

Μεταπτυχιακή Διατριβή (M.Sc.)

Θέμα: *“Μελέτη της ετεροεπαφής SrCu₂O₂/Si”*

Λουλουδάκης Δημήτρης

Υπεύθυνος καθηγητής: Τζανετάκης Παναγιώτης
(Τμήμα Φυσικής, Παν/μιο Κρήτης)

Επιβλέπων ερευνητής: Απεραθίτης Ηλίας (ΕΛΕ Β’)
(Ομάδα Μικροηλεκτρονικής / ΙΗΔΛ / ΙΤΕ)

Απρίλιος 2009

Περιεχόμενα

1.1	Εισαγωγή	3
2.1	Δίοδος	6
2.2	Ιστορία	6
2.3	Δίοδοι ημιαγωγών	7
2.4	Η εξίσωση Shockley	9
3.1	Η Δίοδος επαφής p-n	11
3.2	Η επαφή p-n σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας	11
3.3	Υπολογισμός του εσωτερικού δυναμικού V_{bi}	14
3.4	Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού στην περιοχή απογύμνωσης	16
3.5	Υπολογισμός του πλάτους της περιοχής απογύμνωσης	20
3.6	Εφαρμογή εξωτερικής τάσης V_A	21
3.7	Χωρητικότητα απότομης επαφής p-n	22
3.8	Ισορροπία	24
3.9	Εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού V_A	25
3.10	Εύρεση σχέσεων I- V_A	26
3.11	Ετεροπαφή	32
3.12	Μετρήσεις ωμικών επαφών (TLM)	35
4.1	Φωτολιθογραφία	39
4.2	Καθαρισμός υποστρώματος	39
4.3	Είδη φωτορητίνης	39
4.4	Συνταγές που χρησιμοποιήθηκαν	40
4.5	Μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν	41
4.6	Χάραξη	43
4.7	Απότομη θερμική ανόπτηση (RTA)	45
5.1	Πειραματικό μέρος	46
5.2	Μετρήσεις ωμικών επαφών	46
5.3	Μετρήσεις (TLM)	47
5.4	Μετρήσεις ρεύματος τάσης I-V	50
5.5	Παρατηρήσεις-συμπεράσματα	70
5.6	Μετρήσεις χωρητικότητας τάσης C-V	70
5.7	Παρατηρήσεις-συμπεράσματα	82
5.8	Γενικά συμπεράσματα-Σχόλια	83
6	Βιβλιογραφία	85

1.1 Εισαγωγή

Η εργασία που ακολουθεί έγινε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος μικροηλεκτρονικής-οπτοηλεκτρονικής του τμήματος φυσικής του πανεπιστημίου Κρήτης. Η εργασία έγινε στα εργαστήρια της Ομάδας Μικροηλεκτρονικής του ΙΗΔΛ/ΙΤΕ και ασχοληθήκαμε με την μελέτη της ετεροεπαφής p-SrCu₂O₂/Si (στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος NATCO).

Βιβλιογραφική αναδρομή

Εδώ παρουσιάζουμε μερικές μελέτες που έχουν γίνει για p-τύπου οξειδία πάνω σε πυρίτιο και συγκεκριμένα για το ZnO, αφού η μελέτη της ετεροεπαφής p-SrCu₂O₂/Si γίνεται για πρώτη φορά:

Photoresponse of Si detector based on n-ZnO/p-Si and n-ZnO/n-Si structures

H. Y. Kim, J. H. Kim, Y. J. Kim, K. H. Chae, C. N. Whang, J. H. Song and S. Im

Οι φωτοδιοδοί ZnO/Si κατασκευάζονται τοποθετώντας το film n-ZnO πάνω σε p-Si με την μέθοδο του rf sputtering. Όλες οι δίοδοι n-ZnO/p-Si δείχνουν ισχυρή ανορθωτική συμπεριφορά στις I-V χαρακτηριστικές στο σκοτάδι ενώ οι n-ZnO/n-Si δείχνουν ασθενές ανορθωτική συμπεριφορά.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχει παρουσιαστεί μετά από έκθεση Φώτος χρησιμοποιώντας μια πηγή κόκκινου φωτός στα 670nm. Υψηλό φωτορεύμα επιτυγχάνεται σε ανάστροφη τάση όταν η κρυσταλλική ποιότητα του n-ZnO είναι αρκετά καλή ώστε να περάσει το φως στο p-Si.

Current transport studies of ZnO/p-Si heterostructures grown by plasma immersion ion implantation and deposition

X.D. Chen, C.C.Ling, S.Fung and C.D.Beling

Οι ανόθευτες και οι εμπλουτισμένες με άζωτο ZnO/p-Si ετεροεπαφές κατασκευάζονται με τεχνικές εμφύτευσης και εναπόθεσης ιόντων. Τα ανόθευτα και τα εμπλουτισμένα ZnO films είναι n τύπου και με υψηλή αντίσταση. Όταν βρεθεί σε

ορθή πόλωση το ανόθευτο ZnO-p-Si το ρεύμα ακολουθεί ωμική συμπεριφορά αν η τάση είναι μεγαλύτερη από 0,4V. Ωστόσο για το νοθευμένο με άζωτο ZnO/p-Si δείγμα το ρεύμα είναι ωμικό για $V < 1 \text{ Volt}$ και μετά περνάει σε $I \sim V^2$ για $V > 2,5 \text{ Volt}$.

Electrical characterization of p-ZnO/p-Si heterojunction

S. Majumdar, S. Chattopadhyay and P. Banerji

Το νοθευμένο με άζωτο p-ZnO film κατασκευάστηκε με την μέθοδο PLD πάνω σε p τύπου Si. Η δομή και οι ηλεκτρικές ιδιότητες για μια p-p ετεροεπαφή εξετάζεται μέσα από μετρήσεις ρεύματος τάσης και χωρητικότητας τάσης. Αυτές δείχνουν μια συμπεριφορά που προβλέπει turn-on voltage στα 0,5V. Ο συντελεστής ιδανικότητας n προσδιορίζεται βάζοντας θετικό δυναμικό στο p-ZnO και αρνητικό στο p-Si και βγαίνει περίπου 6. Η μεγάλη τιμή του n αποδίδεται στο ότι δεν ταιριάζει ακριβώς το πλέγμα του ZnO και του Si και σε άλλους παράγοντες όπως θερμοιονική εκπομπή.

Παρούσα εργασία:

Αρχικά μελετήσαμε ένα δείγμα κρυσταλλικής ομοεπαφής p-i-n AlGaAs με πολλαπλά πηγάδια GaAs/AlGaAs στην i-περιοχή που γνωρίζαμε ότι δουλεύει καλά για να έχουμε μια εικόνα του ιδανικού.

Το SrCu₂O₂ (SCO) είναι ένα καινούριο υλικό που δεν έχει μελετηθεί μέχρι τώρα καθόλου. Μελετήθηκε το SrCu₂O₂ με τρεις διαφορετικές ποσότητες προσμίξεων: SCO, SCO:Ba(3%) και SCO:Ba(6%). Οι μετρήσεις που κάναμε ήταν ηλεκτρικές, δηλαδή μετρήσεις ρεύματος-τάσης και χωρητικότητας-τάσης συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

Το υπόστρωμα με το οποίο γίνεται και η επαφή είναι Si τύπου n ή τύπου p.

Αρχικά τοποθετήσαμε το υλικό μας με την βοήθεια ενός λέιζερ 248nm πάνω σε n-Si (δείγμα tf112) και παρατηρήσαμε ότι η επαφή που δημιουργήθηκε ήταν μια p-n, με το στρώμα SrCu₂O₂ να έχει συμπεριφορά τύπου p.

Στη συνέχεια μελετήσαμε τα δείγματα που είχαν φτιαχτεί με λέιζερ 308nm πάνω σε υπόστρωμα p-Si (δείγματα tf193.1, tf193.2, tf196.1, tf196.2, tf197.1 και tf197.2) και παρατηρήσαμε ότι η επαφή που δημιουργήθηκε ήταν μια επαφή n-p, με το SrCu₂O₂ να έχει τον ρόλο αυτή την φορά του n τύπου ημιαγωγού.

Για να γίνει ξεκάθαρο τελικά τι τύπου είναι το SrCu₂O₂ μελετήσαμε κάποια δείγματα (tf204.2 και tf205.2) που είχαν κατασκευαστεί με το λέιζερ των 308nm πάνω στο πυρίτιο τύπου p. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργήθηκε μια επαφή p-n, με το SrCu₂O₂ να έχει την συμπεριφορά της p μεριάς. Έτσι είχε φτιαχτεί μια επαφή p⁻p. Οπότε το SrCu₂O₂ που είχε κατασκευαστεί ήταν τύπου p⁻.

Επίσης έγιναν μετρήσεις TLM σε δείγματα ZnN, SrCu₂O₂ και GaAs για να εξοικειωθούμε με τις μετρήσεις αλλά και ελέγξουμε την ποιότητα των μεταλλικών επαφών.

Στα δείγματα SrCu₂O₂ η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη και Έτσι δεν μπόρεσε να γίνει ανάλυση των παραμέτρων που μπορούν να βγουν από αυτές τις μετρήσεις.

Ευχαριστίες:

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ειδικό λειτουργικό επιστήμονα και επιβλέπων της εργασίας Κ.Απεραθίτη Ηλία για την επιλογή του θέματος και για την βοήθεια να πραγματοποιηθεί η μεταπτυχιακή διατριβή, την Κα. Καγιαμπάκη Μαρία για την καθοδήγηση και την βοήθειά της στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων, τον υπεύθυνο καθηγητή της εργασίας κ.Τζανετάκη Παναγιώτη, την κα. Βασιλική Καμπυλαυκά (M.Sc), την κα. Βάρδα Μαρία (M.Sc) και κα. Εύη Παπαδοπούλου (ερευνήτρια) για την κατασκευή και τις παραμετρικές μετρήσεις των δειγμάτων και τον κ. Κωστόπουλο Θανάση για την βοήθειά του στο clean room.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συνεχή βοήθεια και στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

2.1 Δίοδος

Στην ηλεκτρονική, η **δίοδος** είναι ένα στοιχείο που περιορίζει τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας (charge carriers). Ουσιαστικά, η δίοδος επιτρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια διεύθυνση, αλλά μπλοκάρει την κίνηση από την αντίθετη διεύθυνση. Έτσι, η δίοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μια ηλεκτρονική εκδοχή της βαλβίδας. Τα κυκλώματα που απαιτούν ροή προς μία μόνο κατεύθυνση περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες διόδους στη σχεδίαση του κυκλώματος. Οι πρώτες διόδους περιλάμβαναν κρυστάλλους *cat's whisker* και λυχνίες κενού. Σήμερα, οι περισσότερες διόδους είναι κατασκευασμένες από υλικά ημιαγωγών όπως πυρίτιο ή γερμάνιο.

2.2 Ιστορία

Οι θερμιονικές και στερεής κατάστασης διόδους αναπτύχθηκαν ταυτόχρονα. Η αρχή της λειτουργίας των θερμιονικών διόδων ανακαλύφθηκε από τον Frederick Guthrie το 1873. Η αρχή της λειτουργίας των κρυσταλλικών διόδων ανακαλύφθηκε το 1874 από το Γερμανό επιστήμονα Karl Ferdinand Braun.

Οι αρχές της θερμιονικής δίοδου ξαναανακαλύφθηκαν από τον Τόμας Έντισον (*Thomas A. Edison*) στις 13 Φεβρουαρίου το 1880 και απέκτησε την πατέντα το 1883, αλλά δεν ανέπτυξε περισσότερο την ιδέα. Ο Μπράουν πατεντάρισε τον κρυσταλλικό ανορθωτή το 1899. Η ανακάλυψη του Μπράουν εξελίχθηκε περαιτέρω σε μια χρήσιμη συσκευή ανίχνευσης των ραδιοκυμάτων από τον Σερ Jagdish Bose.

Ο πρώτος ραδιοδέκτης που χρησιμοποιούσε κρυσταλλική δίοδο κατασκευάστηκε γύρω στο 1900 από τον Greenleaf Whittier Pickard. Η πρώτη θερμιονική δίοδος πατενταρίστηκε στη Μεγάλη Βρετανία από τον John Ambrose Fleming (επιστημονικός συνεργάτης της εταιρείας Marconi και πρώην υπάλληλος του Έντισον) στις 16 Νοεμβρίου 1904. Ο Pickard πήρε μια πατέντα για ένα κρυσταλλικό ανιχνευτή από πυρίτιο στις 20 Νοεμβρίου 1906.

Όταν κατασκευάστηκαν αυτές οι συσκευές ήταν γνωστές ως ανορθωτές. Το 1919 ο William Henry Eccles επινόησε τον όρο **δίοδος** που έχει ελληνικές ρίζες: το *δι* σημαίνει δύο και *οδός* σημαίνει μονοπάτι.

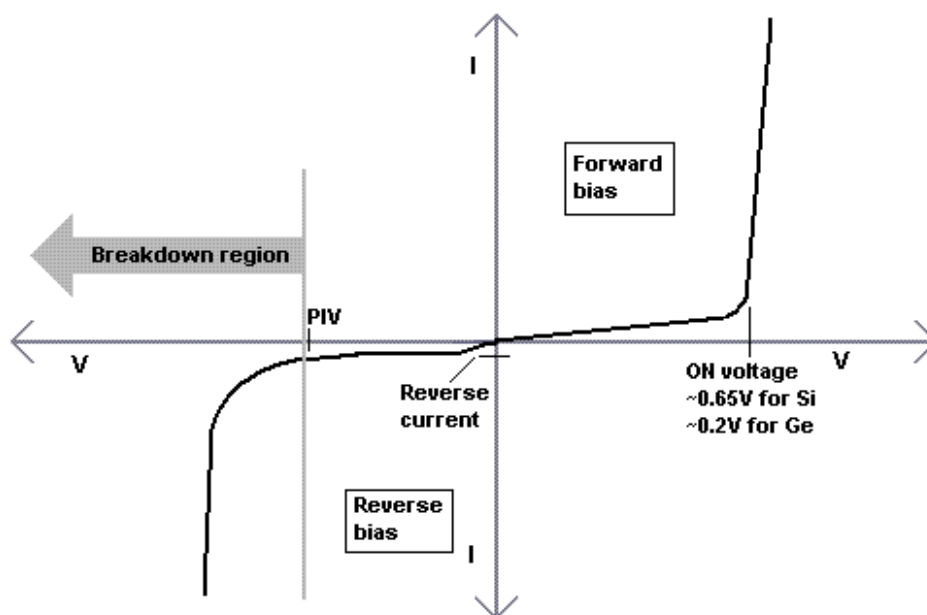
2.3 Δίοδοι ημιαγωγών

Οι περισσότερες σύγχρονες δίοδοι βασίζονται στον ημιαγωγό p-n επαφών. Σε μια p-n δίοδο, συμβατικό ρεύμα μπορεί να ρέει από τη μεριά τύπου p (η άνοδος) στην άλλη μεριά τύπου n (η κάθοδος), αλλά δεν μπορεί να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Ένας άλλος τύπος διόδου ημιαγωγών, η δίοδος Schottky, σχηματίζεται από την επαφή μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού παρά από μια επαφή p-n.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ή I-V μιας διόδου ημιαγωγού αποδίδεται στη συμπεριφορά της περιοχής απογύμνωσης η οποία υπάρχει στην επαφή p-n μεταξύ των διαφορετικών ημιαγωγών. Όταν αρχικά δημιουργήθηκε η επαφή p-n, ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας (conduction band) της νοθευμένης-N (N-doped) περιοχής διαχέονται στη νοθευμένη-P (P-doped) περιοχή όπου υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από οπές (μέρη για τα ηλεκτρόνια στα οποία δεν βρίσκεται κανένα ηλεκτρόνιο) με τις οποίες τα ηλεκτρόνια ανασυνδυάζονται. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο συνδυάζεται με μια οπή, η οπή εξαφανίζεται και το ηλεκτρόνιο παύει να είναι ελεύθερο. Επομένως δυο φορείς αγωγιμότητας εξαφανίστηκαν. Η περιοχή γύρω από την επαφή p-n ελαττώνεται από φορείς αγωγιμότητας και επομένως λειτουργεί ως μονωτής.

Παρόλ'αυτά, το πλάτος περιοχής απογύμνωσης (depletion width) δεν μπορεί να μεγαλώσει απεριόριστα. Για κάθε ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής που ανασυνδυάζονται, ένα θετικά φορτισμένο 'νοθευμένο' (dopant) ιόν αφήνεται πίσω στη νοθευμένη-N περιοχή και ένα αρνητικά φορτισμένο 'νοθευμένο' ιόν αφήνεται στη νοθευμένη-P (P-doped) περιοχή. Καθώς προχωράνε οι ανασυνδυασμοί και περισσότερα ιόντα δημιουργούνται, δημιουργείται ένα αυξανόμενο ηλεκτρικό πεδίο στη περιοχή απογύμνωσης το οποίο επιδρά στην επιβράδυνση και τελικά στη διακοπή των ανασυνδυασμών. Σε αυτό το σημείο, υπάρχει μια ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού στην περιοχή απογύμνωσης. Αν μια εξωτερική τάση εφαρμοστεί στη δίοδο με την ίδια πολικότητα με την ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού, η περιοχή απογύμνωσης

συνεχίζει να λειτουργεί ως μονωτής εμποδίζοντας τη διέλευση σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικού ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάστροφη πόλωση. Αντίθετα, αν η πολικότητα της εξωτερικής τάσης είναι αντίθετη με την ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού, θα συνεχίσουν οι ανασυνδυασμοί με αποτέλεσμα να έχουμε διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της επαφής p-n.



Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας επαφής P-N διόδου

Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της διόδου μπορεί να προσεγγιστεί από δυο περιοχές λειτουργίας. Αν η τάση ανάμεσα στα δύο άκρα (leads) είναι κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, η ζώνη κατάρρευσης έχει σημαντικό πλάτος και η διόδος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ανοικτό(μη αγώγιμο) κύκλωμα. Όσο η τάση αυξάνεται, σε κάποιο σημείο η διόδος θα γίνει αγώγιμη και θα επιτρέψει τη διαρροή του ηλεκτρικού ρεύματος, και μπορεί να θεωρηθεί ως μια σύνδεση με μηδενική (ή τουλάχιστον πολύ μικρή) αντίσταση.

Σε μια κανονική δίοδο από πυρίτιο, η πτώση τάσης σε μια αγώγιμη δίοδο είναι περίπου 0.6 με 0.7 volts. Η τιμή αυτή είναι διαφορετική για άλλους τύπους διόδων. Για τις διόδους Schottky μπορεί να είναι 0.2 V και για τις διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) μπορεί να είναι 1.4 V ή μεγαλύτερη (στα γαλάζια LEDs μπορεί να φτάνει και τα 4.0 V). Σχετικά με το διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V, στην περιοχή ανάστροφης πόλωσης για μια κανονική ανορθωτική δίοδο P-N, το ρεύμα

μέσω της συσκευής είναι πολύ μικρό (της τάξεως των μA) για όλες τις ανάστροφες τάσεις μέχρι ένα σημείο που ονομάζεται Κορυφή Ανάστροφης Τάσης. Μετά από αυτό το σημείο, συμβαίνει μια διαδικασία που ονομάζεται αντίστροφη κατάρρευση η οποία προκαλεί βλάβες στη συσκευή με ταυτόχρονη μεγάλη αύξηση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Για ειδικές περιπτώσεις διόδων όπως η avalanche ή οι διόδοι zener, η αρχή της Κορυφής Ανάστροφης Τάσης δεν είναι εφαρμόσιμη αφού έχουν μια εσκεμμένη κατάρρευση μετά από ένα γνωστό αντίστροφο ρεύμα έτσι ώστε η αντίστροφη τάση να φτάσει σε μια γνωστή τιμή (η οποία ονομάζεται τάση zener ή τάση κατάρρευσης). Αυτές οι συσκευές όμως έχουν ένα ανώτατο όριο στο ρεύμα και στην ισχύ στην περιοχή zener ή avalanche.

2.4 Η εξίσωση Shockley

Η *ισότητα Shockley της ιδεατής διόδου* ή ο *νόμος της διόδου* the diode law (που ονομάστηκε από τον συνεφευρέτη του τρανζίστορ William Bradford Shockley) είναι η χαρακτηριστική I-V characteristic μιας ιδανικής διόδου είτε σε ορθή είτε σε ανάστροφη πόλωση. Προκύπτει από την παραδοχή ότι οι μόνες διαδικασίες που προκαλούν ρεύμα σε μια δίοδο είναι η μετακίνηση (drift) (λόγω του ηλεκτρικού πεδίου), η διάδοση και ο θερμικός ανασυνδυασμός-παραγωγή. Επίσης θεωρεί ότι το ρεύμα του ανασυνδυασμού-παραγωγής (recombination-generation R-G) στο πεδίο κατάρρευσης είναι αμελητέο. Αυτό σημαίνει ότι η εξίσωση του Shockley δεν ισχύει για τις διαδικασίες που σχετίζονται με την αντίστροφη κατάρρευση και την φωτονιακή-βοηθούμενη R-G. Επιπρόσθετα, δεν περιγράφει την "πτώση επιπέδου" της καμπύλης I-V στην υψηλή ορθή πόλωση εξαιτίας της εσωτερικής αντίστασης, ούτε εξηγεί την πρακτική απόκλιση από την ιδανική στην περίπτωση της πολύ μικρής ορθής πόλωσης εξαιτίας του ρεύματος R-G στην περιοχή κατάρρευσης

$$I = I_S \left(e^{V_D/(nV_T)} - 1 \right),$$

όπου

I είναι το ρεύμα της διόδου,

I_S είναι ένα παράγοντας κλίμακας που ονομάζεται *ρεύμα κορεσμού*,

V_D είναι η τάση της διόδου,

V_T είναι η *θερμική τάση*,

και n είναι ο *παράγοντας εκπομπής*, γνωστός και ως *συντελεστής ιδανικότητας*.

$$V_T = \frac{kT}{q},$$

όπου

q είναι το μέτρο του φορτίου ενός ηλεκτρονίου,

k είναι η σταθερά του Boltzmann,

T είναι η απόλυτη θερμοκρασία της επαφής p-n.

3.1 Η δίοδος επαφής p-n

Η δίοδος επαφής p-n αποτελεί την πιο βασική μορφή ημιαγωγικής διάταξης και πραγματοποιείται με ένα κομμάτι ημιαγωγού που περιλαμβάνει δύο περιοχές διαφορετικού τύπου προσμίξεων (n και p) σε επαφή μεταξύ τους. Η σχετική συγκέντρωση Na-Nd των προσμίξεων τύπου n και p είναι δυνατόν είτε να αλλάζει απότομα τιμή από Na-Nd=Na σε Na-Nd=-Nd στο επίπεδο επαφής είτε να μεταβάλλεται σταδιακά με συνεχή τρόπο. Επίσης η επιφάνεια της επαφής μπορεί είτε να αποτελείται από ένα επίπεδο κάθετο σε ένα σημείο κάποιας διεύθυνσης του κρυστάλλου του ημιαγωγού η να έχει συνθετότερο σχήμα. Αυτά τα χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τον τρόπο κατασκευής της επαφής pn. Το σημείο στο οποίο γίνεται η απότομη αλλαγή από Na-Nd=Na σε Na-Nd=-Nd σε μια απότομη επαφή αποτελεί την θέση της μεταλλουργικής επαφής.

Η άνοδος σε μια επαφή pn αντιστοιχεί στην πλευρά p και η κάθοδος στην πλευρά n. Η επαφή pn είναι σε ορθή πόλωση όταν η περιοχή p είναι σε υψηλότερο δυναμικό από την περιοχή n και άγει ρεύμα από την περιοχή p προς την περιοχή n που αυξάνει εκθετικά με την τάση, ενώ είναι σε ανάστροφη πόλωση όταν η περιοχή p είναι σε χαμηλότερο δυναμικό από την περιοχή n και παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση αγοντας αμελητέα ποσότητα ανάστροφου ρεύματος από την περιοχή n προς την p, έως αρκετά μεγάλες τιμές ανάστροφης τάσης πριν την κατάρρευση της δίοδου.

3.2 Η επαφή pn σε συνθήκες θερμικής ισορροπίας

3.2.1 Ηλεκτροστατική και ενεργειακή περιγραφή της επαφής pn

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει υποθέτουμε ότι:

Η δίοδος επαφής pn είναι μονοδιάστατη διάταξη.

Η μεταλλουργική επαφή μεταξύ των n και p πλευρών γίνεται στο σημείο $x=0$.

Είναι μια απότομη επαφή .

Η εξωτερική σύνδεση της επαφής pn γίνεται με τέλειες μεταλλικές ωμικές επαφές.

Ας ξεκινήσουμε λοιπόν με την υπόθεση ότι κάποια αρχική χρονική στιγμή σχηματίζεται στιγμιαία η απότομη επαφή και ότι κάθε περιοχή p και n είναι ηλεκτρικά ουδέτερη σε όλη την έκτασή της. Τότε η συγκέντρωση των οπών στην πλευρά p θα είναι ίση με την συγκέντρωση N_a των αποδεκτών ενώ θα γίνεται πολύ μικρή ίση με $p = p_n = n_i^2 / N_d$ στην άλλη πλευρά n της επαφής όπου υπάρχει μια συγκέντρωση δοτών N_d . Αντίστοιχα και για τα ηλεκτρόνια.

Επειδή όμως έχουμε βαθμίδα συγκέντρωσης σωματιδίων, τα σωματίδια θα αρχίσουν να διαχέονται με τρόπο που θα τείνει να εξομοιώσει τη συγκέντρωσή τους και στις δυο πλευρές της επαφής.

Οι οπές που απομακρύνονται από την πλευρά p αφήνουν χωρίς αντιστάθμιση ιόντα αποδεκτών που αντιστοιχούν σε καθαρό αρνητικό φορτίο χώρου, ενώ τα ηλεκτρόνια που απομακρύνονται από την πλευρά n αφήνουν χωρίς αντιστάθμιση ιόντα δοτών οπής αντιστοιχούν σε καθαρό θετικό φορτίο χώρου. Σχηματίζεται επομένως ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αντιστέκεται στη διάχυση των φορέων και στην κατάσταση ισορροπίας της επαφής έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να αντισταθμίζει εντελώς την τάση των φορέων να διαχυθούν με την τάση των φορέων να μεταφερθούν υπό την επίδραση του πεδίου προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της διάχυσης.

Σε συνθήκες ισορροπίας λοιπόν θα σχηματίζεται μια μεταβατική ζώνη γύρω από την μεταλλουργική επαφή με πάχος W και καθαρά ηλεκτρικά φορτία χώρου πυκνότητας $+qN_d$ στην πλευρά n και $-qN_a$ στην πλευρά p. Αυτή η μεταβατική ζώνη ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης της επαφής και μέσα σε αυτή θα εμφανίζεται ηλεκτρικό πεδίο E με κατεύθυνση από την πλευρά n στην πλευρά p.

Γνωρίζουμε ότι :

$$E(x) = -dV/dx \quad (1)$$

Στις ουδέτερες περιοχές n και p που το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν το ηλεκτρικό δυναμικό έχει σταθερές τιμές, π.χ. τις τιμές V_n και V_p αντίστοιχα. Στην περιοχή απογύμνωσης όπου το πεδίο είναι διάφορο του μηδενός το δυναμικό μεταβάλλεται από την τιμή V_n σε V_p και επομένως οι ουδέτερες περιοχές της διόδου θα υφίστανται

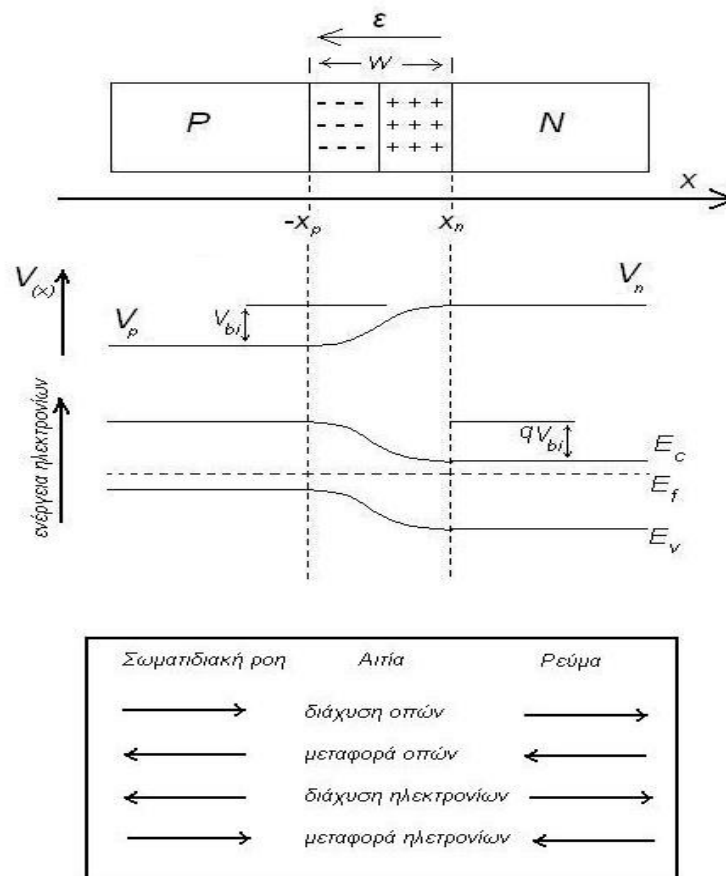
μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού $V_{bi}=V_n-V_p$. Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται εσωτερικό δυναμικό.

