατάσταση υψηλή αντίστασης (HRS) εμφανίζουν γραμμική συμπεριφορά, ενώ όταν στην κατάσταση χαμηλής αντίστασης (LRS) εμφανίζουν το χαρακτηριστικό ημικύκλιο που αναμένεται (διάγραμμα cole-cole). Από τις μετρήσεις ρεύματος τάσης και τα στατιστικά διαγράμματα που κατασκευάστηκαν προκύπτει πως τα δείγματα ακολουθούν την παρακάτω αύξουσα σειρά στις τιμές τάσεων set: S2,S2S1,S2S2 και στις τιμές τάσεων reset: S2S2,S2S1,S2 για την πρώτη σύγκριση, ενώ για την δεύτερη σύγκριση, για το set: S2,S2O1,S2O2 και για το reset: S2O1,S2,S2O2. Ακόμα μελετήθηκαν οι μηχανισμοί αγωγιμότητας που εμφανίζονται κατά το set και το reset των δειγμάτων, και

παρατηρήθηκε πως εμφανίζονται οι μηχανισμοί Space charge limited current (SCLC), Poole-Frenkel (P-F), Modified space charge limited current (MSCLC) και στις δυο περιπτώσεις για όλα τα δείγματα (εμφανίζονται γραμμικές περιοχές). Τέλος από τις μετρήσεις κατάρρευσης φορτίου παρατηρείται για όλα τα δείγματα πως καθώς μειώνεται η σταθερή τάση που εφαρμόζεται, αυξάνεται ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί κατάρρευση φορτίου.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ερευνητικό ενδιαφέρον για μελλοντική έρευνα θα είχε η περαιτέρω μελέτη της επιρροής των διαφορετικών πειραματικών συνθηκών της κατασκευής των αντιστατών στις ηλεκτρικές, οπτικές τους ιδιότητες, με σκοπό την βελτιστοποίηση του φαινομένου switching, για παράδειγμα η μετάβαση στις καταστάσεις χαμηλής και υψηλής αντίστασης να πραγματοποιείται πιο γρήγορα και για μικρότερες τιμές τάσεων. Επίσης ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη της επιρροής των διαφορετικών πειραματικών συνθηκών κατασκευής των αντιστατών στον αριθμό των παγιδών που δημιουργούνται στο στρώμα του νιτριδίου του πυριτίου και η μελέτη του αγωγίμου διαύλου που σχηματίζεται. Επιπλέον, ενδιαφέρον θα είχε η πραγματοποίηση προσομοιώσεων της συμπεριφοράς αντιστατών με διαφορετικά χαρακτηριστικά με σκοπό την περαιτέρω μελέτη της απόδοσής τους.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Valov, I. Redox-Based Resistive Switching Memories (ReRAMs): Electrochemical Systems at the Atomic Scale. *ChemElectroChem* 2014, 1, 26–36.
2. E. W. Lim, R. Ismail (2015) "Conduction Mechanism of Valence Change Resistive Switching Memory: A Survey", *Electronics*, 4, 586-613; doi: 10.3390/electronics4030586
3. YANG Y C, PAN F, LIU Q, et al. Fully room-temperature-fabricated nonvolatile resistive memory for ultrafast and high-density memory application[J]. *Nano Lett*, 2009, 9(4): 1636–1643.
4. J. Robertson, "The electronic properties of silicon nitride", *Philosophical Magazine Part B*, 44:2, 215-237, DOI: 10.1080/01418638108222558 (1981)
5. Alain E. Kaloyeros, Fernando A. Jove, Jonathan Goff, and Barry Arkles, "Review—Silicon Nitride and Silicon Nitride-Rich Thin Film Technologies: Trends in Deposition Techniques and Related Applications", *ECS Journal of Solid-State Science and Technology*, 6 (10) P691-P714 (2017)
6. M. Tao, D. Park, S. Noor Mohammad, D. Li, A. E. Botchkera, H. Morkoc, "Electrical conduction in silicon nitrides deposited by plasma enhanced chemical vapour deposition", *Philosophical Magazine B*, 73(4), 723-736, (1996)
7. C. D. Valentin, G. Palma, G. Pacchioni, "Initio Study of Transition Levels for Intrinsic Defects in Silicon Nitride", *J. Phys. Chem. C* 2011, 115, 561–569 (2010)
8. V. I. BELYI, A. A. RASTORGUYEV, "A New View on the Nature of Electron Levels in Amorphous Silicon Nitride", *Chemistry for Sustainable Development*, 8, 13-20, (2000)
9. Mona Mittal, Atanu Jana, in *Handbook of Nanomaterials for Sensing Applications*, 2021
10. Bhujel, R., & Swain, B. P. (2018). Fabrication and characterization of silicon nanowires hybrid Solar cells: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377, 012193
11. https://inf-wiki.eecs.umich.edu/wiki/Low_pressure_chemical_vapor_deposition
12. Chen, B., Tay, F. E. H., & Iiescu, C. (2008). Development of thick film PECVD amorphous silicon with low stress for MEMS applications. *Micro- and Nanotechnology: Materials, Processes, Packaging, and Systems IV*
13. <https://www.mks.com/n/ion-implantation>
14. https://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_group_subpage.php?id=3661
15. <https://www.thfc.de/fundamentals-of-sputtering>

16. <https://www.soitec.com/en/products/smart-cut>
17. Chiu, F.C. A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014, doi:10.1155/2014/578168.
18. Sharma, Y.; Pavunny, S.P.; Fachini, E.; Scott, J.F.; Katiyar, R.S. Nonpolar resistive memory switching with all four possible resistive switching modes in amorphous ternary rare-earth LaHoO₃ thin films. 2015, arXiv: 1505.04690. arXiv.org e-Print archive. Available Online: <http://www.arxiv.org/abs/1505.04690> (accessed 30 June 2015).
19. Simmons, J.G. Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film. *J. Appl. Phys.* 1963, 34, 1793–1803.
20. Majkusiak, B.; Palestri, P.; Schenk, A.; Spinelli, A.S.; Compagnoni, C.M.; Luisier, M. Modeling and Simulation Approaches for Gate Current Computation. In *Nanoscale CMOS*; Balestra, F., Ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2013; pp. 213–257.
21. Perera, R.; Ikeda, A.; Hattori, R.; Kuroki, Y. Trap assisted leakage current conduction in thin silicon oxynitride films grown by rapid thermal oxidation combined microwave excited plasma nitridation. *Microelectron. Eng.* 2003, 65, 357–370.
22. G. Williams, D. K. Thomas (1998) “Phenomenological and Molecular Theories of Dielectric and Electrical Relaxation of Materials”, Department of Chemistry, University of Wales Swansea, Singleton Park, Swansea SA2 8PPM UK