Το εσωτερικό δυναμικό δεν προκαλεί ρεύμα στην επαφή γιατί προήλθε σαν αποτέλεσμα της επίτευξης ισορροπίας, δηλαδή το ρεύμα να είναι μηδέν.

Τα επιμέρους ρεύματα που το άθροισμα τους δίνει μηδέν είναι:

$$J_p(\text{διάχυσης})+J_p(\text{μεταφοράς})=0 \quad (2)$$

$$J_n(\text{διάχυσης}+J_n(\text{μεταφοράς})=0 \quad (3)$$



σχήμα 1

όλες αυτές τις πληροφορίες μπορούμε να τις πάρουμε και από το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών που φαίνεται παραπάνω.

Βλέπουμε ότι στο διάγραμμα αυτό εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού qV_{bi} μεταξύ των ακραίων περιοχών της επαφής που αντιστοιχεί στο εσωτερικό δυναμικό της επαφής και μπορεί να υπολογιστεί αν ξέρουμε την θέση της ενέργειας Fermi σε κάθε απομακρυσμένη περιοχή. Συγκεκριμένα το qV_{bi} ισούται με το άθροισμα των $|E_f-E_i|$

κάθε περιοχής. Το ηλεκτρικό πεδίο είναι αντίστοιχο της κλίσης των ευθειών E_c ή E_n ή E_i .

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_n}{dx} \quad (4)$$

από το διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί πληροφορία επίσης και για την πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου αφού:

$$\frac{d\mathcal{E}}{d\chi} = \frac{\rho(\chi)}{\epsilon_s \epsilon_o} \quad (5)$$

και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 2 έχουμε:

$$\rho(\chi) = \frac{\epsilon_s \epsilon_o}{q} \frac{d^2 E_i}{dx^2} \quad (7)$$

όπου $\epsilon_o = 8,854 \times 10^{-14}$ Farad/cm η διηλεκτρική σταθερά του κενού και ϵ_s η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού.

3.3 Υπολογισμός του εσωτερικού δυναμικού V_{bi}

θα υπολογίσουμε το V_{bi} συναρτήσει των συγκεντρώσεων N_a και N_d στις δυο πλευρές της απότομης επαφής με την βοήθεια του ενεργειακού διαγράμματος ενεργειακών ζωνών της επαφής που φαίνεται στο σχήμα 1 αφού όπως είδαμε περιέχει όλες τις πληροφορίες. Υποθέτουμε ότι οι συγκεντρώσεις N_a και N_d στις δυο πλευρές της επαφής έχουν τιμές που ικανοποιούν τις συνθήκες μη εκφυλισμένου ημιαγωγού ($E_c - E_f \geq 3KT = 0,075$ για πλευρά n και $E_f - E_n \geq 3KT = 0,075$ για πλευρά p).

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η διαφορά δυναμικής ενέργειας qV_{bi} ανάμεσα στις πλευρές p και n είναι:

$$qV_{bi} = (E_f - E_i)_{\text{πλευρά-n}} + (E_i - E_f)_{\text{πλευρά-p}} \quad (8)$$

Στην περίπτωση μη εκφυλισμένων ημιαγωγών ισχύει ότι :

$$(E_f - E_i)_{\text{πλευρά-n}} = KT \ln\left(\frac{n_n}{n_i}\right) \text{ για την πλευρά n} \quad (9)$$

και

$$(E_i - E_f)_{\text{πλευρά-p}} = KT \ln\left(\frac{p_p}{n_i}\right) \text{ για την πλευρά p} \quad (10)$$

όπου οι δείκτες n και p στις συγκεντρώσεις n_n και p_p χρησιμοποιούνται για να δείχνουν σε ποια πλευρά της επαφής pn αναφέρεται η συγκεκριμένη συγκέντρωση. Από τις εξισώσεις (8) (9) (10) έχουμε:

$$qV_{bi} = KT \left[\ln\left(\frac{n_n}{n_i}\right) + \ln\left(\frac{p_p}{n_i}\right) \right] = KT \ln\left(\frac{n_n p_p}{n_i^2}\right)$$

επομένως

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{n_n p_p}{n_i^2}\right) \quad (11)$$

και δεδομένου ότι $n_n \approx Nd$ και $p_p \approx Na$

$$V_{bi} \cong \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{NdNa}{n_i^2}\right) \quad (12)$$

Στην ισορροπία $n_i^2 = n_n p_n = n_p p_p$ και η εξίσωση (11) μπορεί να γίνει:

$$V_{bi} \cong \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right) \quad (13)$$

Η εξίσωση (13) μπορεί να πάρει και την μορφή:

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{p_p}{p_n} = e^{qV_{bi}/KT} \quad (14)$$

που δίνει τον λόγο μεταξύ των συγκεντρώσεων ηλεκτρονίων και οπών στις δυο πλευρές τις επαφής.

Επίσης το V_{bi} μπορεί να υπολογισθεί από το διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών και ως:

$$qV_{bi} = E_G - (E_c - E_f)_{\text{πλευρά-n}} + (E_f - E_v)_{\text{πλευρά-p}} \quad (15)$$

και εκφράζοντας τα E_G , $(E_c - E_f)_{\text{πλευρά-n}}$, $(E_f - E_v)_{\text{πλευρά-p}}$ συναρτήσει των ενεργών πυκνοτήτων καταστάσεων N_c και N_v και των συγκεντρώσεων N_d και N_a , έχουμε:

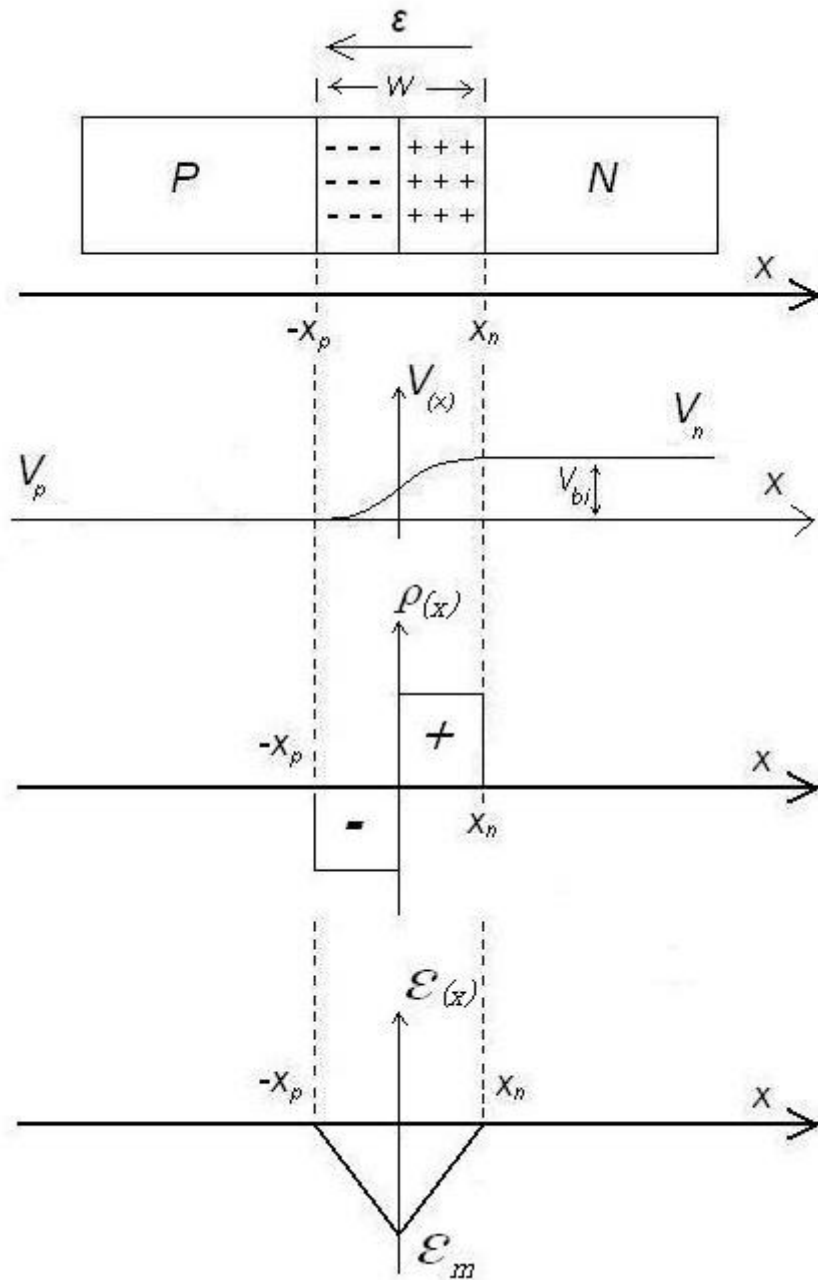
$$qV_{bi} = KT \ln\left(\frac{N_c N_v}{n_i^2}\right) - \left[KT \ln\left(\frac{N_c}{n_n}\right)\right] + KT \ln\left(\frac{N_v}{p_p}\right) = KT \ln\left(\frac{n_n p_p}{n_i^2}\right) \quad (16)$$

Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε αν εφαρμόσουμε την απαίτηση να μην διέρχεται ρεύμα μέσα από την δίοδο στην ισοροπία.

3.4 Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου και δυναμικού στην περιοχή απογύμνωσης

Για να υπολογίσουμε τις συναρτήσεις του ηλεκτρικού πεδίου και του ηλεκτρικού δυναμικού κάνουμε την παραδοχή της πλήρους απογύμνωσης (depletion approximation). Δηλαδή δεχόμαστε ότι η περιοχή απογύμνωσης πλάτους W είναι εντελώς κενή από ελεύθερους φορείς και το φορτίο χώρου οφείλεται αποκλειστικά στα ιόντα των δοτών και αποδεκτών, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές των n και p πλευρών είναι ηλεκτρικά ουδέτερες.

Με αναφορά το σχήμα 2 η παραδοχή αυτή γράφεται ως εξής:



σχήμα 2

i) $N_a \gg p_p$ ή n_p και $\rho(x) = -qN_a$ για $-x_p \leq x < 0$ (17)

ii) $N_d \gg n_n$ ή p_n και $\rho(x) = +qN_d$ για $0 < x \leq x_n$ (18)

iii) $\rho(x) = 0$ για $x \leq -x_p$ και $x \geq x_n$ (19)

όπου $\rho(x)$ η πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου σε κάθε περιοχή (σχήμα 2), η οποία στην γενική περίπτωση δίνεται από την σχέση:

$$\rho(x) = q (p-n+Nd-Na) \quad (20)$$

Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να λυθεί η εξίσωση Poisson:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{d\varepsilon}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s \varepsilon_o} \quad (21)$$

και σύμφωνα με την παραδοχή της πλήρους απογύμνωσης θα έχουμε:

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_s \varepsilon_o} Nd \quad \text{για } 0 < x \leq x_n \quad (22)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = -\frac{q}{\varepsilon_s \varepsilon_o} Na \quad \text{για } -x_p \leq x < 0 \quad (23)$$

και

$$\varepsilon = 0 \quad \text{για } x \leq -x_p \text{ ή } x \geq x_n \quad (24)$$

Αρχικά ολοκληρώνουμε τη εξίσωση (22) και λαμβάνοντας υπόψη ότι $\varepsilon(-x_p) = 0$

$$\int_{\varepsilon(-x_p)}^{\varepsilon(x)} d\varepsilon = \int_{-x_p}^x \left(\frac{-qNa}{\varepsilon_s \varepsilon_o} \right) dx = \frac{-qNa}{\varepsilon_s \varepsilon_o} x \Big|_{-x_p}^x$$

$$\varepsilon(x) = \frac{-qNa}{\varepsilon_s \varepsilon_o} (x + x_p) \quad \text{για } -x_p \leq x < 0 \quad (25)$$

όμοια έχουμε

$$\varepsilon(x) = \frac{-qNd}{\varepsilon_s \varepsilon_o} (x_n - x) \quad \text{για } 0 < x \leq x_n \quad (26)$$

το ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να είναι συνεχές στο σημείο $x=0$ άρα:

$$\frac{-qNa}{\epsilon_s \epsilon_o} x_p = \frac{-qNd}{\epsilon_s \epsilon_o} x_n$$

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (27)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο $x=0$ θα έχει την μέγιστη απόλυτη τιμή του:

$$\epsilon_m = \frac{-qN_d x_n}{\epsilon_s \epsilon_o} = \frac{-qN_a x_p}{\epsilon_s \epsilon_o} \quad (28)$$

Η γραφική παράσταση του ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει του x φαίνεται στο σχημα2.

Το ηλεκτρικό δυναμικό $V(x)$ μέσα στην περιοχή απογύμνωσης υπολογίζεται από την σχέση $dV/dx = -\epsilon$. Από την εξίσωση (25) και θεωρώντας $V(-x_p)=V_p=0$ εκ συμβάσεως έχουμε:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{qN_a}{\epsilon_s \epsilon_o} (x + x_p) \quad \text{για } -x_p \leq x < 0 \quad (29)$$

$$\int_{V(-x_p)}^{V(x)} dV = \frac{qN_a}{\epsilon_s \epsilon_o} \int_{-x_p}^x (x + x_p) dx = \frac{qN_a}{\epsilon_s \epsilon_o} \left(\frac{x^2}{2} + x_p x \right) \Big|_{-x_p}^x$$

$$V(x) = \frac{qN_a}{2\epsilon_s \epsilon_o} (x + x_p)^2 \quad \text{για } -x_p \leq x < 0 \quad (30)$$

Και από την εξίσωση (26) λαμβάνοντας υπόψη ότι $V(x_n)=V_n=V_{bi}$ αφού $V_{bi}=V_n-V_p$ και $V_p=0$, έχουμε:

$$V(x) = V_{bi} - \frac{qN_d}{2\epsilon_s \epsilon_o} (x_n - x)^2 \quad \text{για } 0 < x \leq x_n \quad (31)$$

Η γραφική παράσταση του $V(x)$ συναρτήσει του x , σύμφωνα με τις εξισώσεις (27) (30) και (31) δίνεται στο σχήμα 2.

3.5 Υπολογισμός του πλάτους της περιοχής απογύμνωσης

Η περιοχή απογύμνωσης καταλαμβάνει διάστημα x_n μέσα στην πλευρά n ενώ μέσα στην πλευρά p καταλαμβάνει διάστημα x_p (σχήμα 2). Το συνολικό πλάτος W της περιοχής απογύμνωσης θα είναι:

$$W = x_n + x_p \quad (32)$$

Από τις εξισώσεις (32) και (27) μπορούμε να βρούμε τη σχέση μεταξύ των x_n , x_p και του συνολικού πλάτους W . Έτσι έχουμε:

$$x_n = \frac{N_a}{N_a + N_d} W \quad (33)$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a + N_d} W \quad (34)$$

Βλέπουμε ότι η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται περισσότερο στην πλευρά της μικρότερης συγκέντρωσης προσμίξεων.

Απαιτώντας τη συνέχεια της συναρτήσεως $V(x)$ στο σημείο $x=0$ από τις εξισώσεις (30) και (31) έχουμε:

$$\frac{qN_a}{2\varepsilon_s\varepsilon_o} x_p^2 = V_{bi} - \frac{qN_d}{2\varepsilon_s\varepsilon_o} x_n^2 \quad (35)$$

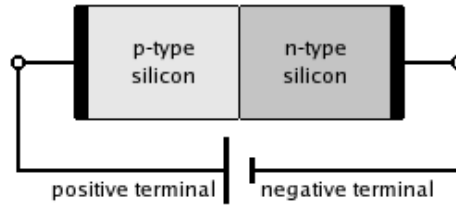
Και από τις εξισώσεις (33), (34) και (35) έχουμε:

$$\frac{qN_a}{2\varepsilon_s\varepsilon_o} \frac{N_d^2}{(N_a + N_d)^2} W^2 = V_{bi} - \frac{qN_d}{2\varepsilon_s\varepsilon_o} \frac{N_a^2}{(N_a + N_d)^2} W^2$$
$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o V_{bi} (N_a + N_d)}{q N_a N_d} \right]^{1/2} \quad (36)$$

3.6 Εφαρμογή εξωτερικής τάσης V_A

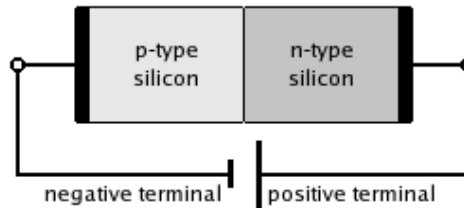
Υποθέτοντας ότι η πτώση τάσης στις επαφές και στην κάθε ουδέτερη περιοχή είναι ίση με μηδέν τότε η εξωτερική τάση εφαρμόζεται στην περιοχή απογύμνωσης.

- i) Στην ορθή πόλωση $V_j = V_{bi} - V_A$ ($V_A > 0$)



σχήμα 3

- ii) Ανάστροφη πόλωση $V_j = V_{bi} + |V_A| = V_{bi} - V_A$ ($V_A < 0$)



σχήμα 4

Επομένως όταν εφαρμόζουμε εξωτερική τάση γενικά έχουμε:

$$V_j = V_{bi} - V_A$$

Έτσι για παράδειγμα όταν εφαρμόσουμε εξωτερική τάση το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης γίνεται:

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_o}{q} (V_{bi} - V_A) \frac{(N_a + N_d)}{N_a N_d} \right]^{1/2} \quad (37)$$

3.7 Χωρητικότητα απότομης επαφής pn

Γνωρίζουμε ότι:

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (38)$$

Αλλά από τα προηγούμενα προκύπτει ότι σε κάθε πλευρά της περιοχής απογύμνωσης το φορτίο είναι:

$$|Q| = qAx_n N_d = qAx_p N_a$$

ή ανά μονάδα επιφάνειας:

$$|Q| = qx_n N_d = qx_p N_a \quad (39)$$

και με την βοήθεια των εξισώσεων (33) και (37) η (39) γίνεται:

$$|Q| = \left[2q\varepsilon_s \varepsilon_o (V_{bi} - V_A) \frac{N_d N_a}{N_d + N_a} \right]^{1/2} \quad (40)$$

Στη συνέχεια από τις (38) και (40) βρίσκουμε ότι:

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{2q\varepsilon_s \varepsilon_o}{(V_{bi} - V_A)} \frac{N_d N_a}{N_d + N_a} \right]^{1/2} \quad (41)$$

Από τις εξισώσεις (37) και (41) Βλέπουμε επίσης ότι:

$$C = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_o}{W} \quad (42)$$

Η εξίσωση (41) μπορεί να γραφτεί επίσης σαν:

$$C = \left[\frac{q \varepsilon_s \varepsilon_o}{2(V_{bi} - V_A) \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)} \right]^{1/2} \quad (43)$$

οπότε αν έχουμε μια επαφή p⁺n (δηλ. Na>>Nd) η (43) γίνεται:

$$C \cong \left[\frac{q \varepsilon_s \varepsilon_o N_d}{(V_{bi} - V_A)} \right]^{1/2} \quad (44)$$

ενώ αν έχουμε μια επαφή n⁺p (δηλ. Nd>>Na) η (43) γίνεται:

$$C \cong \left[\frac{q \varepsilon_s \varepsilon_o N_a}{(V_{bi} - V_A)} \right]^{1/2} \quad (45)$$

3.8 Ισορροπία

Όπως είπαμε και στην αρχή όταν φέρουμε σε επαφή τα δυο κομμάτια ημιαγωγών τύπου p και τύπου n αυτό που γίνεται είναι μεταφορά οπών και ηλεκτρονίων μέχρι να επέλθει Ισορροπία λόγω του πεδίου που δημιουργείται.

Στην Ισορροπία το ολικό ρεύμα είναι μηδέν αλλά όχι και οι συνιστώσες του.

Έχουμε λοιπόν:

$$J_{ολ}=0, \quad J_p=0, \quad J_n=0$$

$$\begin{aligned} J_p = 0 &\Rightarrow J_p^{drift} + J_p^{dif} = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow -qD_p \frac{dp}{dx} + q\mu_p p\varepsilon = 0 \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} j_n = 0 &\Rightarrow J_n^{drift} + J_n^{dif} = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow qD_n \frac{dn}{dx} + q\mu_n n\varepsilon = 0 \end{aligned} \quad (47)$$

και ισχύει επίσης ότι:

$$D_i = \frac{KT}{q} \mu_i \quad (48)$$

3.9 Εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού V_A

Η εφαρμογή κάποιου εξωτερικού δυναμικού V_A έχει σαν αποτέλεσμα το σύστημα να φεύγει από την Ισορροπία.

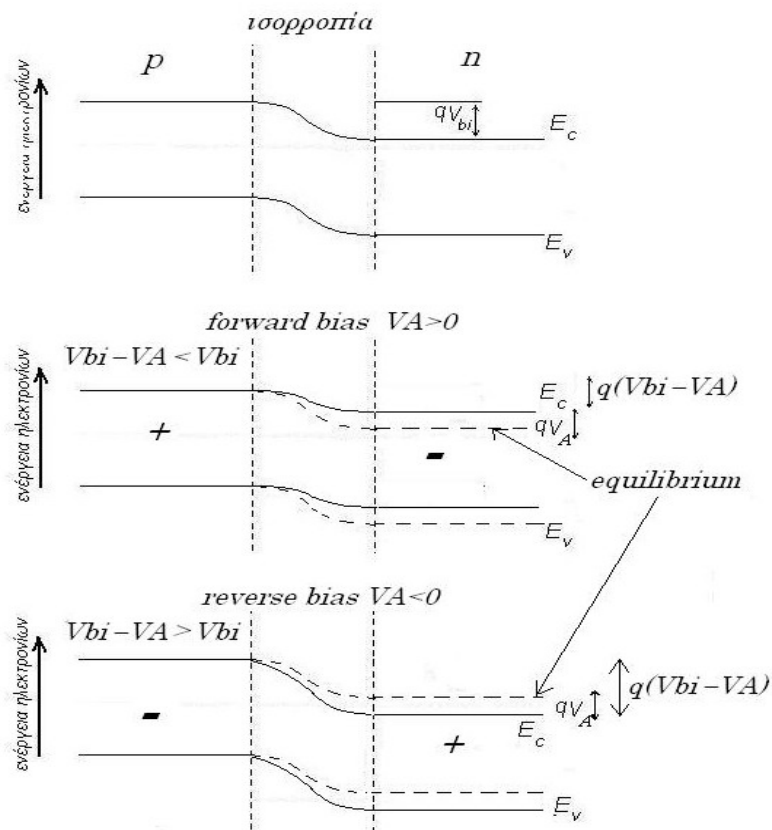
Αν $V_A > 0$

Αν εφαρμόσουμε θετική τάση, δηλαδή η επαφή μας βρεθεί σε ορθή πόλωση, αυτό που συμβαίνει είναι να αυξηθεί το ρεύμα διάχυσης ενώ το ρεύμα μεταφοράς παραμένει σταθερό.

Αυτό συμβαίνει γιατί με αυτό τον τρόπο πόλωσης μικραίνει το Barrier όπως μπορούμε να δούμε και στο σχήμα 4.

Αν $V_A < 0$

Στην περίπτωση αυτή επειδή αυξάνω το Barrier αυτό που συμβαίνει είναι ότι το ρεύμα διάχυσης να μικραίνει σε σχέση πάντα με την κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, ενώ το ρεύμα μεταφοράς παραμένει σταθερό (σχήμα 5).



σχήμα 5

3.10 Εύρεση σχέσεων I-V_A

Οι εξισώσεις που πρέπει να λύσω και να έχω υπόψη μου είναι οι εξής:

Πλευρά n: έχω φορείς injected οπές

$$\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} + G_L \quad (49)$$

$$J_p \cong -qD_p \frac{\Delta p_n}{dx} \quad (50)$$

$$p_n = p_{no} + \Delta p_n(x) \quad (51)$$

Πλευρά p: έχω φορείς injected ηλεκτρόνια

$$\frac{\partial \Delta n_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} + G_L \quad (52)$$

$$J_n \cong qD_n \frac{\Delta n_p}{dx} \quad (53)$$

$$n_p = n_{po} + \Delta n_p(x) \quad (54)$$

Για τις λύσεις θεωρώ steady state και ότι δεν έχω φως. Άρα:

$$D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p} = 0 \quad (55)$$

$$D_n \frac{\partial^2 \Delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} = 0 \quad (55)$$

επίσης το ολικό ρεύμα J στην διόδο είναι σταθερό. Οπότε:

$$\begin{aligned} J_{ολ} &= J_n(x) + J_p(x) \Rightarrow \\ J_{ολ} &= J_n(-x_p) + J_p(x_n) \end{aligned} \quad (56)$$

Συνοριακές συνθήκες στα x_n και $-x_p$

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} \cong 0 \Rightarrow \\ \varepsilon &= -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = -\frac{KT}{q} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} \end{aligned} \quad (57)$$

Το δυναμικό είναι:

$$\begin{aligned} V_{bi} - V_A &= -\int_{-x_p}^{x_n} \varepsilon dx = \left[\frac{KT}{q} \ln(n) \right]_{n(-x_p)}^{n(x_n)} \Rightarrow \\ V_{bi} - V_A &= \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{n_n(x_n)}{n_p(-x_p)} \right) \Rightarrow \\ n_p(-x_p) &= n_n(x_n) e^{-qV_{bi}/KT} e^{qV_A/KT} \end{aligned} \quad (58)$$

Σε Θ.Ι. σύμφωνα με την σχέση (11) Έχουμε :

$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{n_{no} p_{po}}{n_i^2} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{n_i^2}{n_{no} p_{po}} = e^{-qV_{bi}/KT} \quad (59)$$

Άρα αφού το $n_n(x_n) = n_{no}$ από τις σχέσεις (58) και (59) Έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} n_p(-x_p) &= \frac{n_{no} n_i^2}{n_{no} p_{po}} e^{qV_A/KT} \Rightarrow \\ n_p(-x_p) &= n_{po} e^{qV_A/KT} \end{aligned} \quad (60)$$

Και από την σχέση (54) Έχουμε:

$$\Delta n_p = n_{po} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (61)$$

Όμοια για τις οπές έχουμε:

$$\Delta p_n = p_{no} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (62)$$

$$p_n(x_n) = p_{no} e^{qV_A/KT} \quad (63)$$

Συνοριακές συνθήκες στο $x \rightarrow \pm\infty$

$$\begin{aligned}\Delta n_p(-\infty) &= 0 \\ \Delta p_n(\infty) &= 0\end{aligned}\tag{64}$$

Εύρεση των εξισώσεων

Πλευρά n: $x > x_n \Rightarrow x' \geq 0$

Λύνω την

$$D_p \frac{\partial^2 \Delta p_n(x')}{dx'^2} = \frac{\Delta p_n}{\tau_p} \Rightarrow \frac{\partial^2 \Delta p_n(x')}{dx'^2} = \frac{\Delta p_n}{L_p}\tag{65}$$

όπου

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}\tag{66}$$

Έχουμε λύσεις της μορφής:

$$\Delta p_n(x) = C_1 e^{-x'/L_p} + C_2 e^{x'/L_p}\tag{67}$$

και έχουμε συνοριακές συνθήκες:

$$\Delta p_n(\infty) = 0 \Rightarrow C_2 = 0\tag{68}$$

για να μην έχουμε απειρισμό, και:

$$\Delta p_n(x'=0) = C_1 = p_{no} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (69)$$

Άρα

$$\Delta p_n(x') = p_{no} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x'/L_p} \quad (70)$$

Οπότε:

$$p_n(x') = p_{no} + p_{no} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x'/L_p} \quad (71)$$

Και σύμφωνα με την σχέση (50) προκύπτει ότι:

$$J_p \cong -qD_p \frac{\Delta p_n}{dx} = \frac{qD_p}{L_p} p_{no} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x'/L_p} \quad (72)$$

Από την σχέση (72) για $x'=0$ παίρνουμε το ρεύμα στην περιοχή απογύμνωσης:

$$J_p^{dep} = \frac{qD_p}{L_p} p_{no} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (73)$$

Πλευρά p: $x \leq -x_p \Rightarrow x'' \geq 0$

Με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν αλλά για την Πλευρά p μπορούμε να πάρουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta n_p(x'') = n_{po} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x''/L_n} \quad (74)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (75)$$

$$J_n(x'') = \frac{qD_n}{L_n} n_{po} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) e^{-x''/L_n} \quad (76)$$

$$J_n(x''=0) = \frac{qD_n}{L_n} n_{po} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (77)$$

Άρα το συνολικό ρεύμα θα είναι:

$$J_{ολ} = J_n(x''=0) + J_p(x'=0) \Rightarrow$$

$$J_{ολ} = q \left(\frac{D_n n_{po}}{L_n} + \frac{D_p p_{no}}{L_p} \right) \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (78)$$

που μπορεί να γραφτεί και σαν:

$$J_{ολ} = q \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (79)$$

από όπου φαίνεται ότι αν έχουμε μια επαφή p⁺-n δηλαδή N_A >> N_D το ρεύμα δίνεται από την σχέση:

$$J_{ολ} = q \left(\frac{D_p}{L_p} \frac{n_i^2}{N_D} \right) \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) = q \frac{D_p p_{no}}{L_p} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (80)$$

ενώ αν έχουμε επαφή p-n⁺ το ρεύμα γίνεται:

$$J_{ολ} = q \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) = q \frac{D_n n_{po}}{L_n} \left(e^{qV_A/KT} - 1 \right) \quad (81)$$

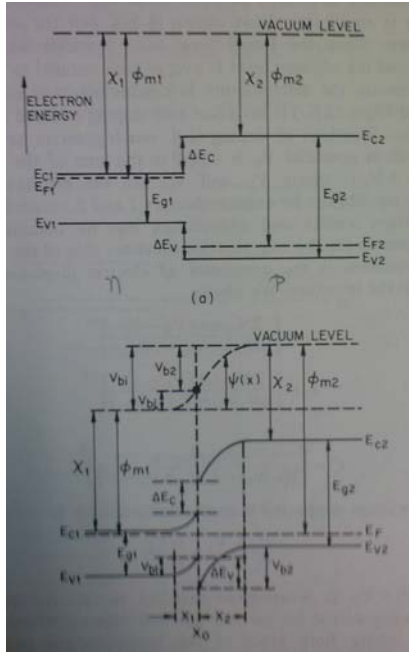
3.11 Ετεροεπαφή

Μια ετεροεπαφή είναι μια επαφή που σχηματίζεται ανάμεσα σε δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Όταν οι δύο ημιαγωγοί έχουν τον ίδιο τύπο αγωγιμότητας, η επαφή ονομάζεται ίδιου τύπου ετεροεπαφή (n-n ή p-p ετεροεπαφή). Όταν η φορείς αγωγιμότητας διαφέρουν, η επαφή ονομάζεται διαφορετικού τύπου ετεροεπαφή (p-n ετεροεπαφή). Μια σύντομη περιγραφή της ετεροεπαφής παρουσιάζεται παρακάτω.

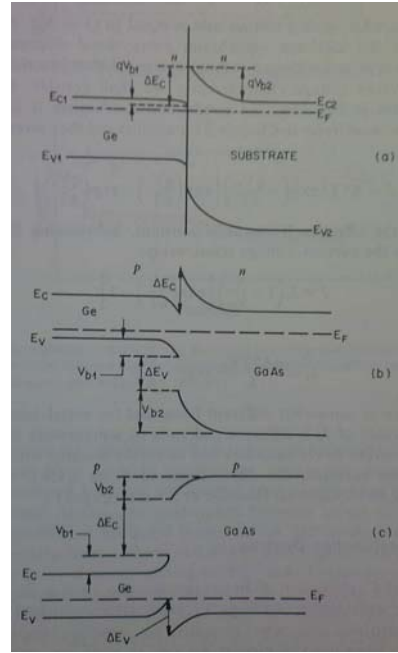
Το μοντέλο ενεργειακών ζωνών μιας απότομης ετεροεπαφής χωρίς παγίδες στην διεπαφή προτάθηκε από τον Anderson που βασίζεται στην μελέτη ομοεπαφής που παρουσιάστηκε πιο πριν. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα ενεργειακά διαγράμματα τριών ετεροεπαφών με διαφορετικού τύπου συγκέντρωσης.

Για τους δύο ημιαγωγούς υποθέτουμε ότι έχουν διαφορετικά ενεργειακά χάσματα E_g , διαφορετικές διηλεκτρικές σταθερές ϵ , διαφορετικά έργα εξόδου Φ_m , καθώς και διαφορετικές ηλεκτρονική συγγένειες χ . Σαν έργο εξόδου και σαν ηλεκτρονική συγγένεια ορίζεται η ενέργεια που απαιτείται για την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από την στάθμη Fermi E_F και από το κάτω μέρος της ζώνης αγωγιμότητας E_C , αντίστοιχα, και να μεταφερθεί έξω από το υλικό (στάθμη κενού).

Όταν μια επαφή που σχηματίζεται μεταξύ αυτών των ημιαγωγών, το ενεργειακό διάγραμμα ζωνών στην ισορροπία, παίρνει την μορφή που φαίνεται στην εικόνα. 1 για μια n-p ετεροεπαφή όπου, σε αυτό το παράδειγμα, το μικρό ενεργειακό χάσμα αντιστοιχεί στον ημιαγωγό n-τύπου.



σχήμα 6



σχήμα 7

Το συνολικό εσωτερικό δυναμικό είναι ίσο με το άθροισμα των επιμερους εσωτερικών δυναμικών ($V_{b1}+V_{b2}$) όπου V_{b1} και V_{b2} είναι τα ηλεκτροστατικά δυναμικά στους δύο ημιαγωγούς στην ισορροπία. Στο σχήμα 6 φαίνεται ότι στην ισορροπία, $E_{f1}=E_{f2}$, το ολικό εσωτερικό δυναμικό δίνεται από την σχέση $V_{bi}=V_{b1}+V_{b2}$. Η περιοχή απογύμνωσης και η χωρητικότητα μπορούν να βρεθούν λύνοντας όπως προηγουμένως την εξίσωση Poisson για την απότομη επαφή σε κάθε πλευρά της επαφής. Όταν η τάση που εφαρμόζουμε είναι V , η περιοχή απογύμνωσης σε κάθε πλευρά και η ολική περιοχή απογύμνωσης δίνεται από τις σχέσεις:

$$x_1 = \left[\frac{2N_a \epsilon_1 \epsilon_2 (V_{bi} - V)}{qN_d (\epsilon_1 N_d + \epsilon_2 N_a)} \right]^{1/2} \quad (82)$$

$$x_2 = \left[\frac{2N_d \epsilon_1 \epsilon_2 (V_{bi} - V)}{qN_a (\epsilon_1 N_d + \epsilon_2 N_a)} \right]^{1/2} \quad (83)$$

και

$$W = x_1 + x_2 \quad (84)$$

Η χωρητικότητα επαφής ανά μονάδα επιφάνειας μπορεί να εκφραστεί ως :

$$C = \left[\frac{qN_d N_a \varepsilon_1 \varepsilon_2}{2(\varepsilon_1 N_d + \varepsilon_2 N_a)(V_{bi} - V)} \right]^{1/2} \quad (85)$$

Και το ολικό ρεύμα δίνεται από τον τύπο:

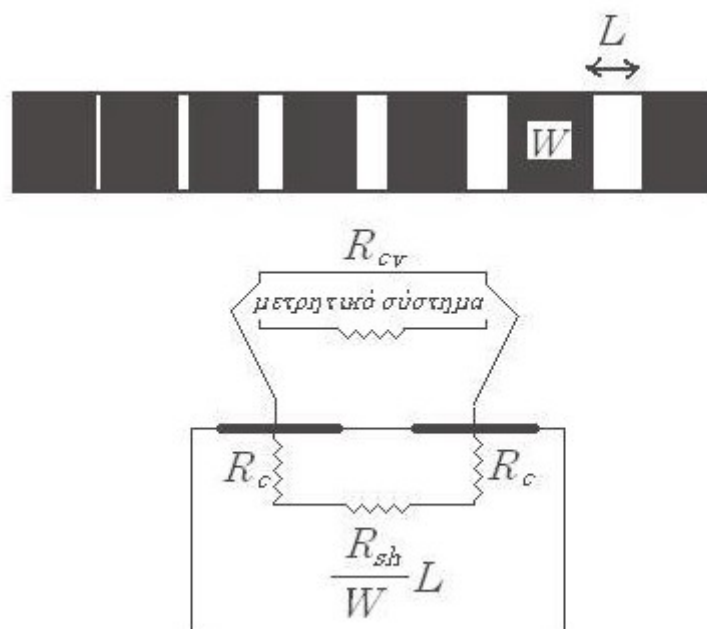
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (86)$$

3.12 Μετρήσεις Ωμικών Επαφών

Transmission Line Model (TLM)

Οι Μετρήσεις TLM βασίζονται στη μέτρηση της αντίστασης R μεταξύ δυο Ωμικών Επαφών. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές γεωμετρίες σχεδίων για τις μετρήσεις TLM και οι πιο συνηθισμένες γεωμετρίες είναι των γραμμικών και των κυκλικών TLM.

3.12.1 Γραμμική γεωμετρία TLM



σχήμα 8

Η αντίσταση που μετράμε ανάμεσα σε δυο ωμικές επαφές είναι ίση με το διπλάσιο της αντίστασης επαφής R_c , συν την αντίσταση του ημιαγωγού, μεταξύ των δυο Επαφών ($R_{sh}L/W$), συν την αντίσταση επαφής των ακίδων του μετρητικού συστήματος με τις ωμικές επαφές R_{CV} .

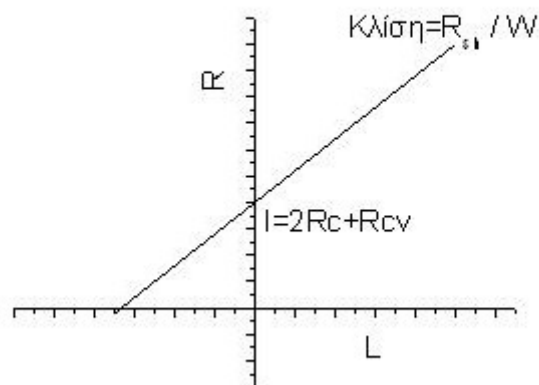
$$R = 2R_c + \frac{R_{sh}}{W}L + R_{CV} \quad (87)$$

Όπου L είναι η απόσταση μεταξύ των μεταλλικών Επαφών και W η διάσταση της επαφής και R_{sh} η αντίσταση φύλλου του ημιαγωγικού δείγματος.

Αρχικά υπολογίζουμε την αντίσταση επαφής R_{CV} τοποθετώντας τις ακίδες του μετρητικού πάνω στην ίδια επαφή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αντίσταση R μετρώντας τάση και ρεύμα μεταξύ διαδοχικών Ωμικών Επαφών σύμφωνα με την σχέση:

$$R = \frac{V}{I} \quad (88)$$

και κατασκευάζουμε διάγραμμα της αντίστασης ως συνάρτηση της μεταξύ τους απόστασης. Έτσι έχουμε ένα διάγραμμα της μορφής που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



σχήμα 9

Η διατομή του γραφήματος είναι ίση με:

$$I = 2R_C + R_{CV} \quad (89)$$

και η κλίση είναι ίση με:

$$\kappa\lambda\iota\sigma\eta = \frac{R_{sh}}{W} \quad (90)$$

οπότε μπορούμε να υπολογίσουμε τα RC και Rsh, δεδομένου ότι οι διαστάσεις των Επαφών είναι γνωστές αφού η γεωμετρία του TLM έχει κατασκευαστεί με φωτολιθογραφική τεχνική.

Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική αντίσταση ρ_C και το transfer length L_T σύμφωνα με τις σχέσεις:

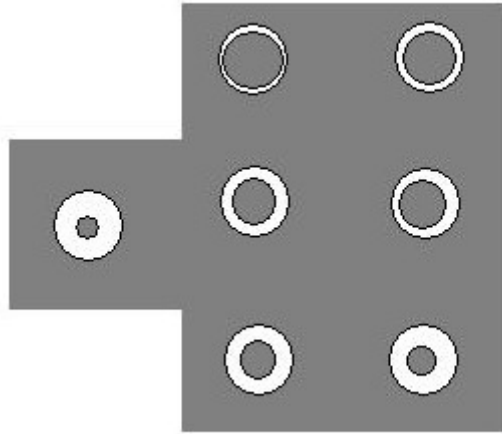
$$\rho_C = \frac{W}{S} \sqrt{\frac{I}{2}} \quad (91)$$

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_C}{R_{sh}}} \quad (92)$$

Όπου το I είναι η διατομή του γραφήματος, W είναι το μέγεθος της επαφής και S είναι η κλίση του γραφήματος.

3.12.2 Κυκλική γεωμετρία TLM

Αντίστοιχα και στην Κυκλική γεωμετρία που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα με τον ίδιο τρόπο μετράμε τις αντιστάσεις και φτιάχνουμε όπως και πριν το ίδιο διάγραμμα.



σχήμα 10

Σε αυτή την περίπτωση οι τύποι διαφοροποιούνται ως εξής:

$$R_{sh} = 2\pi S \quad (93)$$

$$L_T = \frac{I}{S} \left(\frac{1}{D_1/2} + \frac{1}{D_2/2} \right)^{-1} \quad (94)$$

$$I = \frac{R_{sh}}{2\pi} \left(\frac{\rho_c}{R_{sh}} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{D_1/2} + \frac{1}{D_2/2} \right) \quad (95)$$

όπου D_1 και D_2 είναι η εσωτερική και η εξωτερική διάμετρος των κυκλικών επαφών αντίστοιχα

4.1 Φωτολιθογραφία

Διαδικασία φωτολιθογραφίας που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματά μας.

4.2 Καθαρισμός υποστρώματος.

Ο καθαρισμός του υποστρώματος γίνεται σε βήματα. Καταρχάς, εμβαπτίζουμε το υπόστρωμά μας σε τριχλωροαιθυλένιο (C_2HCl_3) για λίγο χρόνο (μερικά λεπτά) που έχει ως στόχο την απομάκρυνση λιπών. Εν συνεχεία, αφαιρούμε το υπόστρωμά μας από το τριχλωροαιθυλένιο και το εμβαπτίζουμε σε ακετόνη (C_3H_6O) (μερικά λεπτά) η οποία απομακρύνει υπολείμματα του τριχλωροαιθυλενίου. Έπειτα αφαιρούμε το υπόστρωμα από την ακετόνη και το εμβαπτίζουμε στην προπανόλη (C_3H_7OH) (μερικά λεπτά) με σκοπό να απομακρύνουμε τα υπολείμματα της ακετόνης που υπάρχουν στο υπόστρωμά μας. Τέλος αφαιρούμε το υπόστρωμα από την προπανόλη και το ξεπλένουμε σε τρεχούμενο απιονισμένο νερό για αρκετό χρόνο και έπειτα το στεγνώνουμε με αέριο άζωτο. Ελέγχουμε το υπόστρωμα μετά τον καθαρισμό ώστε να μην υπάρχουν στίγματα και 'λεκέδες'. Στην περίπτωση που το δείγμα δεν καθαρίζεται εύκολα, μπορεί να χρησιμοποιηθούν υπέρηχοι όταν το δείγμα βρίσκεται εμβαπτισμένο σε τριχλωροαιθυλένιο, ακετόνη ή προπανόλη.

Στη συνέχεια εμβαπτίζουμε το υπόστρωμά μας σε HF 10 % για λίγα δευτερόλεπτα ,ώστε να γίνει καθαρισμός στην επιφάνειά του από τυχόν οξειδία που έχουν αναπτυχθεί. Η όλη διαδικασία εκτελείται σε συγκεκριμένο πάγκο χημικής επεξεργασίας σε ειδικά πλαστικά δοχεία.

4.3 Είδη φωτορητίνης.

Στο εμπόριο υπάρχουν διάφορων τύπων φωτορητίνες. Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται και η κατάλληλη φωτορητίνη. Στα πειράματά μας χρησιμοποιήθηκε η AZ5214 της εταιρίας Clariant.

4.3.1 Επίστρωση της φωτορητίνης με φυγοκέντριση.

Η εναπόθεση της φωτορητίνης γίνεται στον στείρο χώρο, σε συγκεκριμένο πάγκο επεξεργασίας χρησιμοποιώντας έναν από τους δύο φυγοκεντριστές της εταιρίας Headway.

4.3.2 Θέρμανση φωτορητίνης

Η θέρμανση της πραγματοποιείται στον στείρο χώρο, επιλέγοντας έναν από τους δύο ειδικούς φούρνους (σε θερμοκρασία 110⁰C και 85⁰C) ή την θερμαντική πλάκα με δυνατότητα πρόσφυσης του υποστρώματος λόγω κενού (που μπορούμε να επιλέγουμε την θερμοκρασία που επιθυμούμε).

4.3.3 Έκθεση φωτορητίνης

Η έκθεση της φωτορητίνης γίνεται στον στείρο χώρο με ευθυγραμμιστές масκών της εταιρίας Karl – Suss (MJB3 στα 300 nm, MA6 στα 400 και 248nm).

4.3.4 Εμφάνιση φωτορητίνης

Ο εμφανιστής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο AZ 400 για την εμφάνιση της φωτορητίνης AZ 5214. Και η εμφάνιση γίνεται σε γυάλινο δοχείο με διάλυμα απιονισμένου νερού και εμφανιστή (σε αναλογία 4:1). Έπειτα χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό και στέγνωμα με αέριο άζωτο.

4.4 Συνταγές που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματά μας.

Για να επιτύχουμε την μεταφορά της γεωμετρίας της μάσκας στο υπόστρωμά μας χρησιμοποιήσαμε την εξής συνταγή: Έγινε χρήση της φωτορητίνης AZ 5214, η επίστρωση έγινε με την βοήθεια του φυγοκεντριστή στις 4000στροφές/λεπτό για 20 δευτερόλεπτα και θέρμανση στους 85 ⁰C για 20 λεπτά, έκθεση στα 300 nm για 30 δευτερόλεπτα. Η εμφάνιση έγινε με απιονισμένο νερό και καυστικό κάλιο σε αναλογία (4 H₂O : 1 KOH) για χρόνο 20 δευτερόλεπτα, επιτεύχθηκε πάχος φωτορητίνης στα 1,2 μm.

Επειδή στο εργαστήριό μας έχουμε μόνο θετική φωτοριτίνη και χρειάστηκε την αντιστροφή μάσκας ακολούθησα την εξής διαδικασία : επίστρωση της φωτορητίνης AZ 5214 με την βοήθεια του φυγοκεντριστή στις 4000στροφές/λεπτό για 20 δευτερόλεπτα και θέρμανση στους 85 °C για 20 λεπτά, έκθεση στα 300 nm με μάσκα για 15 δευτερόλεπτα .Στη συνέχεια έγινε θέρμανση στους 110 °C για 30 λεπτά και έκθεση χωρίς μάσκα για 30 δευτερόλεπτα. Η εμφάνιση τέλος γίνεται με απιονισμένο νερό και καυστικό κάλιο σε αναλογία (4 H₂O : 1 KOH) για χρόνο 1:10 δευτερόλεπτα.

4.5 Μηχανήματα που χρησιμοποιήθηκαν.

4.5.1 Επιμετάλλωση

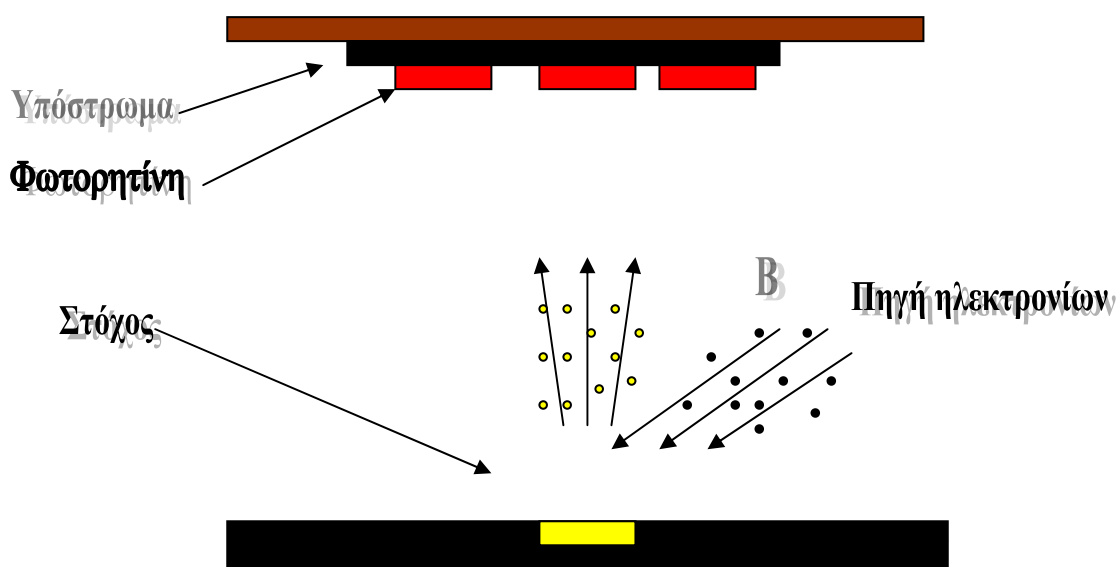
Οι επιμεταλλώσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για την εναπόθεση μεταλλικών στρωμάτων (επαφές) σε ημιαγωγούς, καθώς και για την κατασκευή ηλεκτροδίων, αντιστάσεων, οπλισμών πυκνωτών, γραμμών μεταφοράς, και διασυνδέσεις σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Μπορούν να έχουν συγκεκριμένη σύσταση και γεωμετρία. Πραγματοποιούνται μέσα στον στείρο χώρο αλλά και εκτός.

4.5.2 Επιμετάλλωση με εξάχνωση

Οι επιμεταλλώσεις μέσα στον στείρο χώρο γίνονται με την βοήθεια του εξαχνωτή ηλεκτρονίων (Temescal BJD 1800), σε συνθήκες υψηλού κενού (2×10^{-7} Torr), που δημιουργείται με την βοήθεια μιας κρυσταλλικής υποστηριζόμενη από μια μηχανική αντλία. Η σύσταση και το πάχος των επιμεταλλώσεων ελέγχονται κατά την διάρκεια της εναπόθεσης, μέσα στο σύστημα επιμετάλλωσης. Το σχήμα της επιμετάλλωσης καθορίζεται από την φωτολιθογραφία.

Η αρχή λειτουργίας του εξαχνωτή μετάλλων είναι απλή. Μια δέσμη ηλεκτρονίων δημιουργείται από το κανόνι ηλεκτρονίων (ένα θερμαινόμενο νήμα πυρακτώσεως που εκπέμπει ηλεκτρόνια) και μέσω ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου κατευθύνεται και συγκεντρώνεται στον στόχο μας, που είναι μια ειδική θήκη από άνθρακα όπου τοποθετείται το συγκεκριμένο μέταλλο που θέλουμε να εξαχνώσουμε. Όταν η δέσμη αυτή προσπέσει στον στόχο, εξαχνώνει το μέταλλο (εικόνα 5.5). Την κατάλληλη στιγμή (αφότου έχει θερμανθεί ο στόχος) και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα,

ανάλογα με το επιθυμητό πάχος επιμετάλλωσης, ένα πέτασμα που υπάρχει μπροστά από το δείγμα μας ανοίγει και γίνεται η επιμετάλλωση. Το δείγμα μας είναι τοποθετημένο πάνω από τον στόχο, ούτως ώστε τα εξαχνώμενα άτομα του μετάλλου που κατευθύνονται προς όλες τις κατευθύνσεις να εναποτίθενται στην επιφάνεια του δείγματος που θέλουμε. Ανάλογα το υλικό που θέλουμε να επιμεταλλώσουμε (π.χ. χρυσάφι, αλουμίνιο, γερμάνιο, νικέλιο, τιτάνιο, χαλκό, και άλλα όπως και κάποια διηλεκτρικά όπως διοξείδιο του πυριτίου) λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροί τους όπως πυκνότητα, Z – λόγος και άλλα.



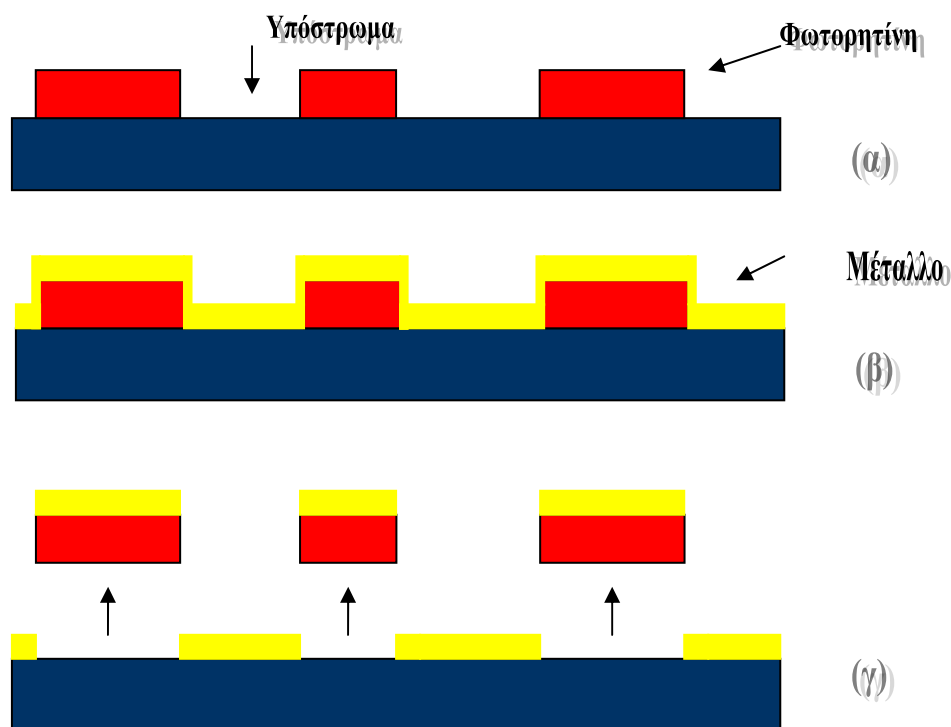
σχήμα 11 Επιμετάλλωση με εξαχνωτή ηλεκτρονίων.

4.5.3 Απομάκρυνση πλεονάζουσας επιμετάλλωσης

Όταν γίνει η εναπόθεση κάποιου υλικού (συνήθως μέταλλο) στο δείγμα η γεωμετρία του μετάλλου δίνεται σύμφωνα με την φωτολιθογραφία. Η φωτορητίνη που έχει επιστρωθεί στο δείγμα διαλύεται με χημικό τρόπο, συμπαρασύροντας το υπερκείμενό της μέταλλο. Με αυτό τον τρόπο το δείγμα παραμένει επιμεταλλωμένο μόνο στις περιοχές όπου δεν υπήρχε φωτορητίνη. Το αποτέλεσμα είναι η επιμετάλλωση να προσλαμβάνει την συμπληρωματική γεωμετρία της φωτορητίνης. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στην εικόνα 5.6.

Ο χημικός τρόπος με τον οποίο διαλύεται η φωτορητίνη (lift – off) είναι με την βοήθεια της ακετόνης. Τοποθετούνται τα δείγματα μέσα σε γυάλινα δοχεία με

ακετόνη για όσο χρόνο χρειαστεί, αναδεύοντας τα δοχεία κατά διαστήματα με κυκλικές κινήσεις εναλλασσόμενης φοράς, αν κριθεί αναγκαίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το πιστόλι ακετόνης και τους υπέρηχους, μέχρι το μέταλλο που βρίσκεται πάνω στην φωτορητίνη να απομακρυνθεί από το υπόστρωμά μας.



σχήμα 12 (α) υπόστρωμα με λιθογραφημένη φωτορητίνη, (β) επιμετάλλωση δείγματος, (γ) μέθοδος αφαίρεσης πλεονάζουσας επιμετάλλωσης (lift – off)

4.6 Χάραξη

Για να κατασκευάσουμε μια δομή πάνω στο υπόστρωμά μας πολλές φορές χρειάζεται να χαράξουμε/αφαιρέσουμε κάποιο στρώμα υλικού ή ακόμα και το ίδιο το υπόστρωμά μας. Αυτό πρέπει να γίνει με τρόπο ώστε να μεταφέρουμε το επιθυμητό σχέδιο στο υπόστρωμά μας. Η υγρή χάραξη είναι ένας τρόπος χάραξης κάποιου υποστρώματος.

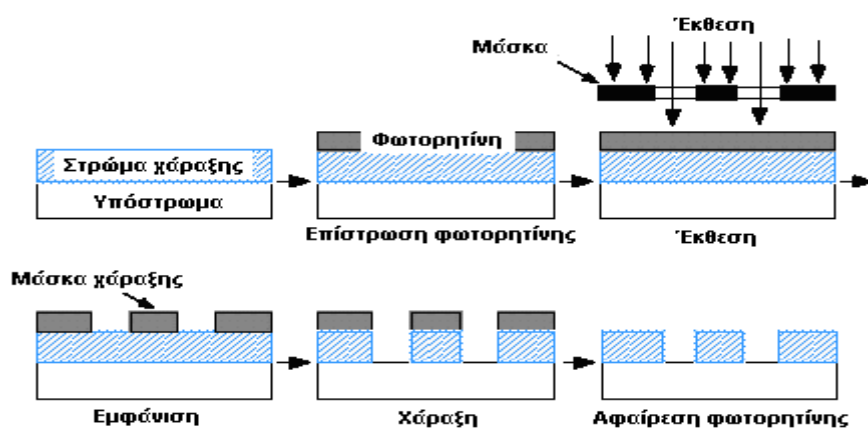
Για να γίνει χάραξη θα πρέπει με κάποιο τρόπο να προστατεύσουμε τις περιοχές που θέλουμε να μείνουν ανέπαφες και αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη μάσκα όπως μέταλλα ή φωτορητίνη. Η φωτορητίνη επιστρώνεται στην επιφάνεια, που θέλουμε να

χαράζουμε, και γίνεται η φωτολιθογραφία έτσι ακάλυπτες περιοχές παραμένουν μόνο όσες θα χαραχθούν.

Η χάραξη του υποστρώματος μας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, με την υγρή ή με την ξηρή χάραξη.

4.6.1 Υγρή χάραξη

Το δείγμα τοποθετείται στην χημική ουσία που χαράζει το στρώμα αλλά αφήνει ανέπαφη την μάσκα από φωτορητίνη και ταυτόχρονα το στρώμα που βρίσκεται κάτω από αυτήν. Στην συνέχεια ξεπλένεται με απιονισμένο νερό, στεγνώνετε με αέριο άζωτο και ευαπτίζεται μέσα σε ακετόνη για να αφαιρεθεί η φωτορητίνη, και τέλος ξεπλένεται ξανά σε απιονισμένο νερό και στεγνώνετε με αέριο άζωτο. Έτσι επιτεύχθηκε η χάραξη το βάθος της οποίας καθορίζεται από τον ρυθμό χάραξης του υγρού, και από τον χρόνο παραμονής του δείγματος μέσα στο υγρό. Η διαδικασία της χημικής χάραξης παρουσιάζεται στην εικόνα 5.9.



σχήμα 13 Διαδικασία υγρής χάραξης

4.6.2 Ξηρή χάραξη ή χάραξη σε περιβάλλον πλάσματος.

Η ξηρή χάραξη ή χάραξη σε περιβάλλον αντιδρώντων ιόντων (RIE) είναι μια διαδικασία χάραξης που επιτυγχάνεται η επιθυμητή και ελεγχόμενη αφαίρεση/μείωση πάχους ημιαγωγού ή οποιουδήποτε άλλου υλικού (διηλεκτρικού, μετάλλου, κράματος, κ.α.). Η ξηρή χάραξη γίνεται σε καθορισμένες γεωμετρίες της επιφάνειας του υλικού (που ορίζονται με φωτολιθογραφία) και η αφαίρεση του μπορεί να γίνει

ισοτροπικά ή ανισοτροπικά (δημιουργία μη κάθετων και κάθετων τοιχωμάτων, αντίστοιχα).

Το υλικό που θα υποστεί την ξηρή χάραξη τοποθετείται σε θάλαμο κενού, στο οποίο η εισαγωγή κατάλληλων αερίων σε συγκεκριμένες ποσότητες και με την εφαρμογή τάσης (μέσω γεννήτριας ισχύος) δημιουργούν πλάσμα, του οποίου τα ιόντα, με χημικό ή/και με μηχανικό τρόπο, προκαλούν την χάραξη του υλικού. Το είδος των αερίων αλλά και οι ποσότητές τους εξαρτώνται από το προς χάραξη υλικό και από την ποιότητα της χάραξης που επιζητείται.

4.7 Απότομη θερμική ανόπτηση (Rapid Thermal Annealing RTA).

Χρησιμοποιούμε το RTA για να επιτύχουμε γρήγορη θερμική ανόπτηση, καθώς αυξάνεται απότομα η θερμοκρασία (χρησιμοποιούνται 10 λάμπες πυρακτώσεως των 500W). Αποτελείται από ένα θάλαμο κενού που μπορεί να αντληθεί με την βοήθεια μιας τούρμπο αντλίας υποστηριζόμενης από μια μηχανική (το κενό που φθάνει είναι 7×10^{-6} mbar). Χρησιμοποιείται κρύο νερό για ψύξη του γυαλιού, όπου το διαπερνάει η ακτινοβολία από τις λάμπες, ώστε να αποφύγουμε την επαγωγική θέρμανση στο δείγμα μας. Επίσης υπάρχουν βάνες αερίων N_2 και μείγματος $95\%N_2$ με $5\%H_2$ που ρέει κατά την διάρκεια της θερμικής ανόπτησης εάν το θελήσουμε. Μέσα στο θάλαμο τοποθετείται κατάλληλο υποστρώμα (wafer), ανάλογα με το είδος του ημιαγωγού που χρησιμοποιούμε και πάνω σε αυτό το δείγμα μας. Στο κάτω μέρος του υποστρώματος ακουμπάει το θερμοζεύγος που με την βοήθειά του ελέγχεται η θερμοκρασία ανόπτησης. Το θερμοζεύγος χρησιμοποιείται μέχρι τους $550^\circ C$, εάν κατά την θερμική ανόπτηση θελήσουμε να φθάσουμε σε υψηλότερες θερμοκρασίες τότε αφαιρούμε το θερμοζεύγος και χρησιμοποιούμε το πυρόμετρο. Κατά την διάρκεια της ανόπτησης έχουμε την δυνατότητα να παρακολουθούμε την θερμοκρασία του υποστρώματος με την βοήθεια ενός βολτομέτρου ή ενός καταγραφικού που σχεδιάζει την μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο. Το RTA που χρησιμοποιήθηκε ήταν της εταιρίας Jipelec το μοντέλο Fav4.

5.1 Πειραματικό μέρος

Τα δείγματα που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις μας είναι τα εξής:

Μετρήσεις I-V,C-V: 232, tf112, tf193.1, tf193.2, tf196.1, tf196.2, tf197.1, tf197.2

Τα δείγματα που έχουν κατάληξη .2 έχουν περάσει και από RTA στους 300 C ενώ αυτά που δεν έχουν ή έχουν .1 είναι χωρίς RTA.

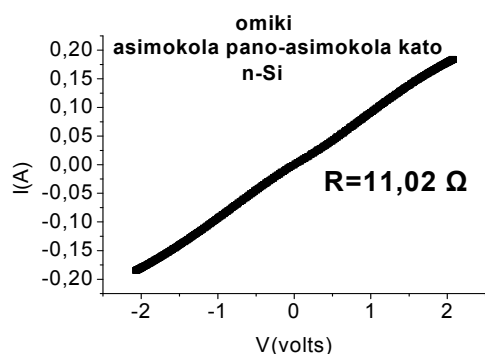
Μετρήσεις TLM: tf 100, tf 30, tf 89, tf 86, tf 144, tf 98, tf 91, SrCuO τα 519, 1109 GaAs και μια σειρά δειγμάτων S954 χωρίς RTA και με RTA στους 300, 400 και 500 βαθμούς C.

Τα δείγματα S954 είναι ZnN και το κάθε ένα έχει τρεις περιοχές. Στην περιοχή 1 έχει τοποθετηθεί Al, στην περιοχή 2 Ni/Au και στην περιοχή 3 TiAu.

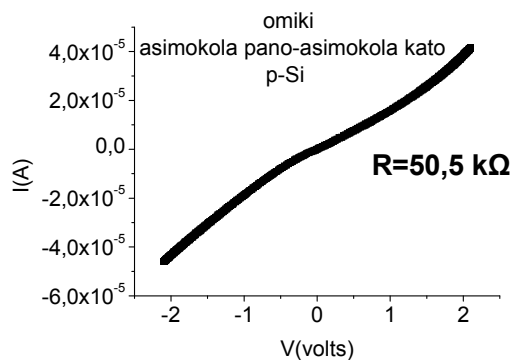
Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ο 370 Programmable Curve tracer-Texttronix-Sony, το Precision LCR Meter-4284A-Agilent και το σύστημα DL-4600-Biorad.

5.2 Μετρήσεις ωμικών επαφών

Στα επόμενα δύο διαγράμματα φαίνονται οι ωμικές επαφές της ασημόκολλας με το n και p πυρίτιο και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα των μετρήσεων TLM.



διάγραμμα I-V ασημόκολλας με n-Si

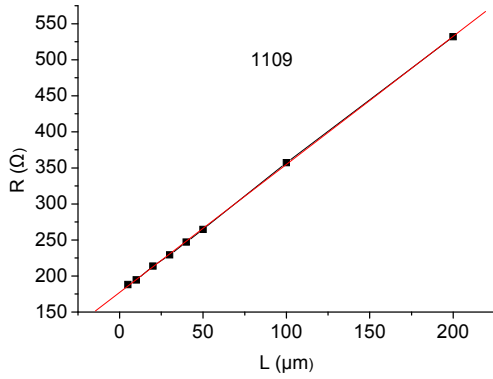


διάγραμμα I-V ασημόκολλας με p-Si

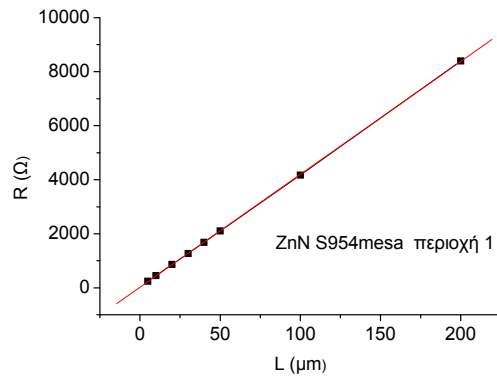
5.3 Μετρήσεις TLM

5.3.1 L - tlm

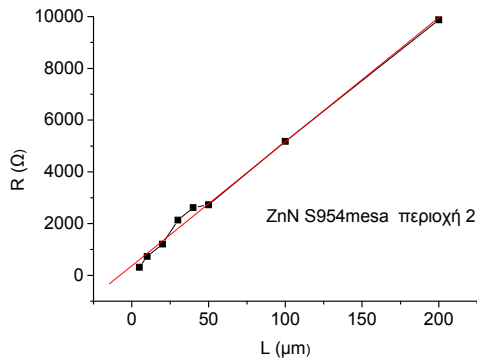
Δείγμα 1109



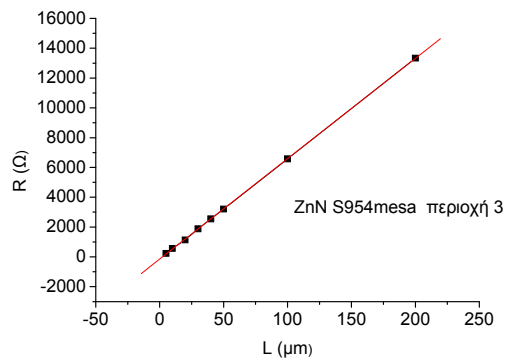
Δείγμα ZnN S954 (1)



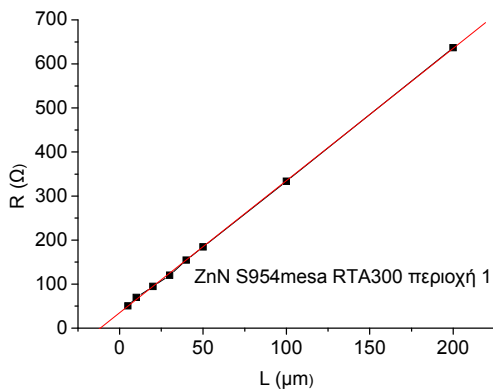
Δείγμα ZnN S954 (2)



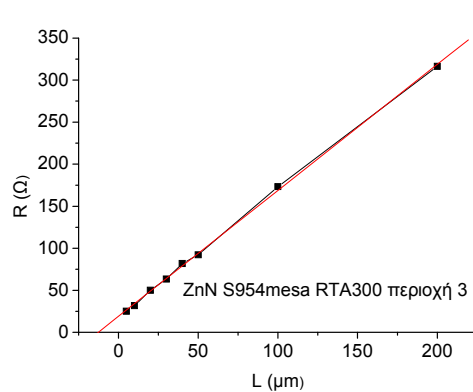
Δείγμα ZnN S954 (3)



ZnN S954mesa RTA300 (1)

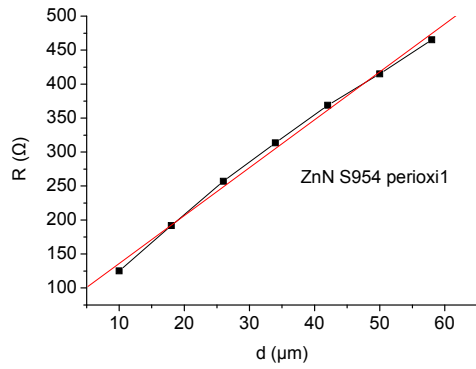


ZnN S954mesa RTA300 (3)

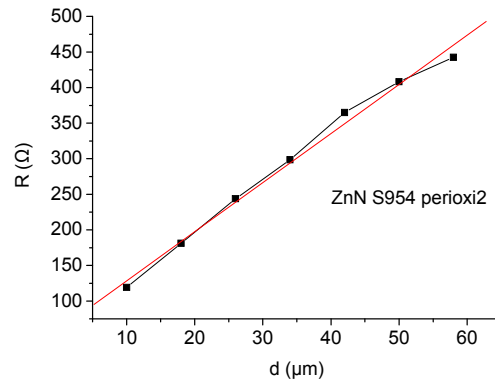


5.3.2 C-TLM

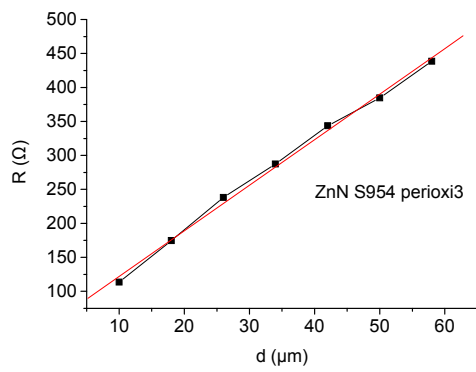
ZnN S954 (1)



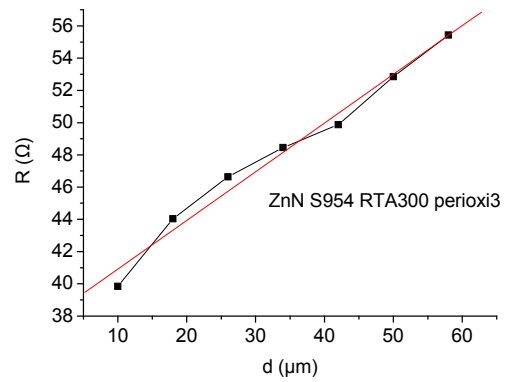
ZnN S954 (2)



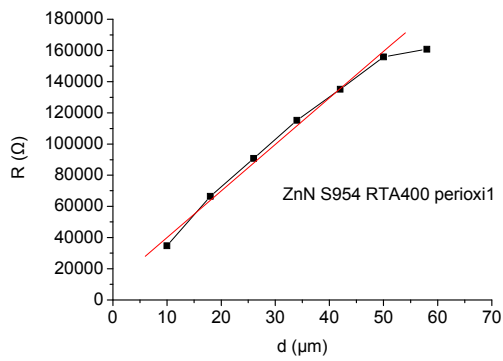
ZnN S954 (3)



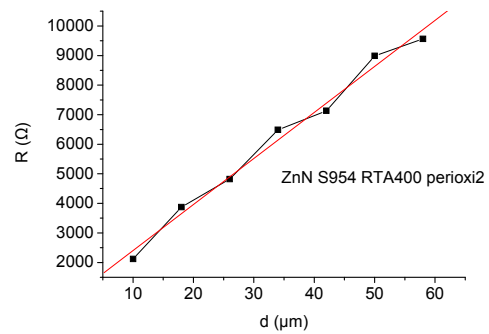
ZnN S954 RTA300 (3)



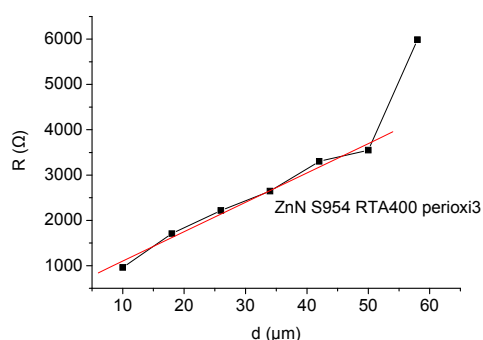
ZnN S954 RTA400 (1)



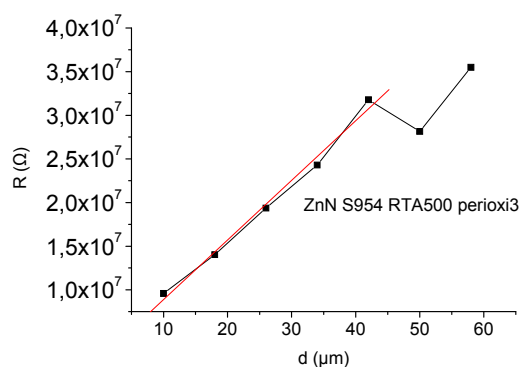
ZnN S954 RTA400 (2)



ZnN S954 RTA400 (3)



ZnN S954 RTA500 (3)



Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν οι τιμές για τα R_{sh} , L_T και ρ_c , σύμφωνα με την θεωρία που έχουμε αναφέρει πιο πριν, που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Δείγμα	R_{sh} (Ω/sq)	L_T	ρ_c (Ωcm^2)
L-TLM			
1109	443,83	$49,93 \cdot 10^{-4}$ cm	$1,1 \cdot 10^{-2}$
ZnN S954 (1)	10443,82	0,25 μm	$6,527 \cdot 10^{-6}$
ZnN S954 (2)	11991,99	3,85 μm	$17,7751 \cdot 10^{-4}$
ZnN S954 (3)	16828,62	1,063 μm	$1,9015 \cdot 10^{-4}$
S954mesa RTA300 (1)	751,04	5,765 μm	$2,4961 \cdot 10^{-4}$
S954mesa RTA300 (3)	374,68	6,32 μm	$1,497 \cdot 10^{-4}$
C-TLM			
S954 (1)	44,24	0,0483 μm	$1,03 \cdot 10^{-9}$
S954 (2)	43,31	0,0447 μm	$0,87 \cdot 10^{-9}$
S954 (3)	42,07	0,0427 μm	$0,77 \cdot 10^{-9}$
ZnN S954 RTA300 (3)	1,897	0,649 μm	$7,99 \cdot 10^{-9}$
ZnN S954 RTA400 (1)	18747,8	0,174 μm	$5,676 \cdot 10^{-6}$
ZnN S954 RTA400 (2)	977,34	0,0283 μm	$7,83 \cdot 10^{-9}$
ZnN S954 RTA400 (3)	407,38	0,036 μm	$5,3 \cdot 10^{-9}$
ZnN S954 RTA500 (3)	4,3 M Ω/sq	0,015 μm	$9,68 \cdot 10^{-6}$

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω αποτελέσματα η επαφή της ασημοκολλας με το πυρίτιο n και p τύπου είναι ωμική επαφή και είναι ικανοποιητική.

Τα γραμμικά TLM έβγαλαν καλά αποτελέσματα όσον αφορά τις τιμές της ειδικής αντίστασης ρ_c σε αντίθεση με τα κυκλικά TLM που εκτός από τα ZnN S954 RTA400(Al) και το ZnN S954 RTA500(Ti/Au) έβγαλαν πολύ μικρή τιμή για το ρ_c την οποία δεν μπορούμε να δεχτούμε ως ορθή. Το σφάλμα μπορεί να οφείλεται σε πειραματικά σφάλματα κατά την διάρκεια της μέτρησης.

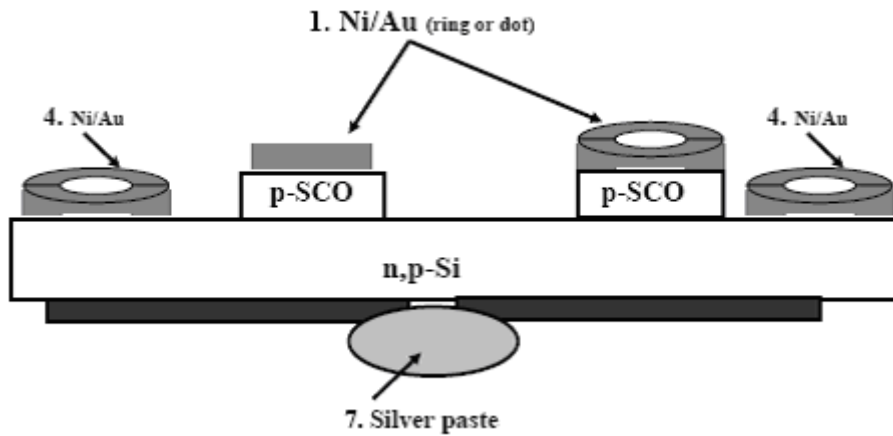
5.4 Μετρήσεις ρεύματος τάσης I-V

Τα δείγματα που κάναμε μετρήσεις ρεύματος τάσης είναι τα εξής:

MBE: AlGaAs 232,

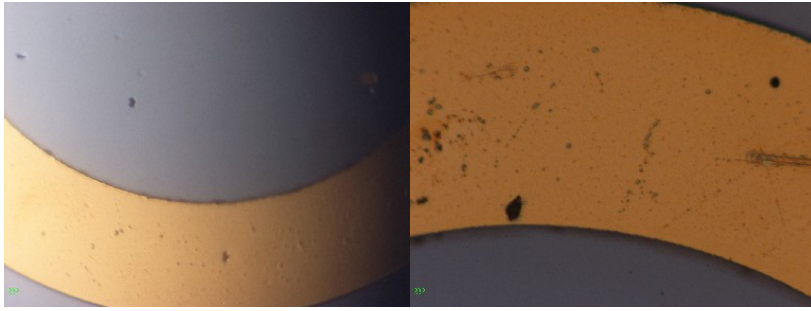
PLD: SCO tf112, tf193.1, tf193.2, tf196.1, tf196.2, tf197.1, tf197.2

Τα δείγματά μας εκτός από το 232 που είναι p-i-n GaAs/AlGaAs με i περιοχή πολλαπλά πηγάδια έχουν την γεωμετρία που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

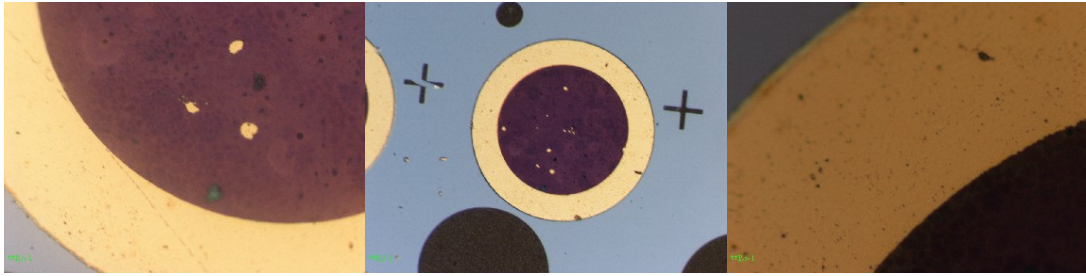


Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας με μερικές πληροφορίες για τα δείγματα μας και μετά μερικές φωτογραφίες.

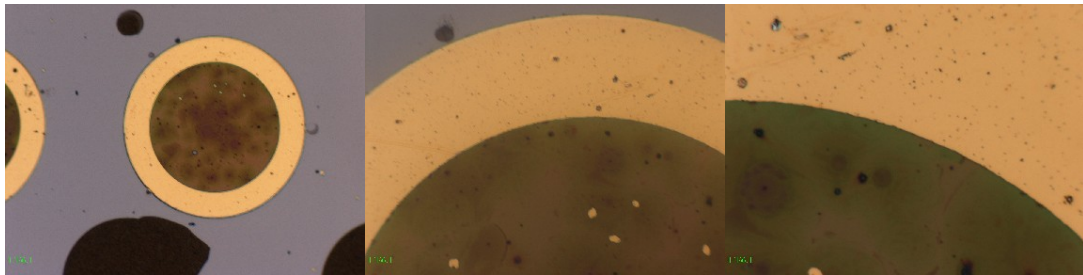
Δείγμα	Πάχος (nm)	Υπόστρωμα/ Συμπεριφορά	RTA (C)	PO2 (mbar)	r.r. (Hz)	Fluence (J/cm ²)	Παλμοί	T-S distance (cm)
SrCu2O2 (TA 050)								
TF193.1+193.2	370	p-Si/ n-p	300	5x10 ⁻⁴	10	2	10000	4
SCO:Ba-3% (TA 047)								
TF196.1+196.2	230	p-Si/ n-p	300	5x10 ⁻⁴	10	2	10000	4
SCO:Ba-6% (TA 054)								
TF197.1+197.2	265	p-Si/ n-p	300	5x10 ⁻⁴	10	2	10000	4
TF204.2	265	n-Si/ p-n	300	5x10 ⁻⁴	10	2	~10000	4
TF205.2	290	n-Si/ p-n	300	5x10 ⁻⁴	10	2	~10000	4
TF 112								
TF112	360	n-Si/ p-n	300	5,1x10 ⁻⁴	10	0,5	7000	4



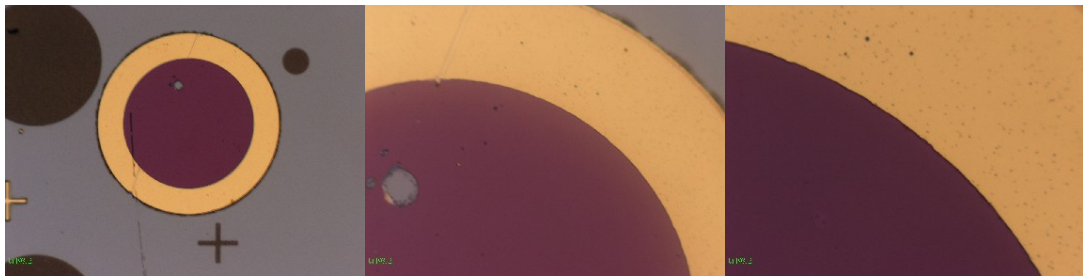
232



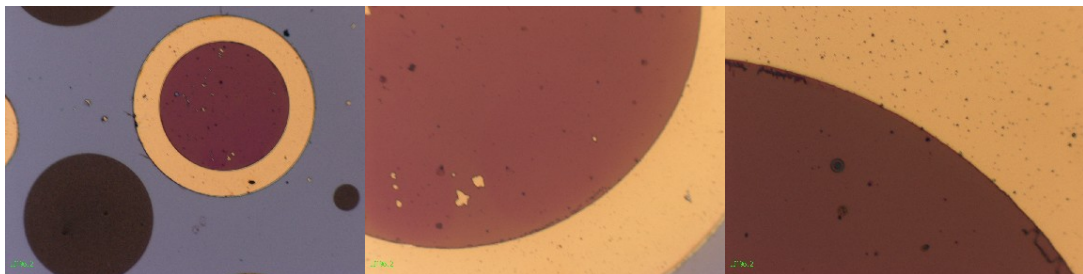
TF193.1



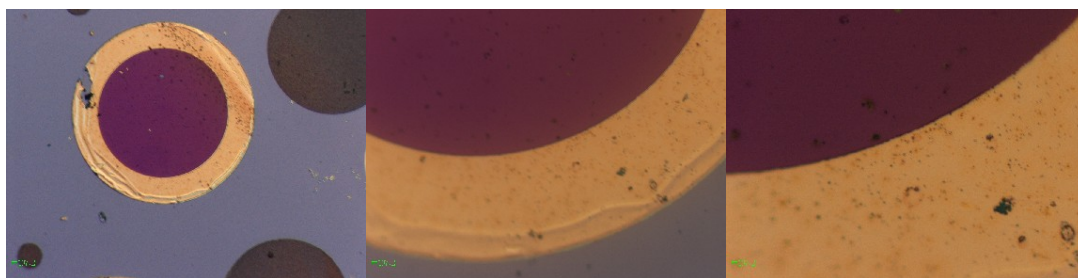
TF196.1



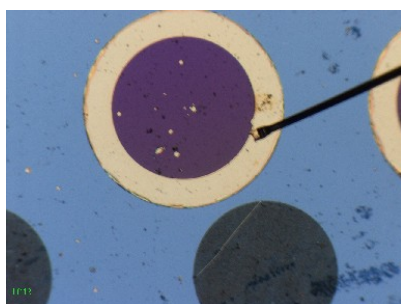
TF193.2



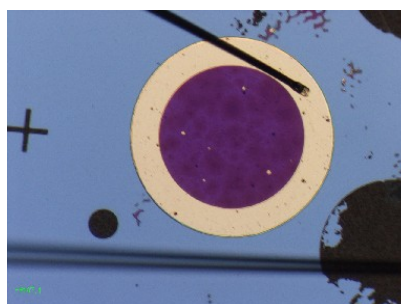
TF196.2



TF197.2



TF112



TF197.1

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Πρώτα τοποθετήσαμε τα δείγματα στον curve tracer και ελέγξαμε τις ωμικές επαφές για να είμαστε σίγουροι ότι δουλεύουν.

Στην συνέχεια σε κάθε δείγμα κοιτάξαμε όλες τις διόδους για να δούμε ποιες λειτουργούν κανονικά.

Αφού διαλέξαμε ποιες διόδους θα μετρήσουμε τοποθετήσαμε το δείγμα στον κλωβό faraday και πατήσαμε τις βελόνες στις διόδους που θέλαμε να μετρήσουμε.

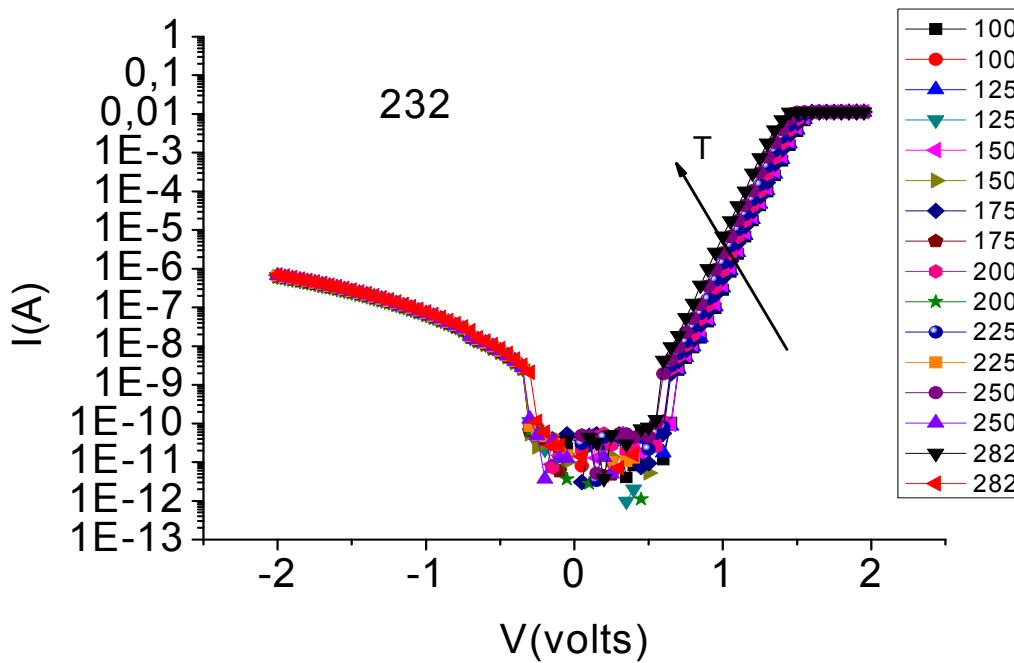
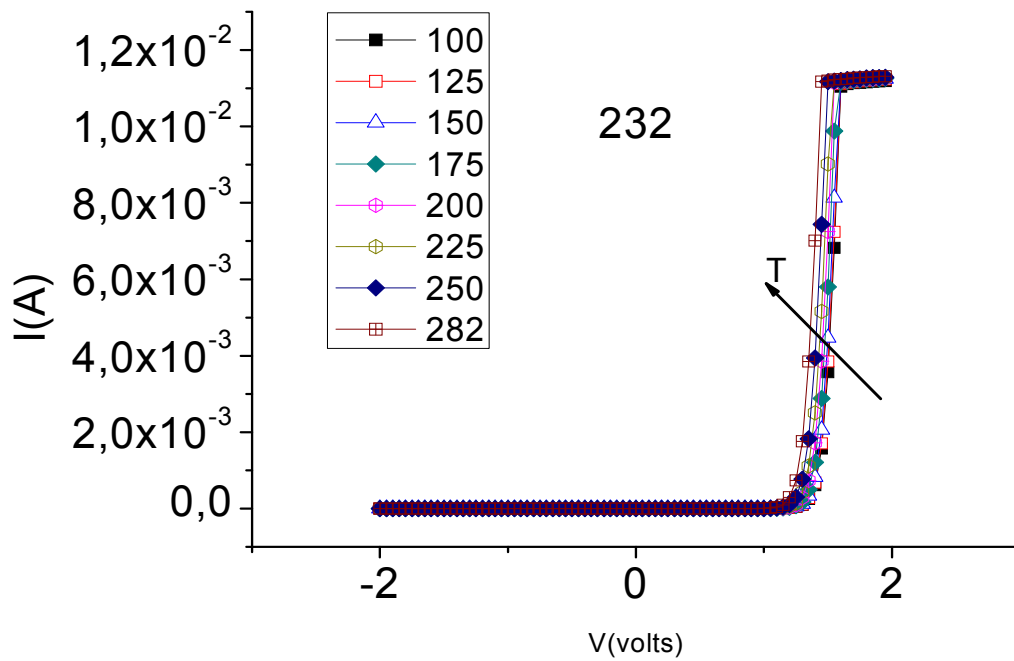
Στη συνέχεια αφού με μια αντλία κενού δημιουργήσαμε κενό μέσα στον κλωβό με μια δεύτερη αντλία αζώτου παγώναμε το δείγμα στις θερμοκρασίες που θέλαμε. Έτσι κάναμε μετρήσεις ρεύματος τάσης και θερμοκρασίας.

Οι γραφικές παραστάσεις για κάθε δείγμα και για κάθε θερμοκρασία φαίνονται στην συνέχεια.

Πάνω φαίνονται οι γραφικές παράστασης ρεύματος τάσης σε γραμμική κλίμακα και κάτω οι γραφικές παραστάσεις με το ρεύμα να είναι σε λογαριθμική κλίμακα.

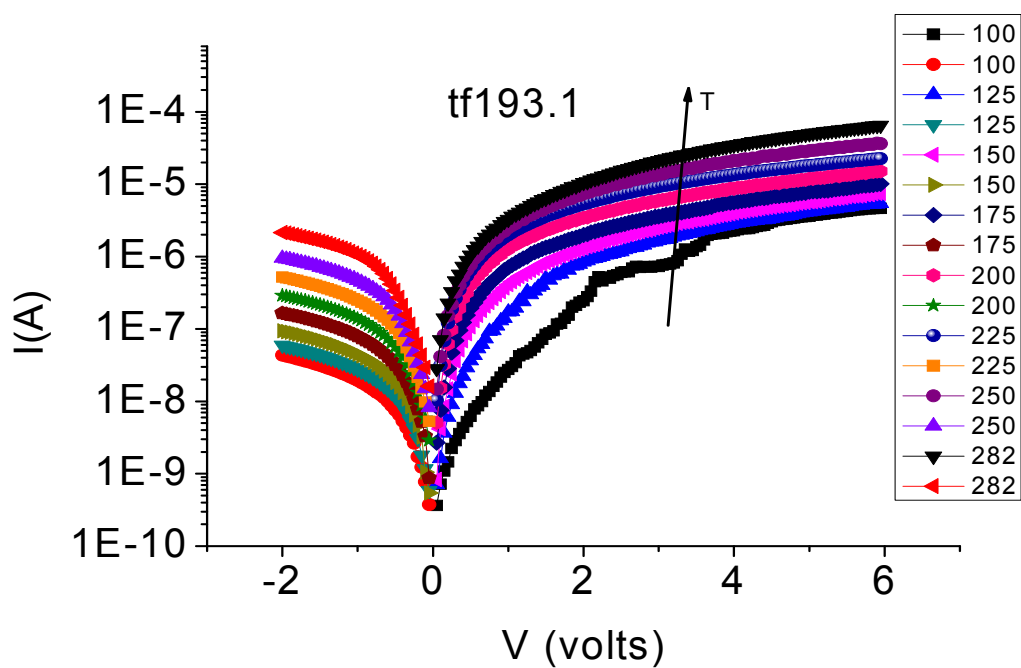
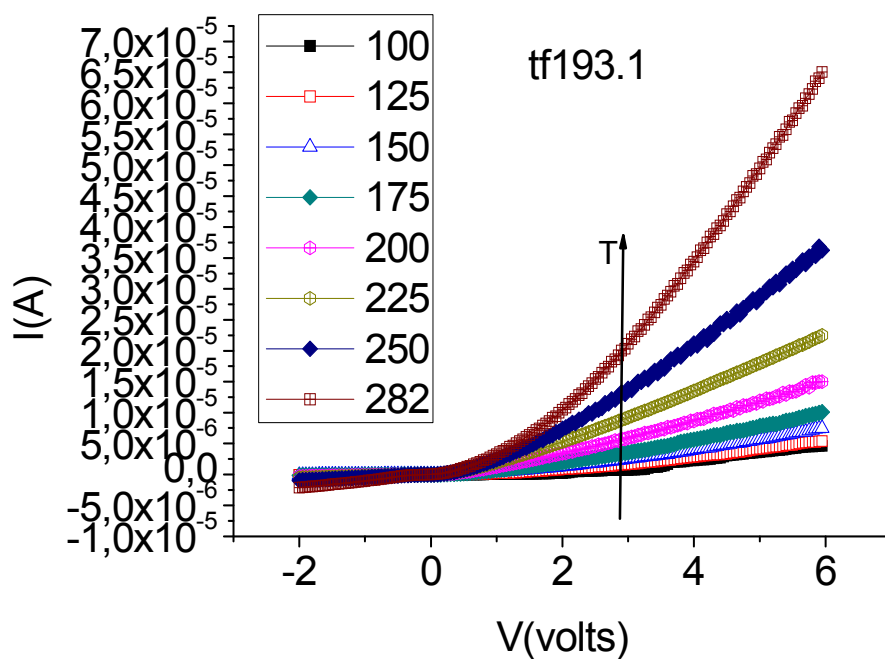
Επίσης θα ήθελα να επισημάνω ότι η τάση που φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα είναι η τάση V_p-V_n , όπου στα δείγματα tf193.1, tf193.2, tf196.1, tf196.2, tf197.1, tf197.2 το V_p αντιστοιχεί στην τάση του πυριτίου και το V_n στην τάση του $SrCu_2O_2$, στα δείγματα tf112, tf204.2 και tf205.2 το V_p αντιστοιχεί στην τάση του $SrCu_2O_2$ και το V_n στην τάση του πυριτίου ενώ στο δείγμα 232 το V_p αντιστοιχεί στην τάση της p πλευρά και το V_n στην τάση της n πλευράς.

Δείγμα AlGaAs 232

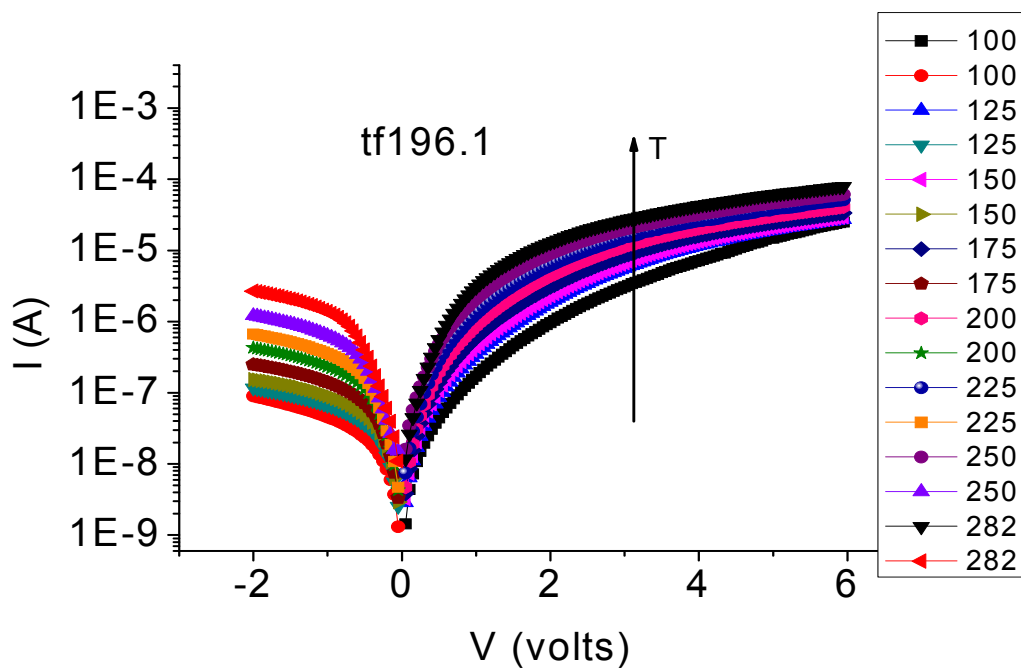
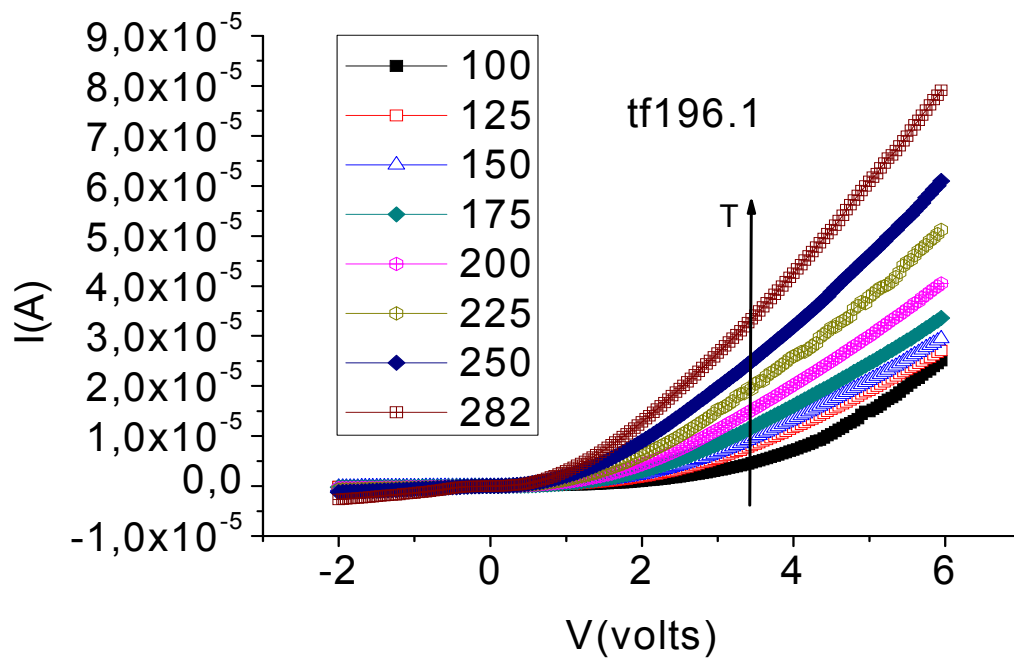


Δείγματα SCO

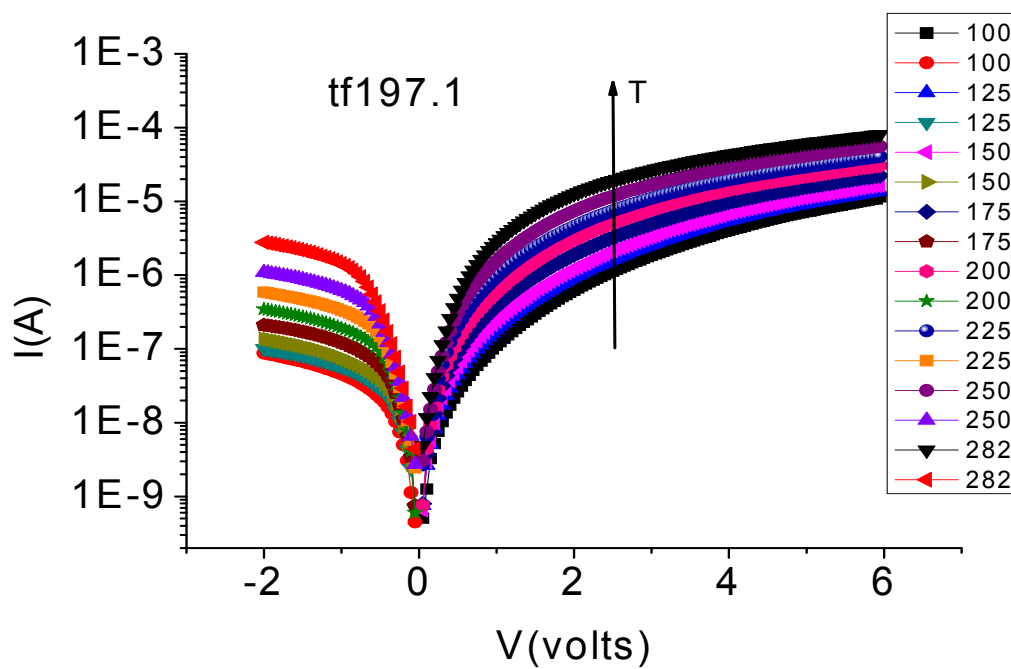
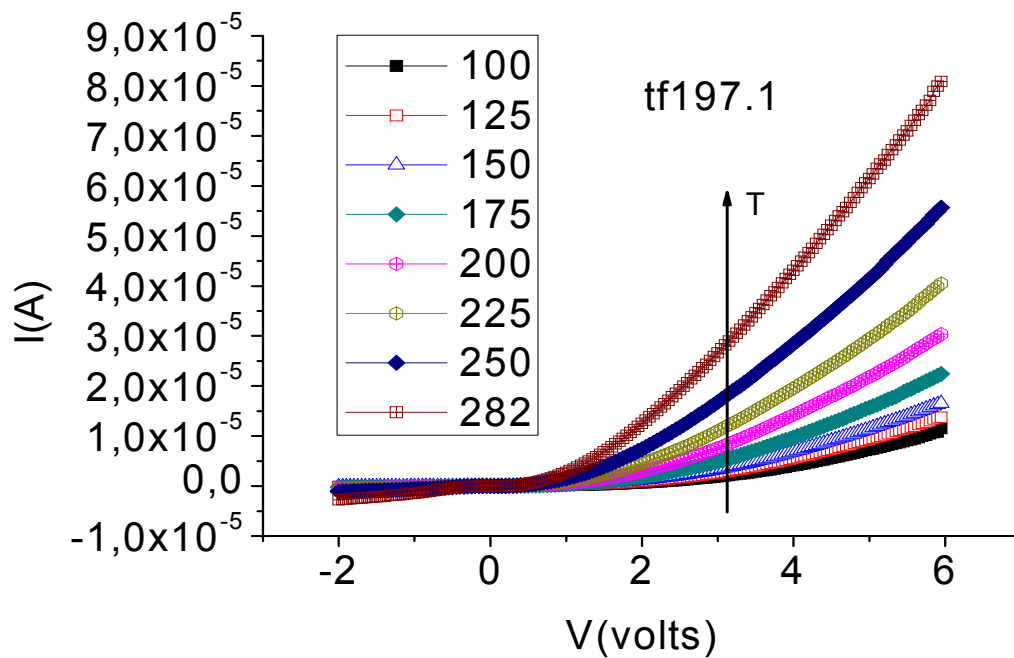
TF 193.1 (as-prepared)



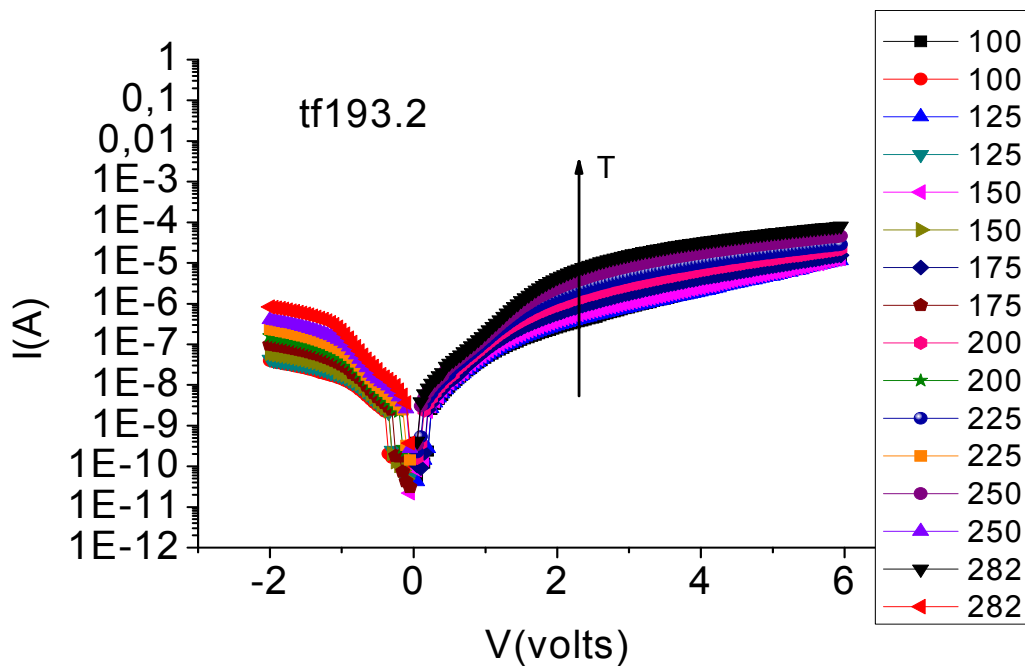
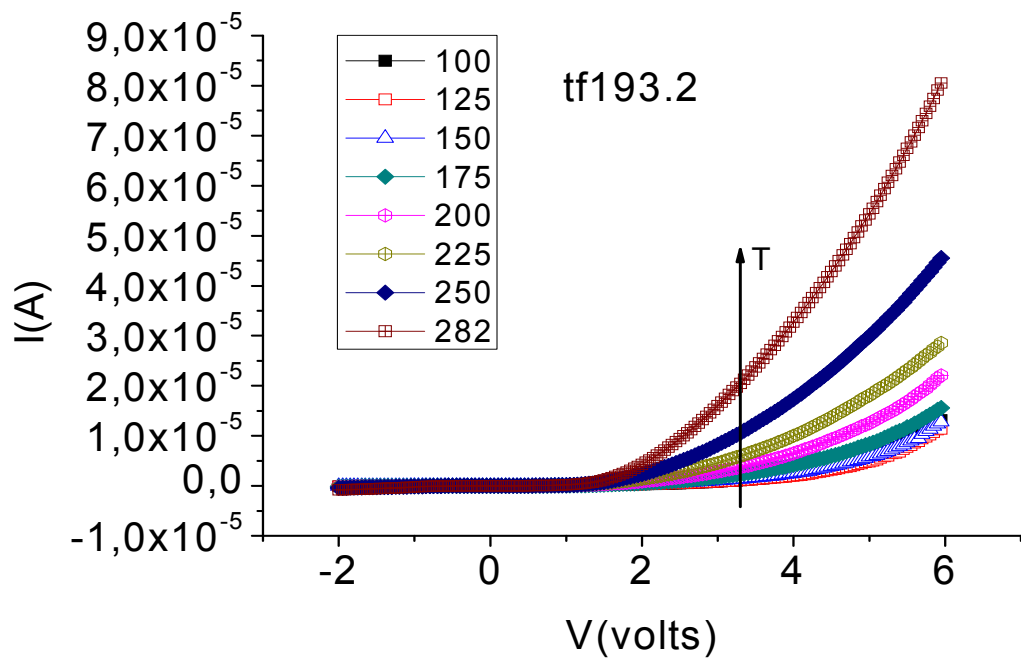
Δείγμα TF 196.1 (as-prepared)



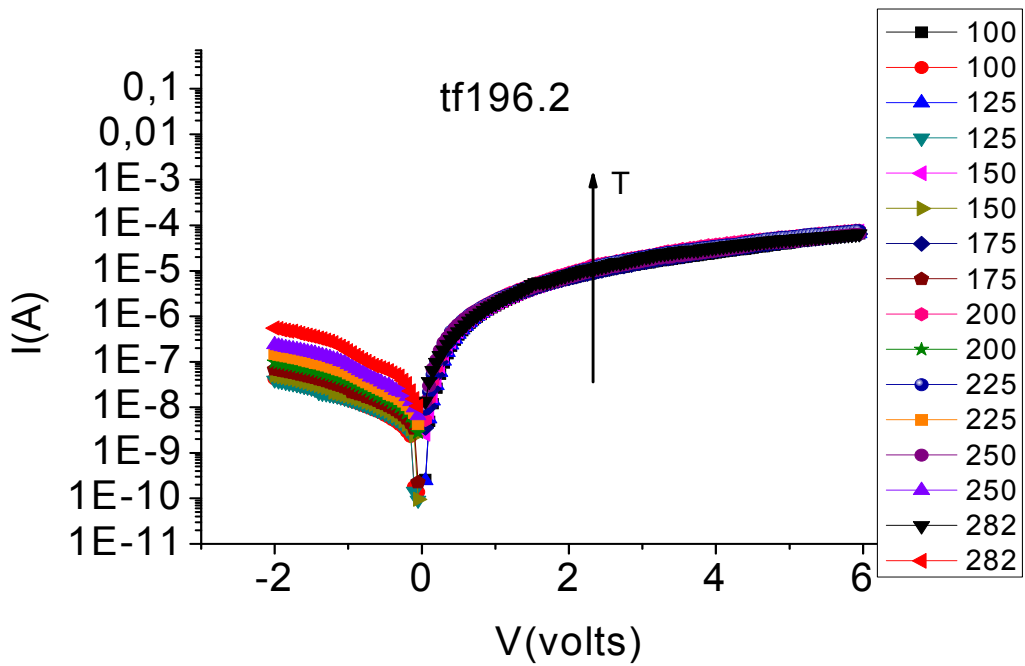
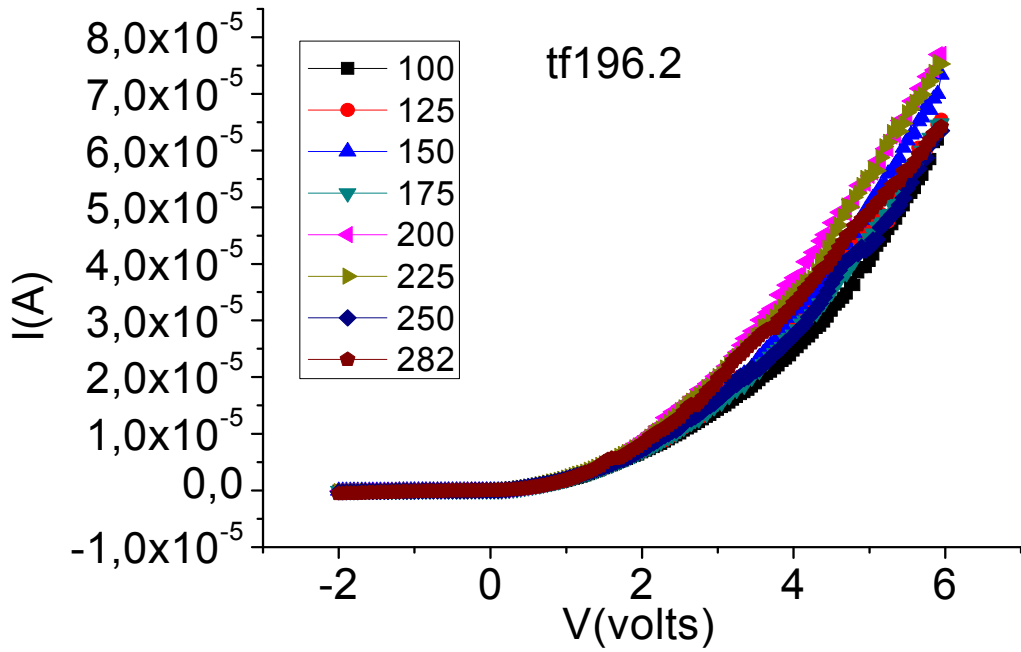
Δείγμα TF 197.1 (as-prepared)



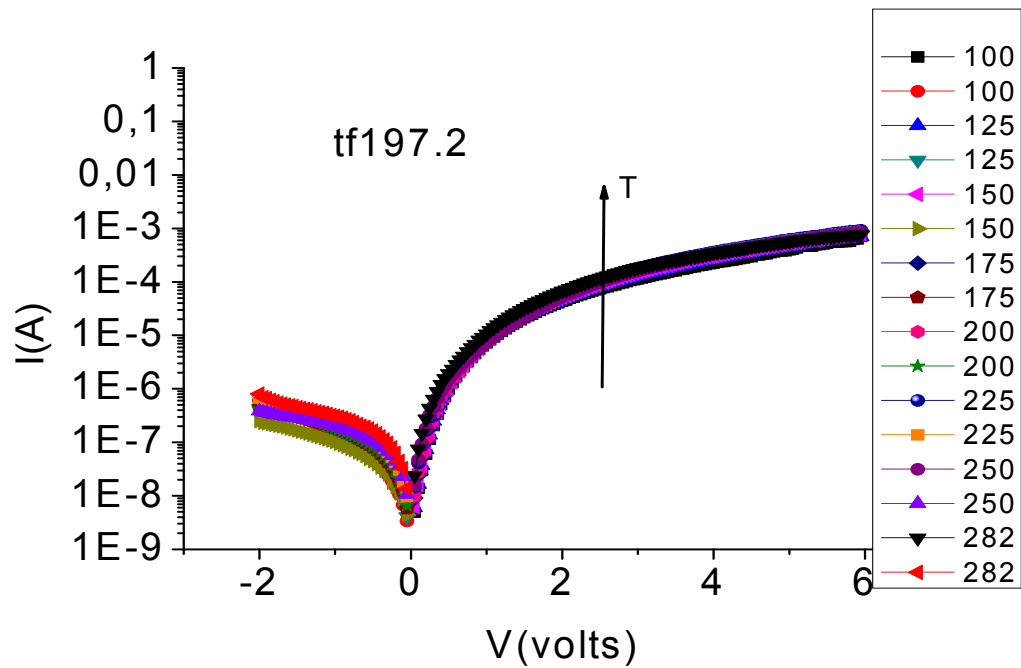
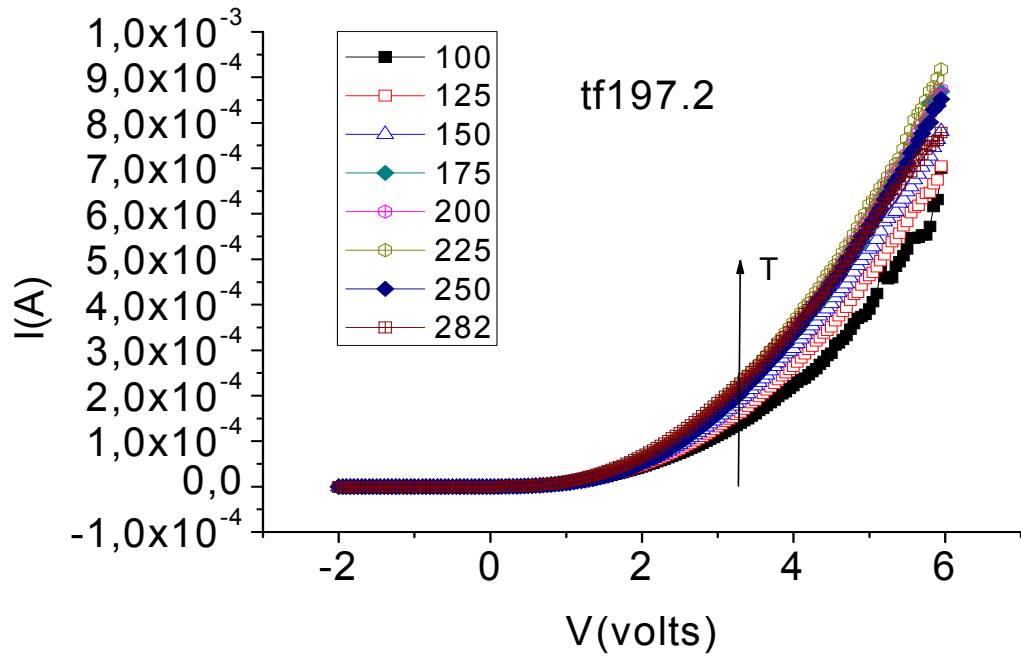
Δείγμα Tf193.2 (annealed)



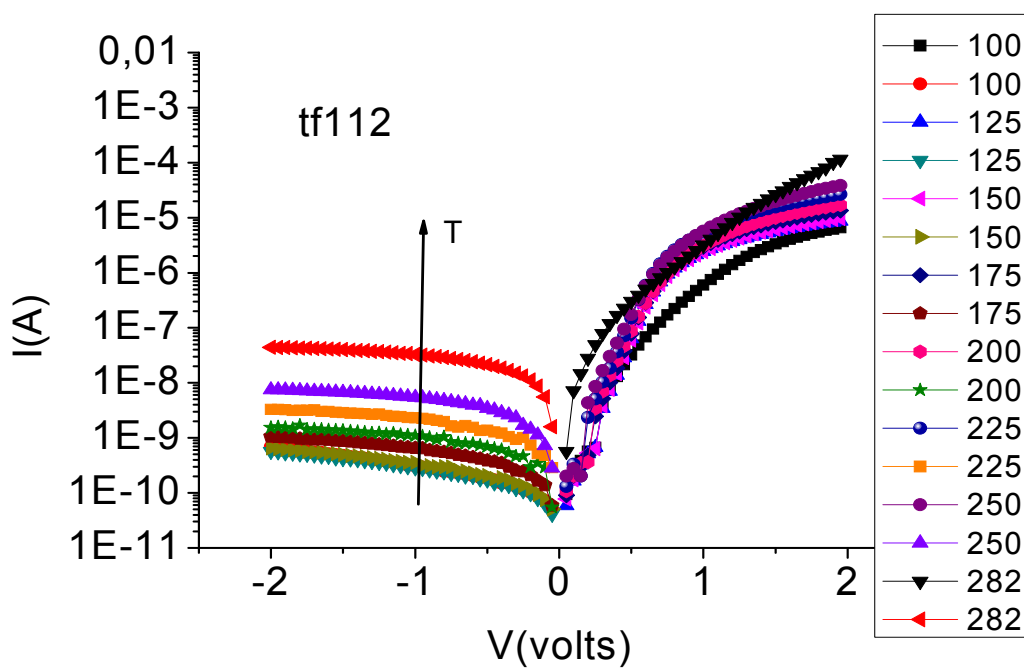
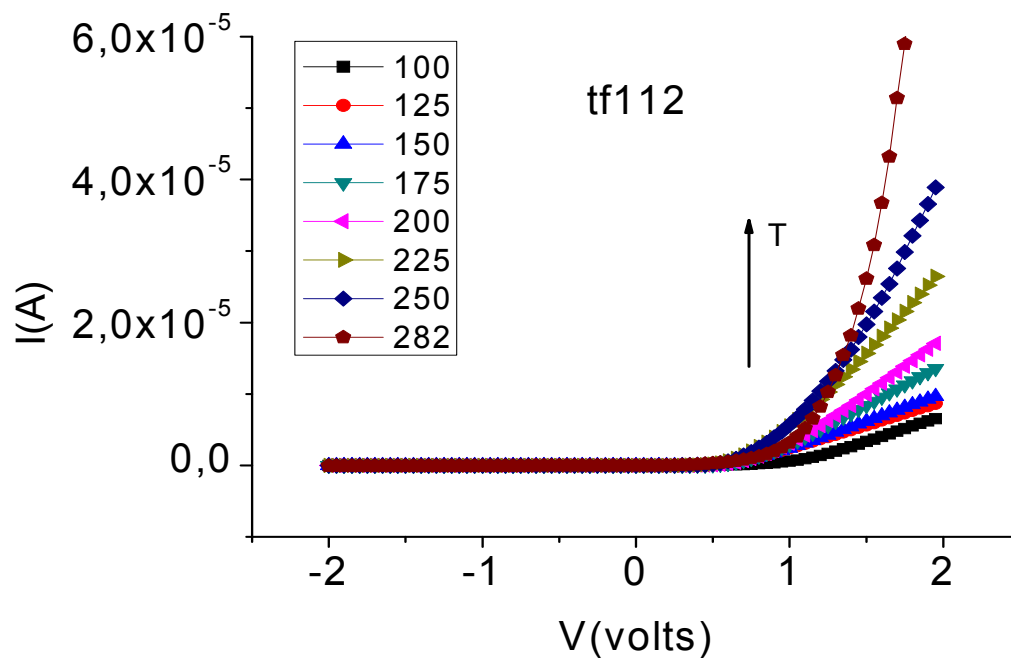
Δείγμα Tf196.2 (annealed)



Δείγμα Tf197.2 (annealed)



Δείγμα TF 112 (as-prepared)



Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να υπολογίσουμε την σειριακή αντίσταση από την κλίση της γραμμικής γραφικής παράστασης ρεύματος τάσης για μεγάλες τιμές τάσεων, το συντελεστή ιδανικότητας n σύμφωνα με τον τύπο:

$$I_{o\lambda} = I_o \left(e^{qV_A/nKT} - 1 \right)$$

από την κλίση του διαγράμματος $\ln I-V$ για μικρές τάσεις (περίπου μέχρι 0,5V), καθώς και το ρεύμα I_o που πάλι από το ίδιο διάγραμμα αν εφαρμόσουμε ευθεία στα σημεία για μικρές θετικές τάσεις τότε είναι ίσο με την τομή με τον άξονα ρεύματος.

Έτσι φτιάχνουμε τους παρακάτω πίνακες:

Tf193.1								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	768,9	853,7	799,3	661,9	414,3	266,03	167,9	72,4
I_o (A)	2,7E-10	5,1E-10	5,8E-10	2,8E-9	5,6E-9	1,3E-8	1,7E-8	3,25E-8
n	13,86	8,37	5,1	6,2	5,35	5,1	4,7	4,8

Tf196.1								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	114,1	131,8	129,5	118,8	102,2	89,4	74,4	57,4
I_o (A)	2,25E-9	3,05E-9	3,05E-9	3,87E-9	4,57E-9	7,28E-9	1,69E-8	1,13E-8
n	16,1	11,7	9,4	7,7	6,5	6,03	6,1	4,7

Tf197.1								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	325,5	268,3	224,9	172,7	134,4	104,1	78,5	55,3
I_o (A)	3,3E-10	1,01E-9	1,07E-9	1,25E-9	1,39E-9	2,03E-9	2,24E-9	3,66E-9
n	8,5	9,3	7,4	5,9	4,9	4,5	3,9	3,6

Tf193.2								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	89,9	119,4	98,9	120,9	94,3	91,7	62,9	36,8
I_o (A)	7,2E-12	9,2E-12	2,5E-11	2,1E-11	4,9E-11	1,8E-10	2,3E-10	2,1E-10
n	6,1	5,01	4,45	2,8	2,68	3,47	2,55	2,3

Tf196.2								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	47,4	39,1	44,9	47,97	44,14	46,8	42,65	67,1
Io (A)	2,7E-10	2,8E-10	1,74E-9	2,5E-9	3,99E-9	6,83E-9	1,29E-8	1,46E-8
n	5,6	4,4	5,56	4,93	4,53	4,47	4,9	2,9

Tf197.2								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	3,58	4,12	3,9	3,4	3,5	3,3	3,5	4,2
Io (A)	4,68E-9	4,4E-9	5,25E-9	9,4E-9	1,1E-8	1,6E-8	1,6E-8	3,1E-8
n	10,4	7,4	6,8	6,5	5,8	5,3	4,6	4,6

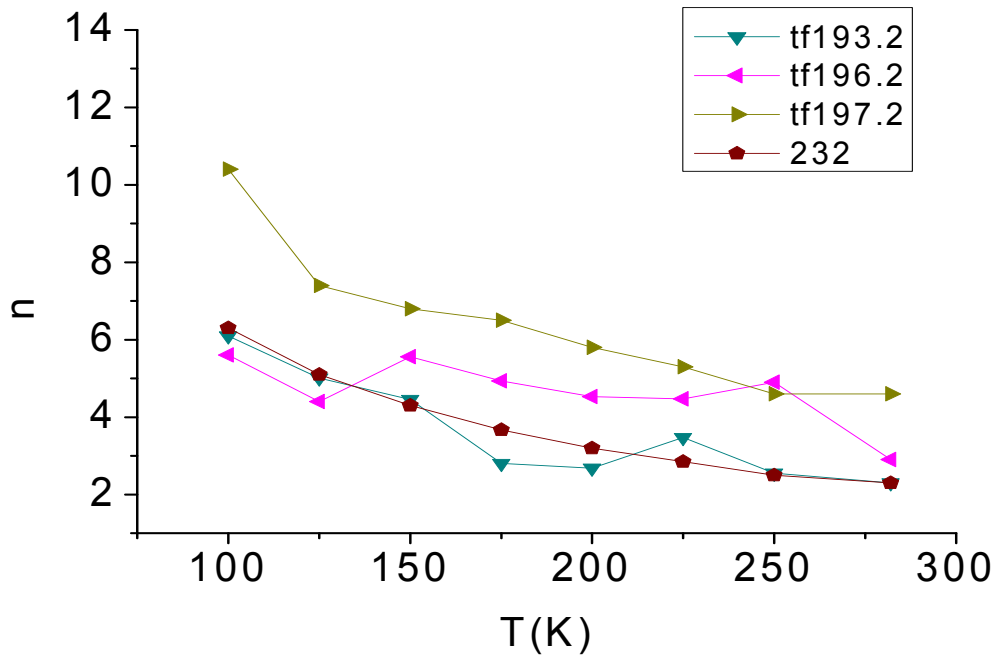
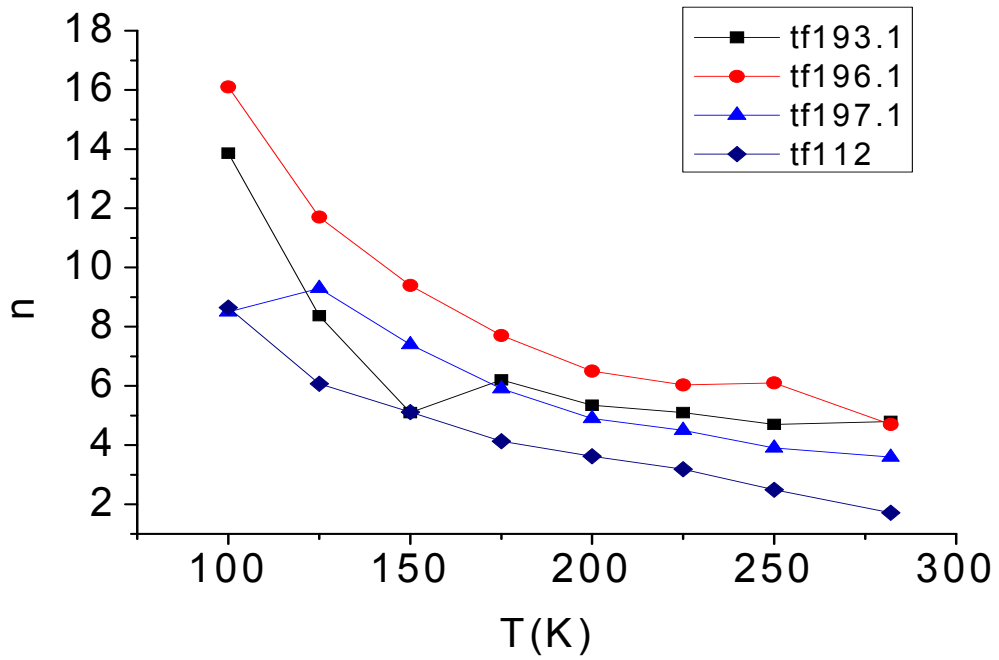
Tf112								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	140,3	154,6	129,6	89,1	64,4	42,3	24,02	3,12
Io (A)	4,1E-11	2,3E-11	2,3E-11	2,6E-11	3,1E-11	4,9E-11	3,8E-11	3,1E-11
n	8,65	6,07	5,12	4,13	3,63	3,19	2,49	1,72

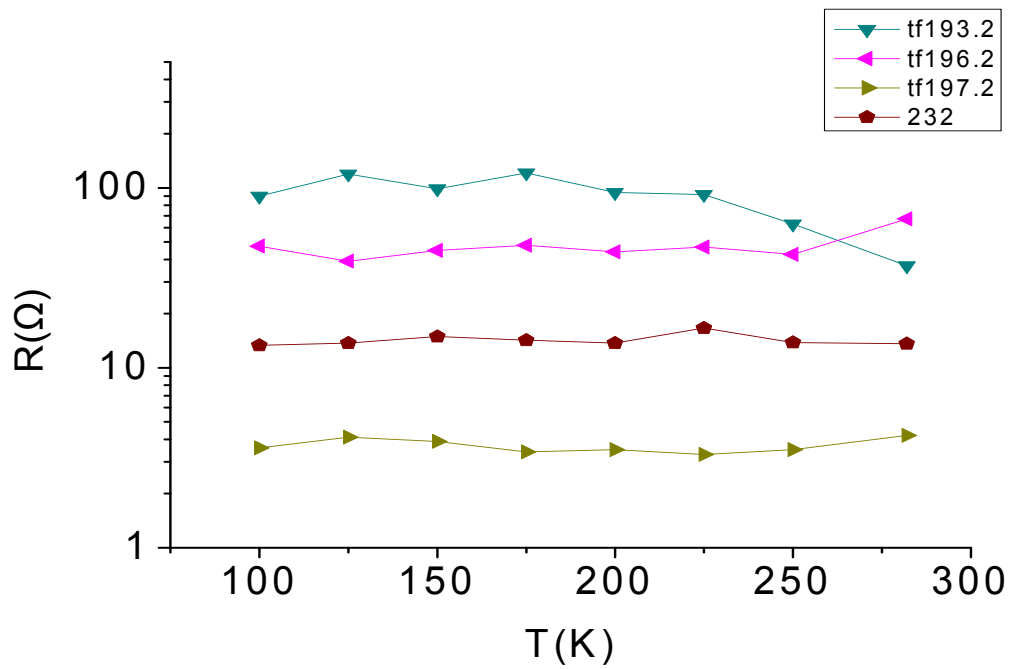
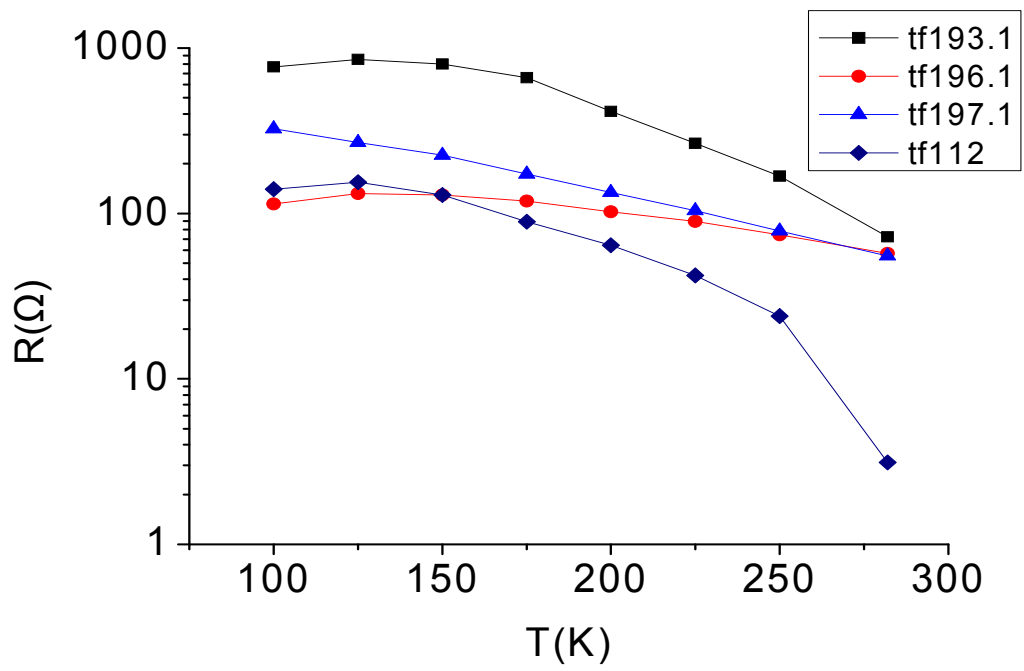
232								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
R (Ω)	13,3	13,7	14,9	14,2	13,7	16,6	13,8	13,6
Io (A)	2,1E-15	2,5E-15	3,4E-15	4,9E-15	6,9E-15	1,1E-14	1,9E-14	7,7E-14
n	6,3	5,1	4,3	3,67	3,2	2,85	2,5	2,3

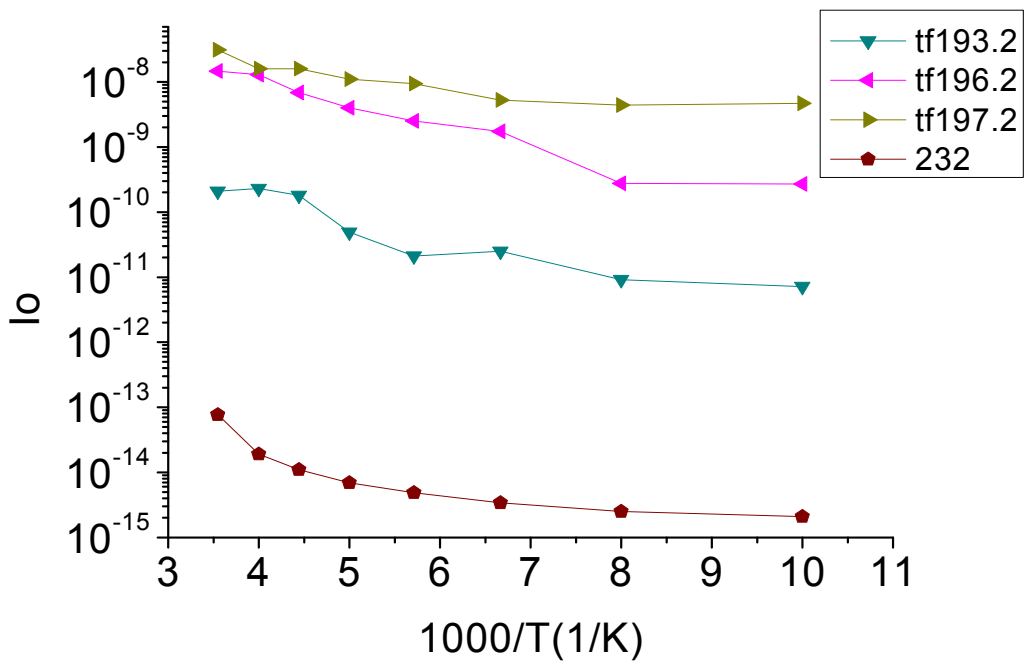
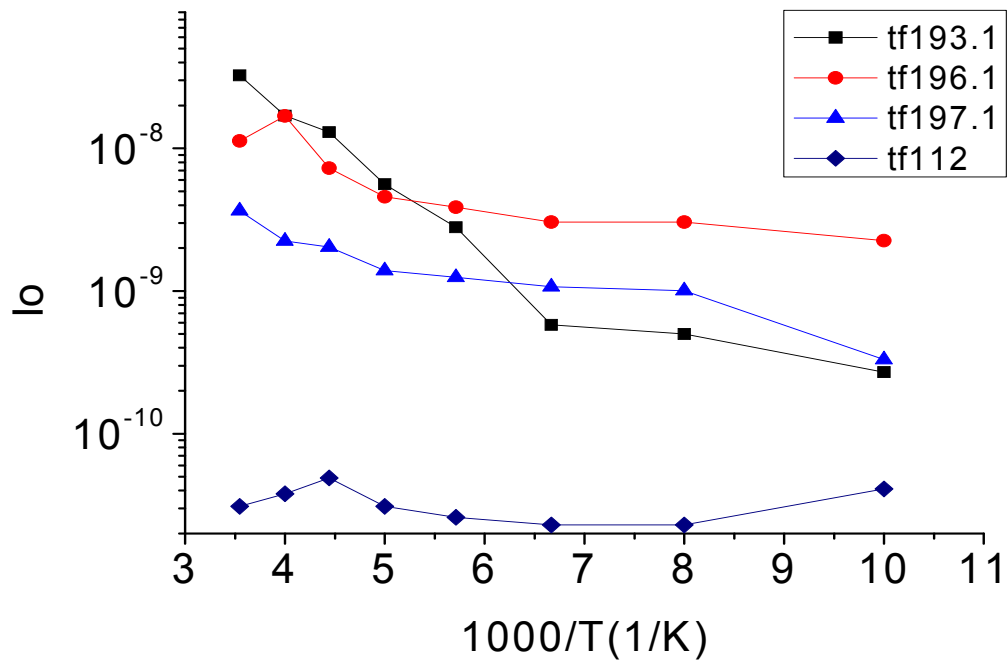
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται γραφικά τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς και το ρεύμα διαρροής για τάση -2Volts το οποίο είναι το ρεύμα διαρρέει την δίοδο όταν βρεθεί σε ανάστροφη τάση -2Volts.

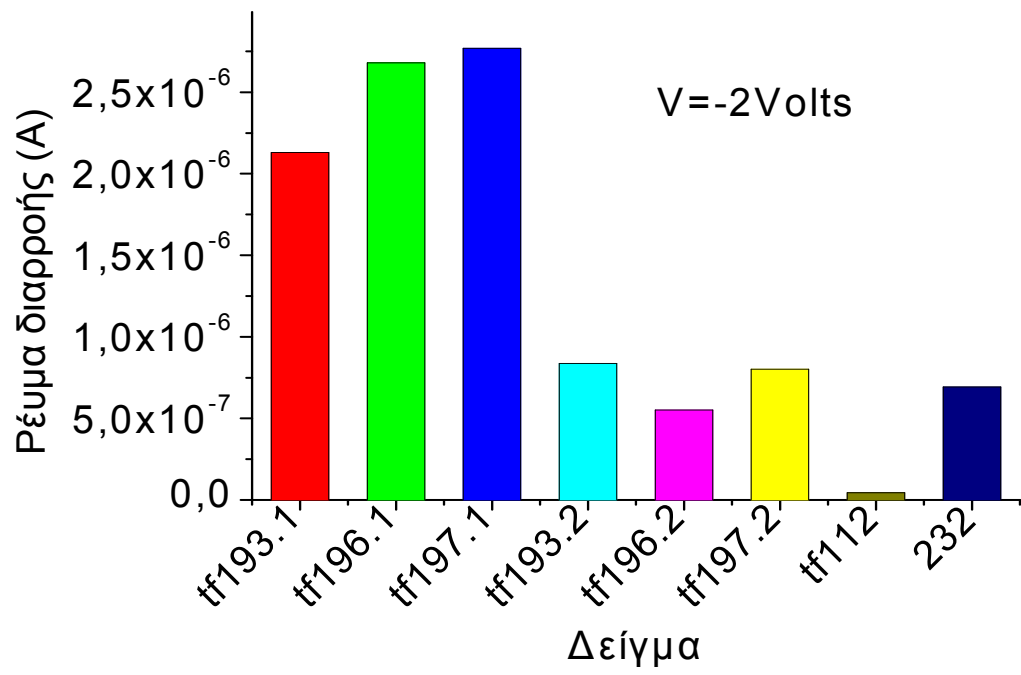
V=-2Volts								
Δείγμα	Tf193.1	Tf196.1	Tf197.1	Tf193.2	Tf196.2	Tf197.2	Tf112	232
Ρεύμα διαρροής (A)	2,13E-6	2,68E-6	2,77E-6	8,37E-7	5,52E-7	8,02E-7	4,42E-8	6,93E-7

Συγκριτικά διαγράμματα ως προς την συγκέντρωση Βα.

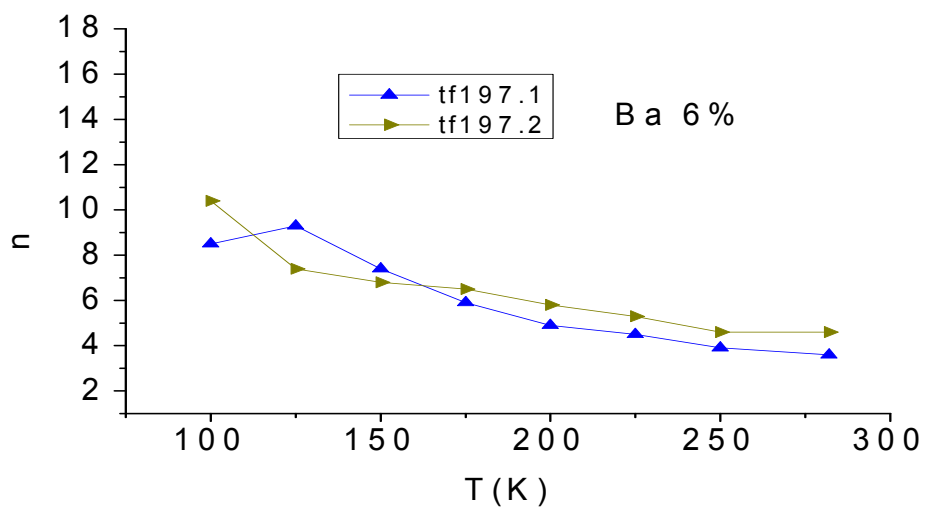
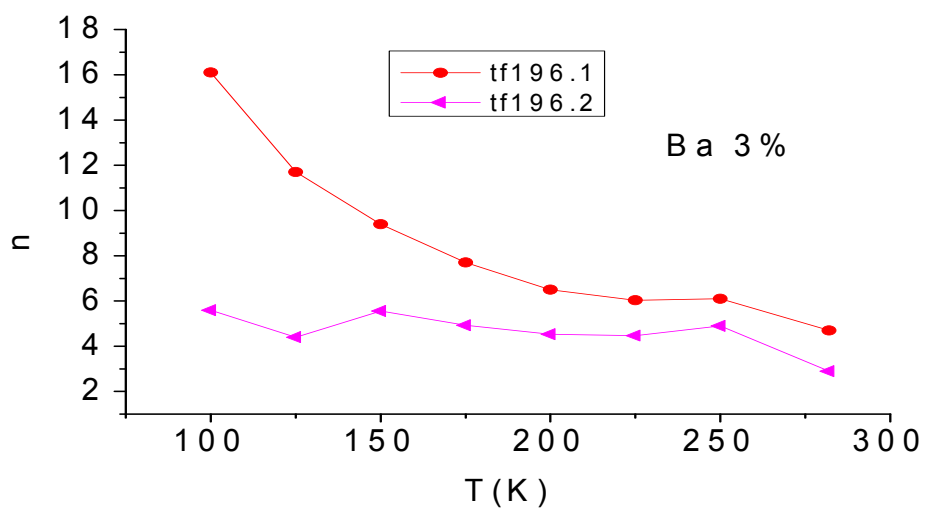
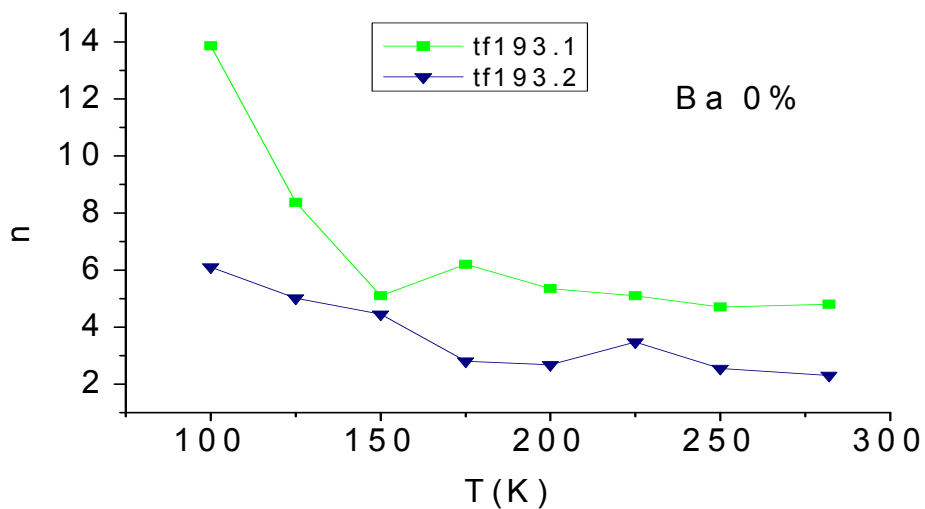


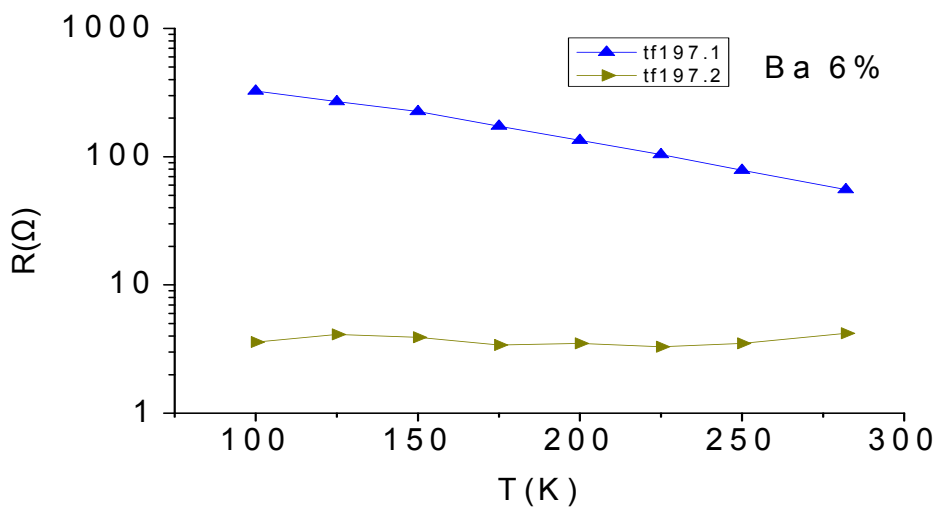
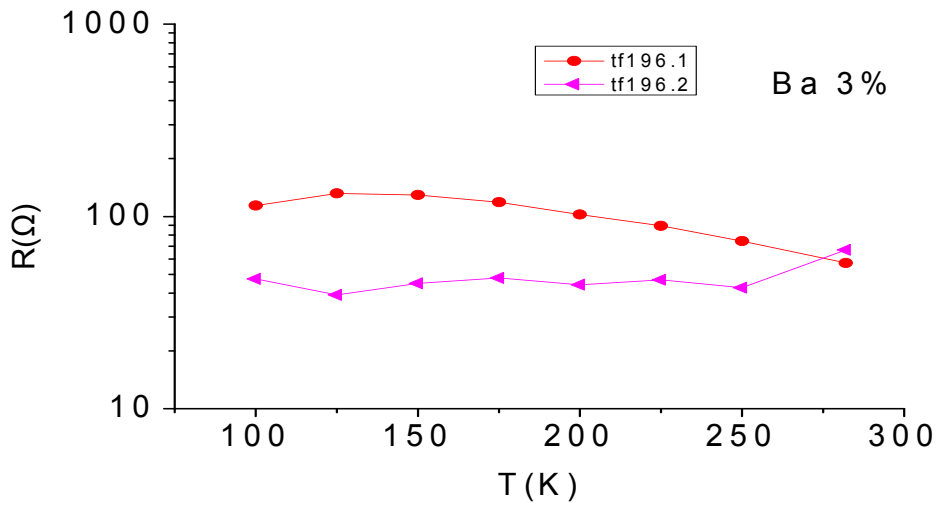
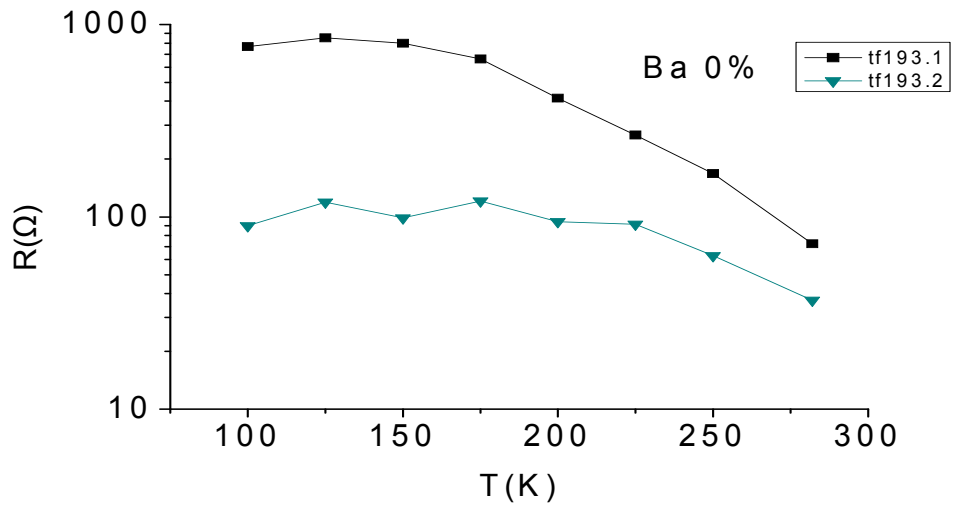


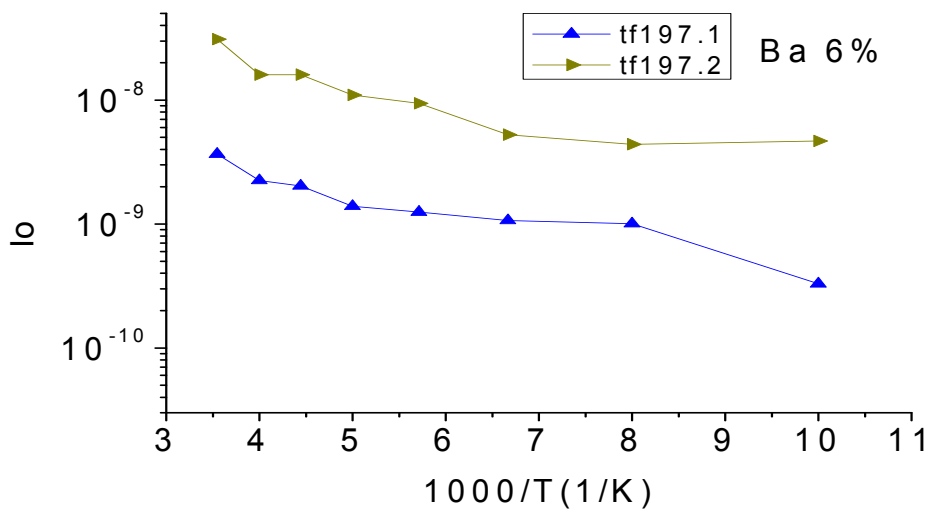
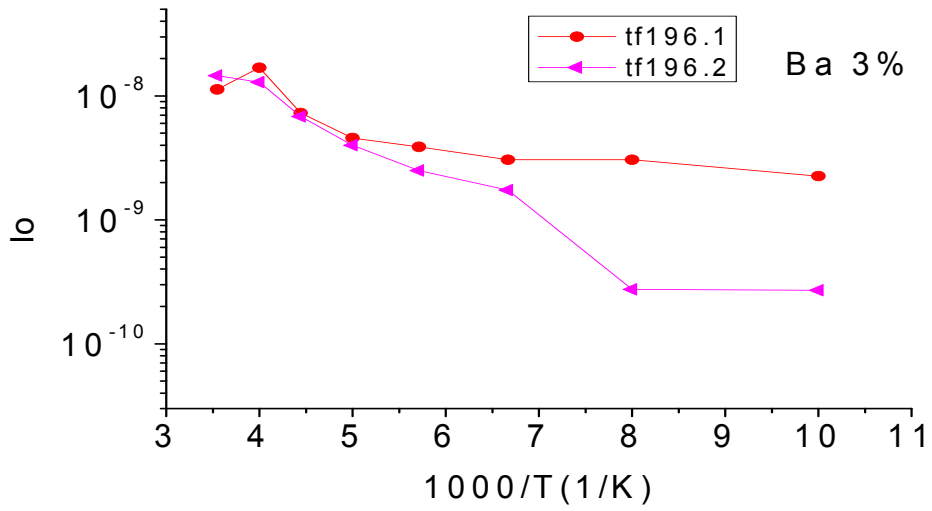
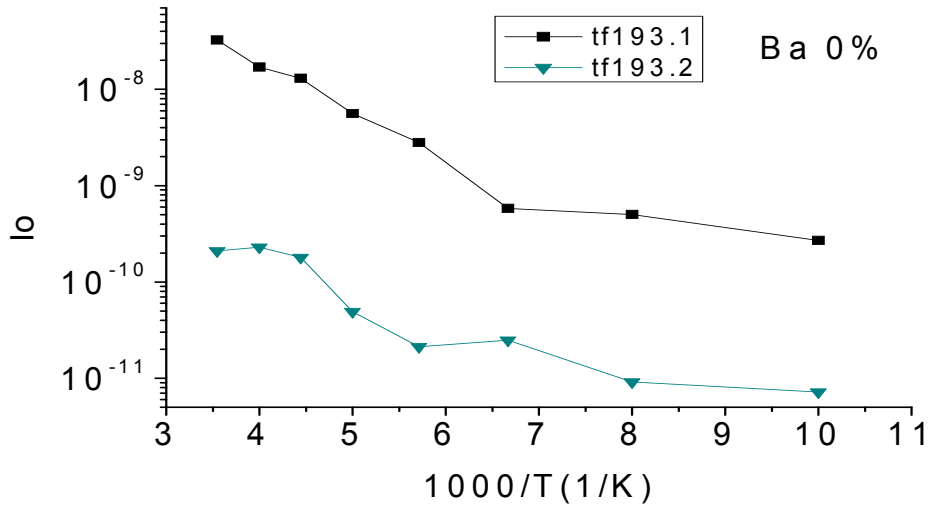




Συγκριτικά διαγράμματα δειγμάτων με RTA και χωρίς.







5.5 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ιδανικότητας n , πέφτει γενικά με την θερμοκρασία όπως περιμέναμε. Επίσης στα δείγματα με RTA βλέπουμε ότι με την αύξηση της νόθευσης Ba αυξάνεται και ο συντελεστής ιδανικότητας. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι τα άτομα Ba ίσως να μην κάθονται καλά στο πλέγμα του SCO και να δημιουργούν ενεργειακές καταστάσεις στην ενδοεπαφή SCO-Si.

Τέλος, παρατηρούμε για τον συντελεστή ιδανικότητας ότι μειώνεται η τιμή του στα δείγματα που είχαν υποστεί RTA σε σχέση με αυτά που δεν είχαν. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι τα άτομα με την διαδικασία του RTA έχουν δεθεί καλύτερα μεταξύ τους (βελτίωση της ποιότητας του SCO) αλλά και μείωση των ενεργειακών καταστάσεων στην ενδοεπαφή SCO-Si.

Όσον αφορά την σειριακή αντίσταση που παρουσιάζουν τα δείγματα, παρατηρούμε ότι με την αύξηση του Ba πέφτει η τιμή της αντίστασης. Αυτό είναι λογικό γιατί το Ba μας προσφέρει περισσότερους φορείς αγωγιμότητας.

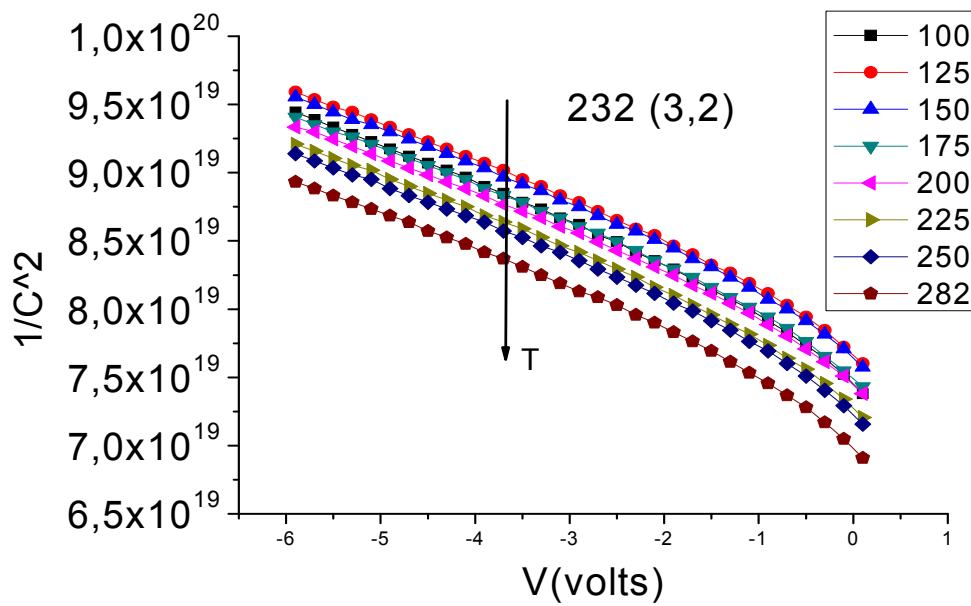
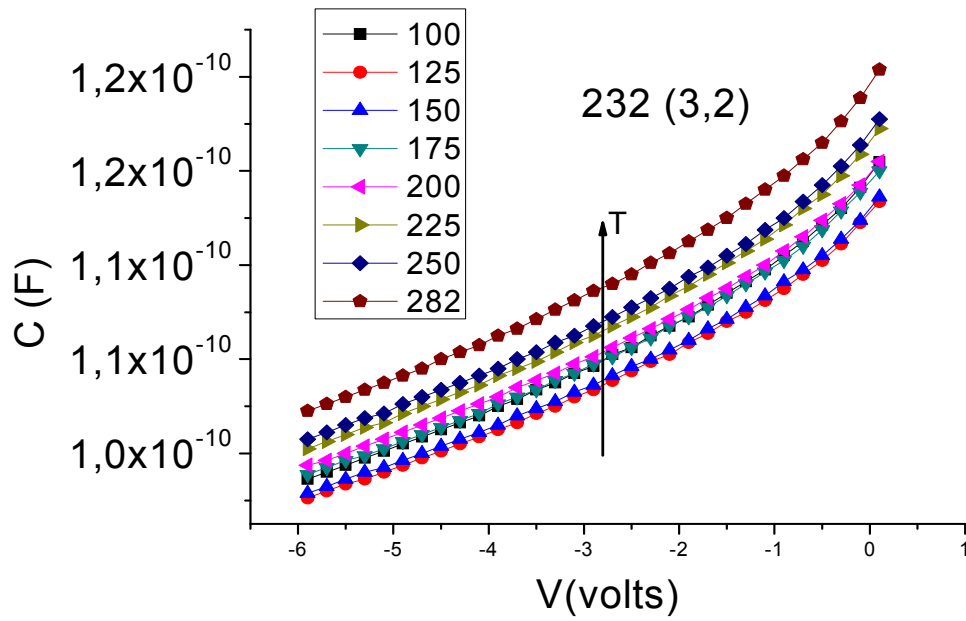
Τέλος τα δείγματα που είχαν υποστεί RTA δείχνουν μικρότερη τιμή αντίστασης από αυτά χωρίς RTA και αυτό μπορεί να οφείλεται όπως και πριν στο ότι έχουν πάρει πιο 'σωστές' θέσεις τα άτομα έτσι ώστε να συναντούν λιγότερα εμπόδια οι φορείς αγωγιμότητας.

Τέλος όσον αφορά το I_0 , παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συγκέντρωση Ba αυξάνεται και αυτό, ενώ για την ίδια συγκέντρωση Ba τα δείγματα με RTA παρουσιάζουν μικρότερη τιμή I_0 (μείωση των ενεργειακών καταστάσεων στην ενδοεπαφή SCO-Si).

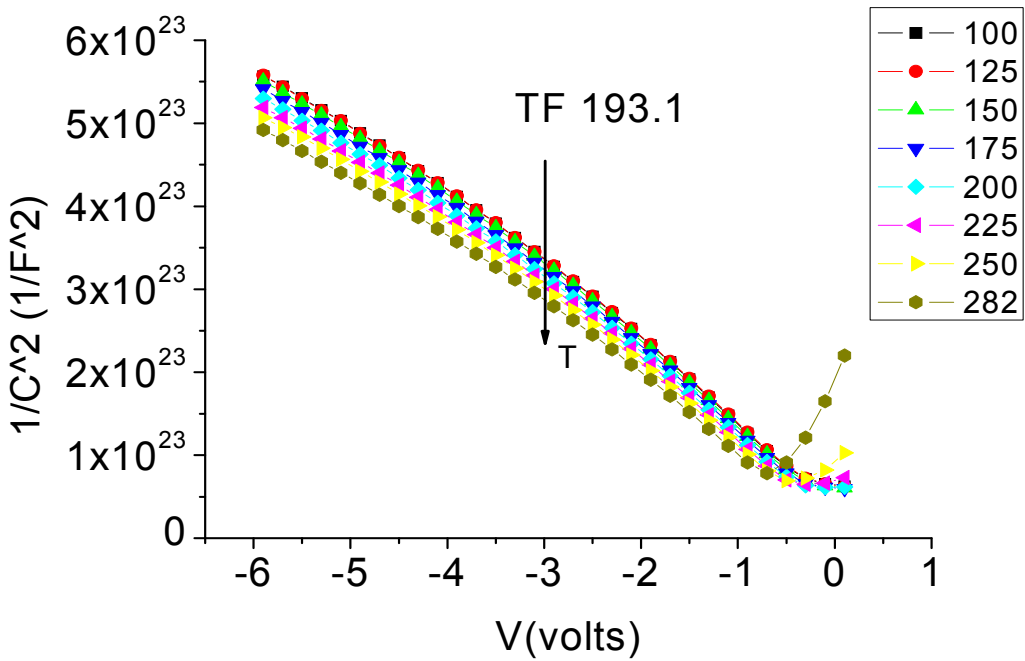
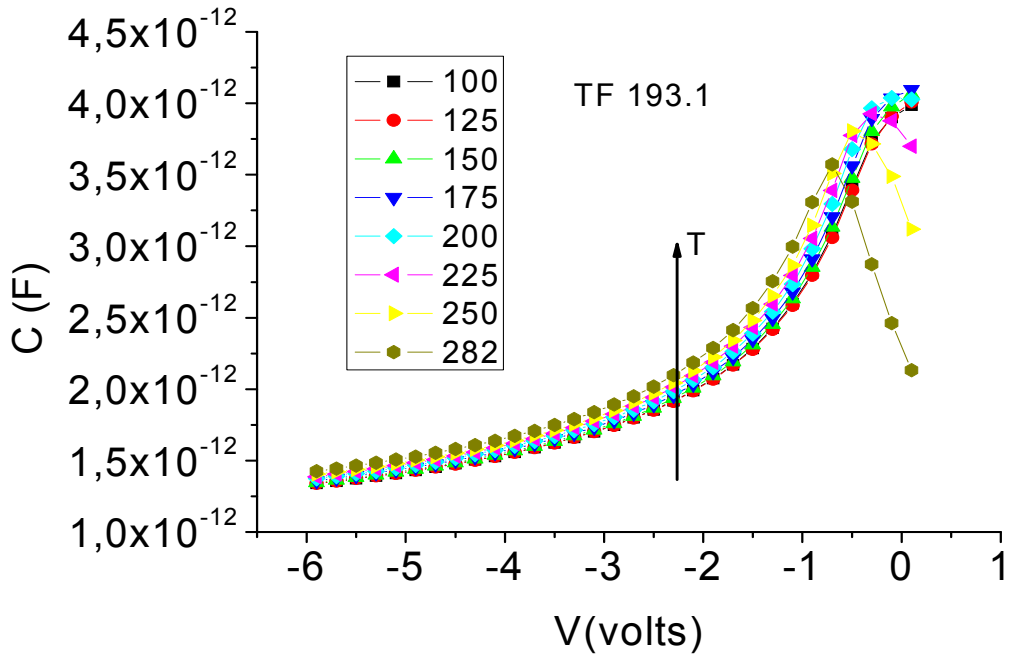
5.6 Μετρήσεις χωρητικότητας τάσης C-V

Στις ίδιες διόδους που κάναμε μετρήσεις ρεύματος τάσης, κάναμε και μετρήσεις χωρητικότητας τάσης. Τοποθετήσαμε ξανά τα δείγματα στον κλωβό Faraday και παίρναμε μετρήσεις με την βοήθεια του LCR meter και σε διάφορες θερμοκρασίες όπως και στις μετρήσεις I-V. Έτσι προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα. Πάνω φαίνονται τα διαγράμματα C-V και κάτω τα $1/C^2-V$.

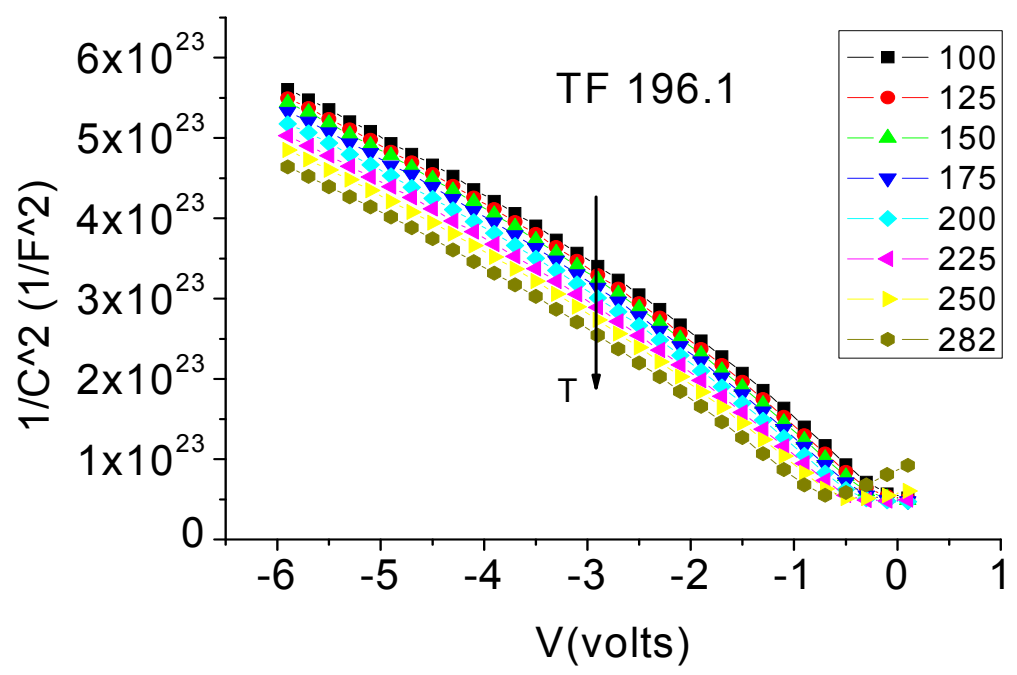
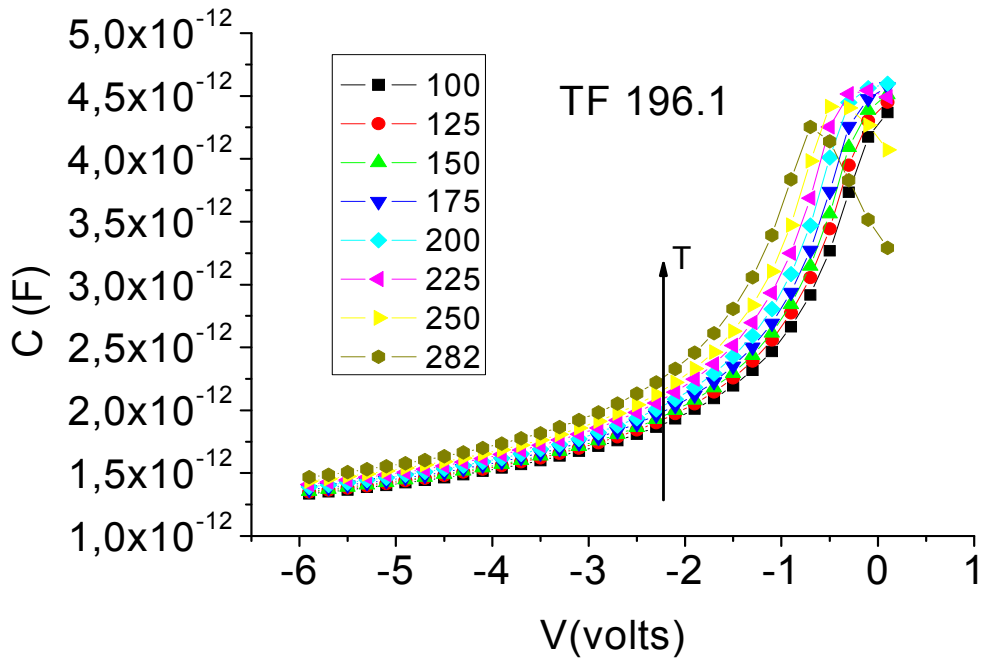
Δείγμα pin 232



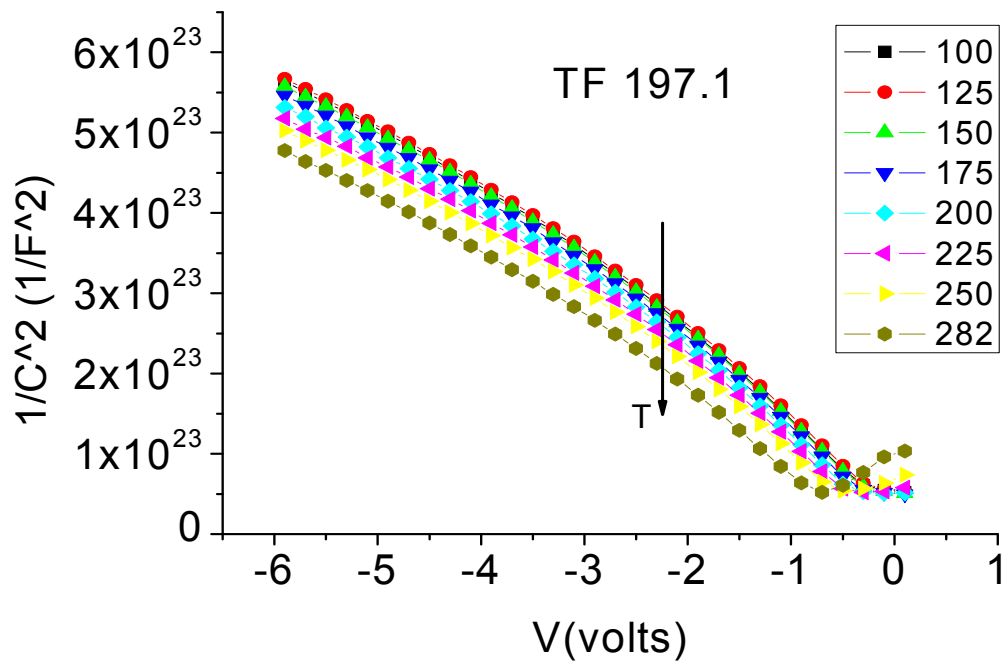
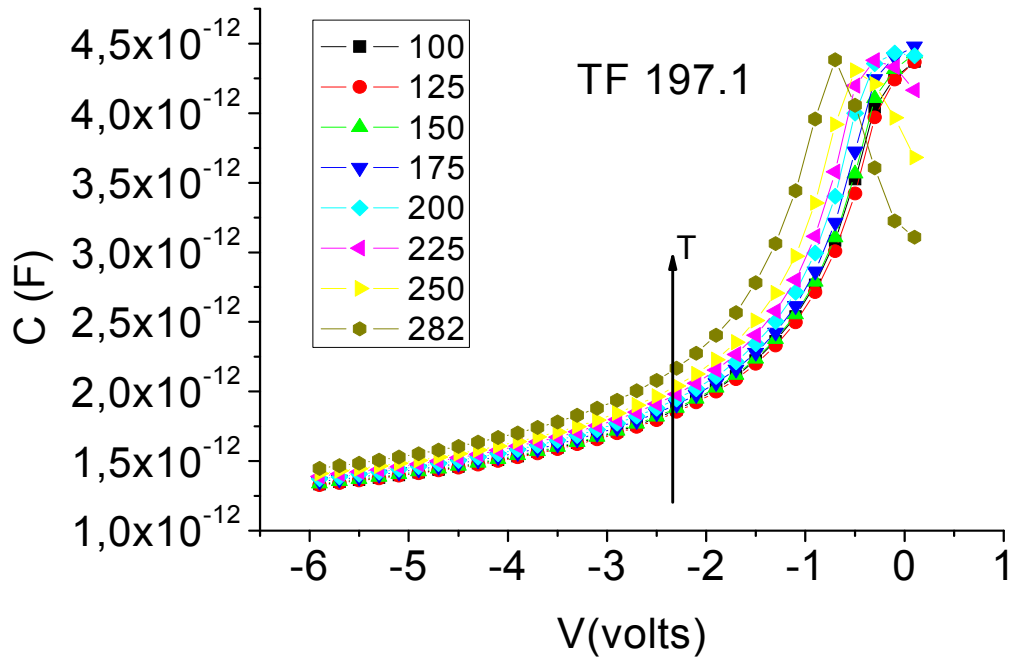
Δείγμα Tf193.1



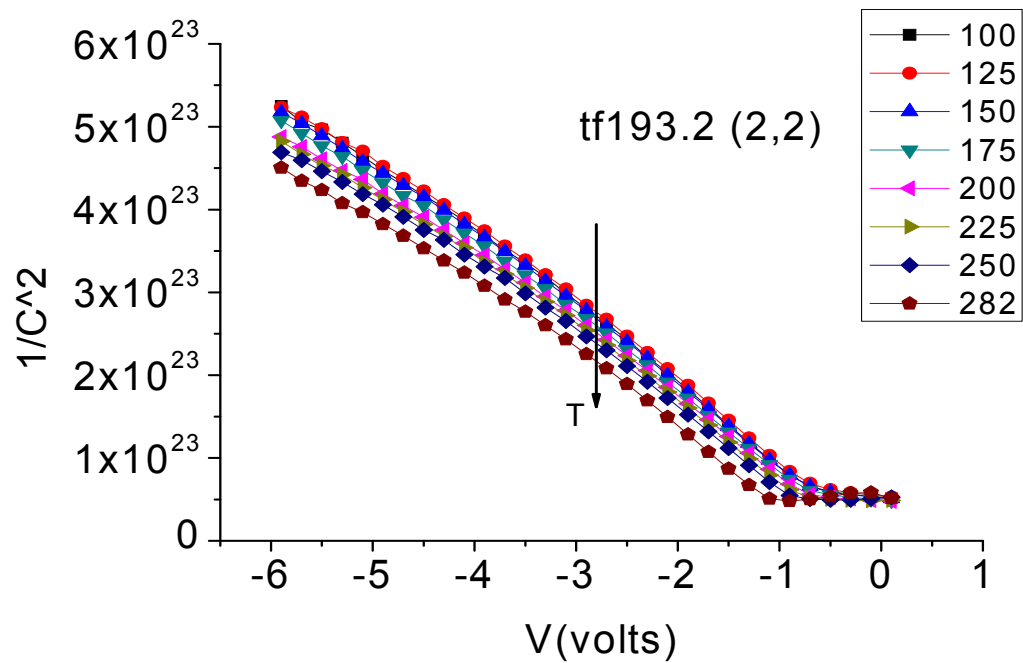
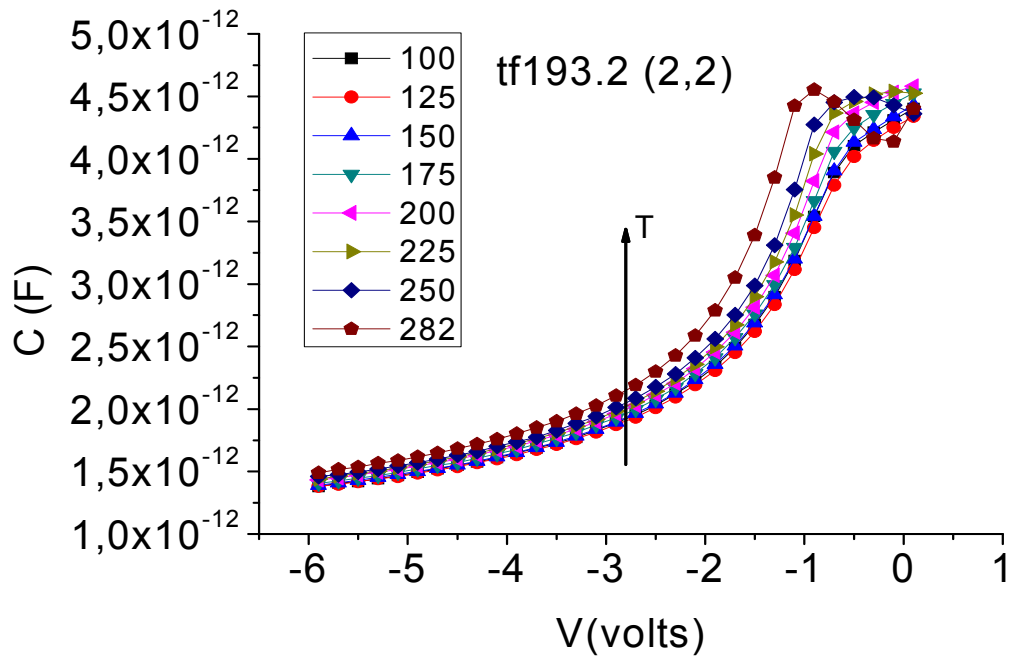
Δείγμα Tf196.1



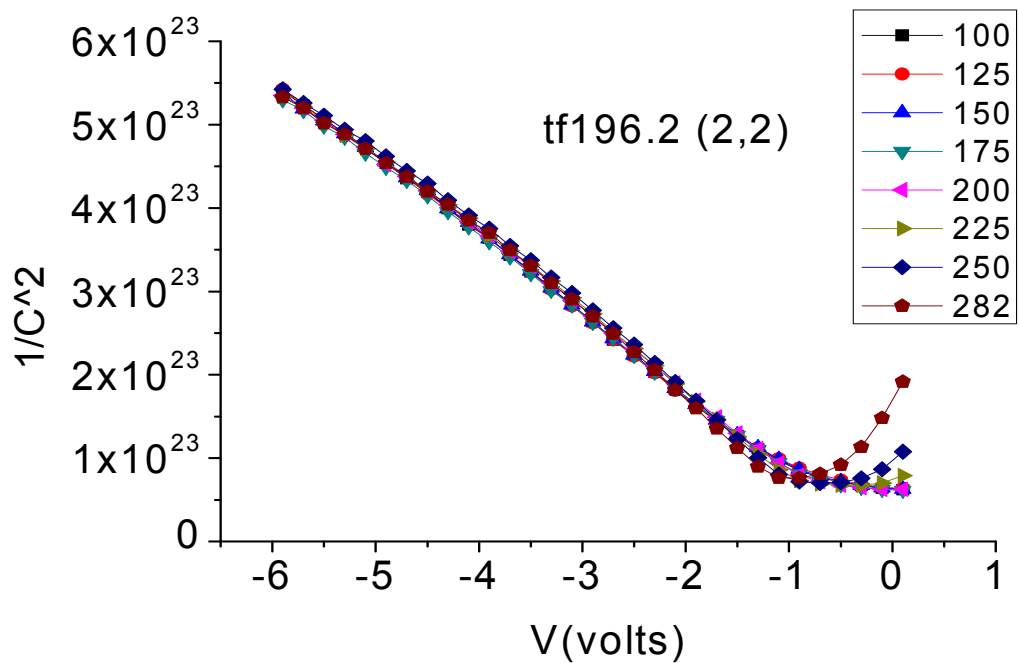
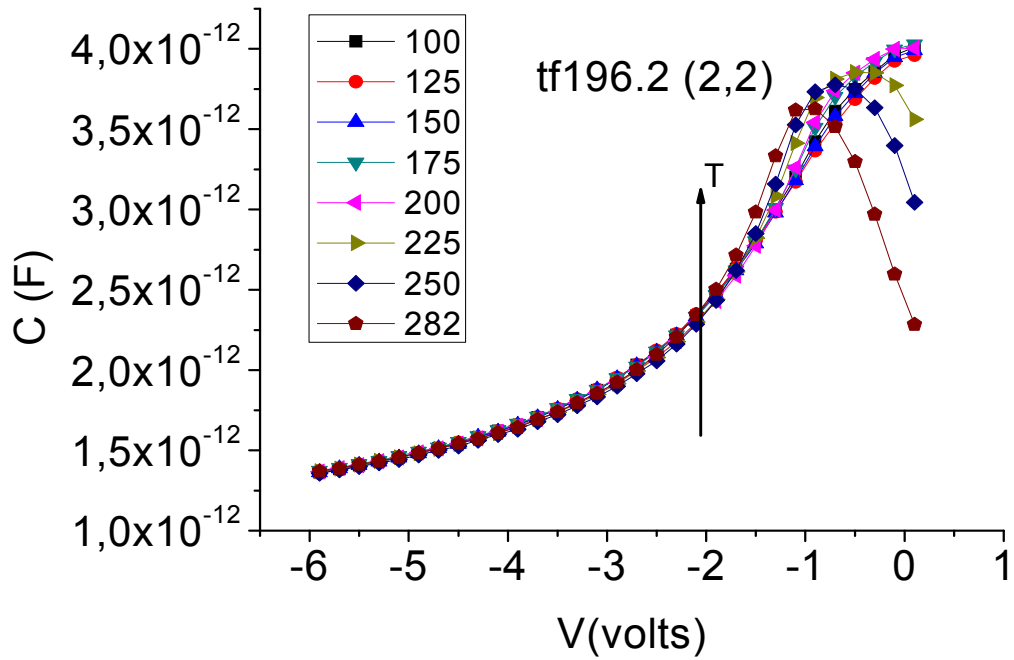
Δείγμα Tf197.1



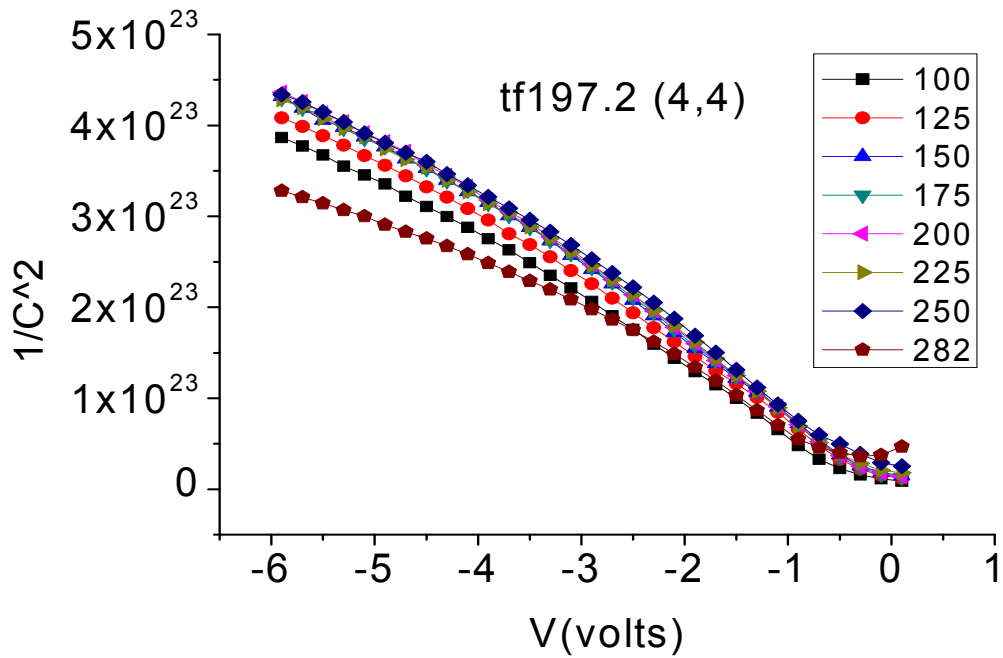
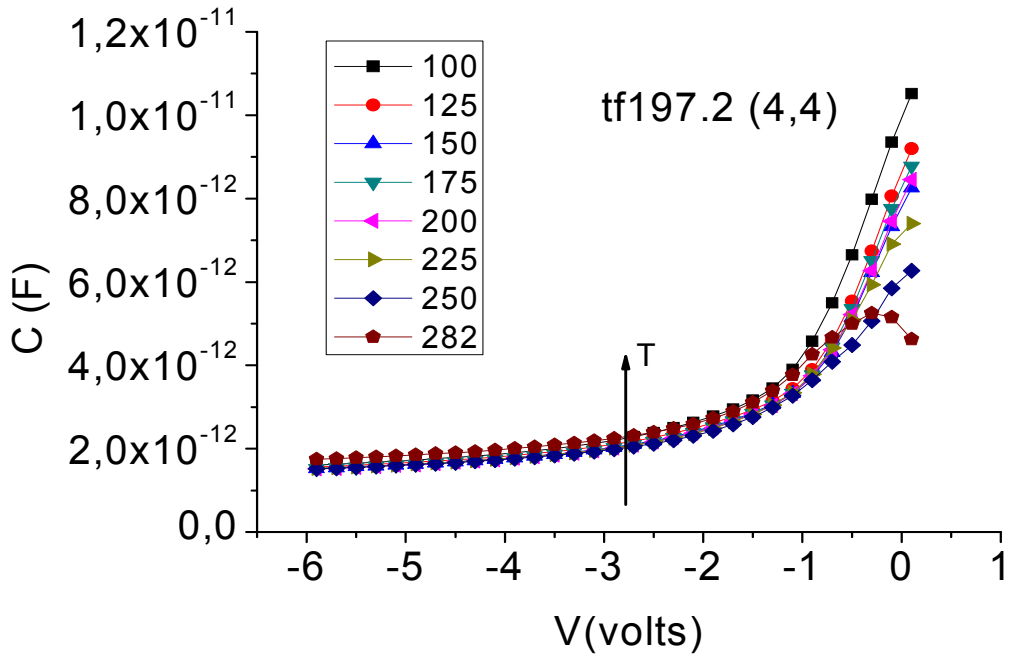
Δείγμα Tf193.2



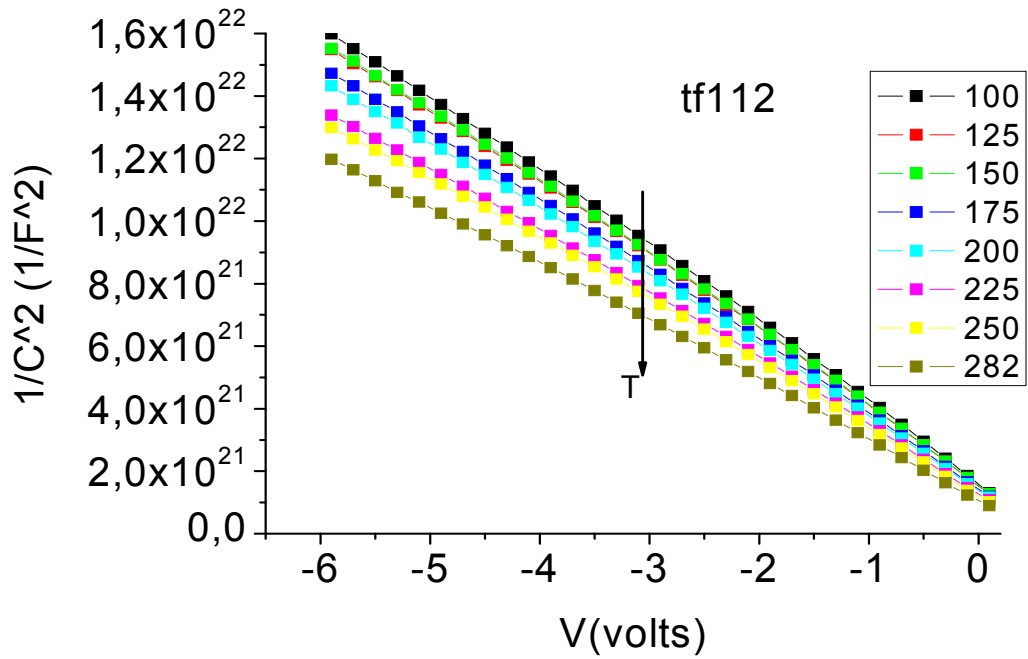
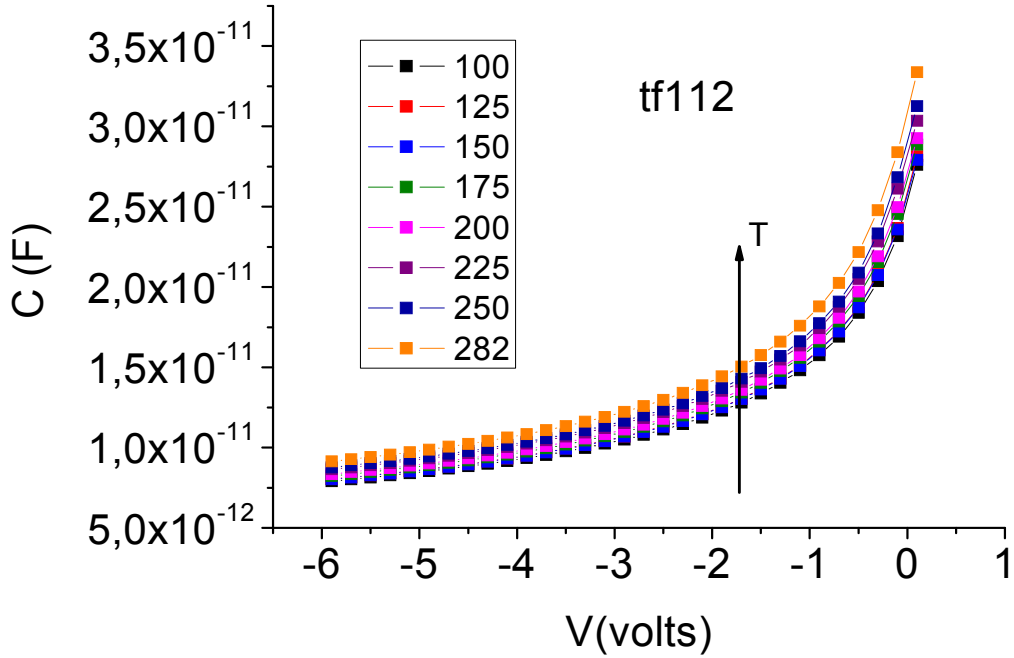
Δείγμα Tf196.2



Δείγμα Tf197.2



Δείγμα Tf112



Στα παραπάνω διαγράμματα $1/C^2-V$ προσαρμόσαμε ευθεία και από την τομή της με τον άξονα των τάσεων υπολογίσαμε την τιμή του εσωτερικού δυναμικού V_{bi} .

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα δεν είναι τέλειες ευθείες έτσι προσαρμόσαμε μια ευθεία για μικρές ανάστροφες τάσης (-1V έως -3V) και μια για πιο μεγάλες (-4V έως -6V). Έτσι βρήκαμε δύο τιμές V_{bi} για κάθε δείγμα και κάθε θερμοκρασία που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

p/i/n 232								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V_{bi1}	19,7	21,7	20,7	20,9	20,5	19,2	18,5	17,6
V_{bi2}	29,3	30,02	30,3	29,4	29,9	29,1	29,2	27,8

Tf193.1								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V_{bi1}	0,45	0,47	0,43	0,40	0,35	0,31	0,25	0,24
V_{bi2}	1,8	1,85	1,74	1,76	1,68	1,59	1,67	1,54

Tf196.1								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V_{bi1}	0,51	0,42	0,33	0,33	0,23	0,13	0,07	0,06
V_{bi2}	1,99	1,81	1,75	1,60	1,49	1,21	1,19	1,07

Tf197.1								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V_{bi1}	0,51	0,47	0,46	0,28	0,31	0,19	0,11	0,06
V_{bi2}	2,05	2,03	2,02	2,00	1,88	1,73	1,56	1,21

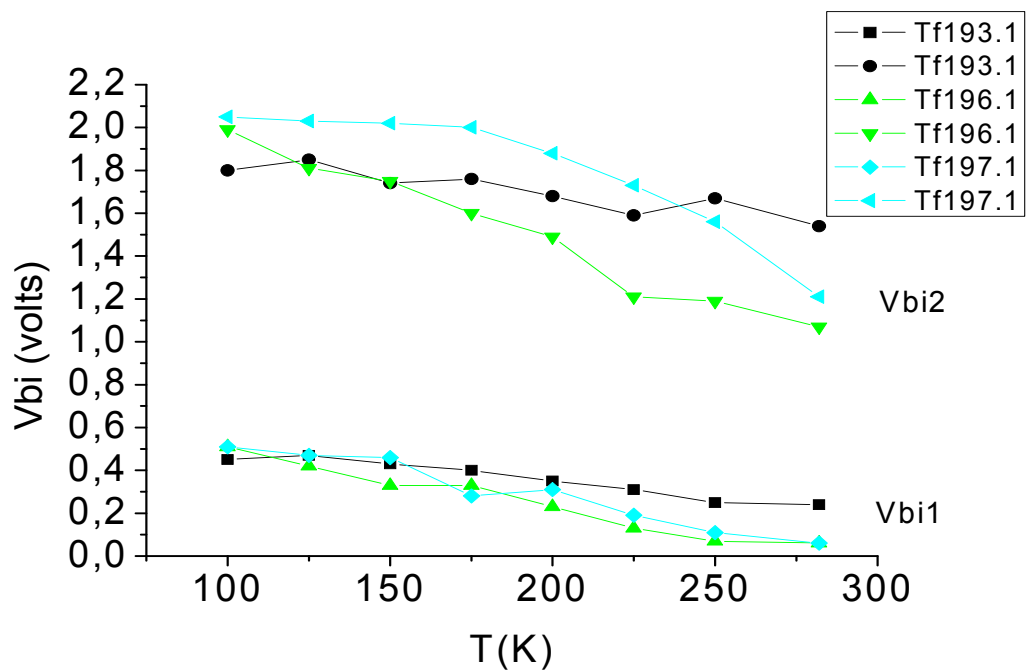
Tf193.2								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V_{bi1}	-0,09	-0,05	-0,13	-0,019	-0,20	-0,22	-0,36	-0,59
V_{bi2}	0,71	0,84	0,86	0,68	0,70	0,63	0,65	0,31

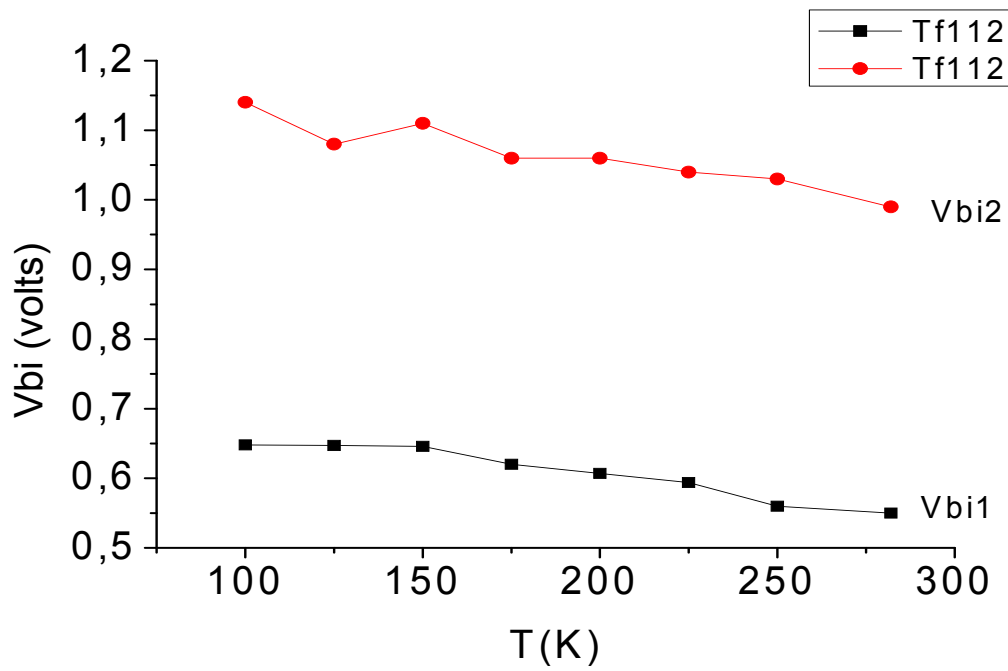
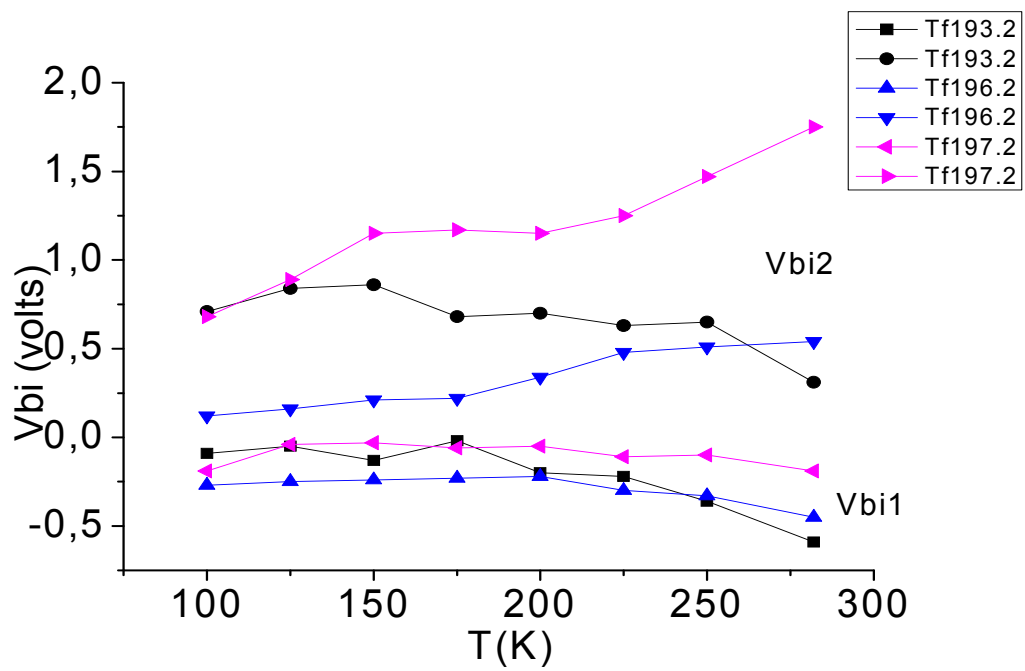
Tf196.2								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V _{bi1}	-0,27	-0,25	-0,24	-0,23	-0,22	-0,30	-0,33	-0,45
V _{bi2}	0,12	0,16	0,21	0,22	0,34	0,48	0,51	0,54

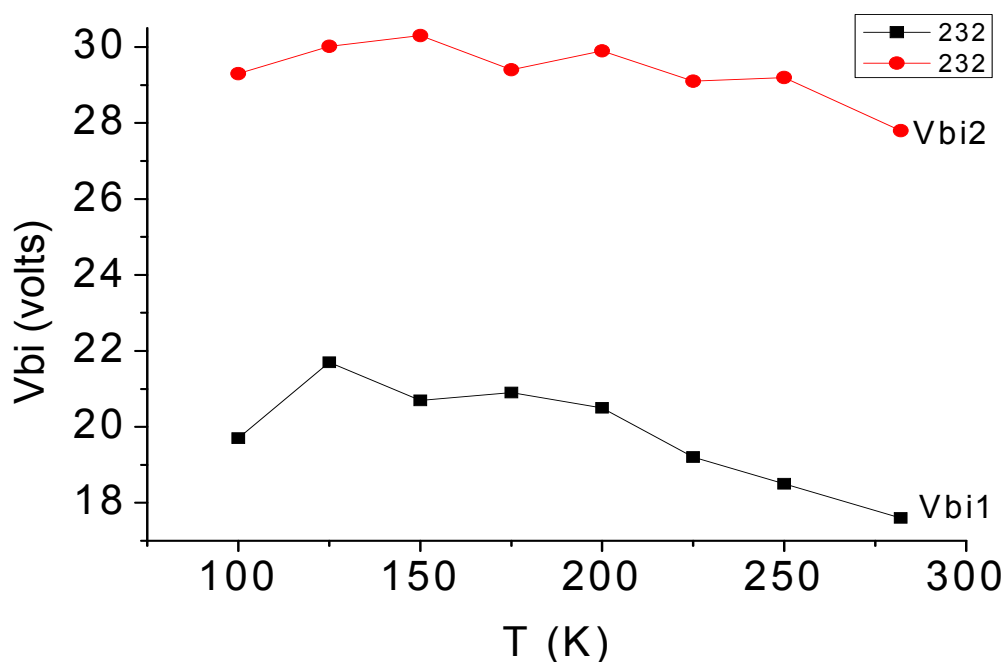
Tf197.2								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V _{bi1}	-0,19	-0,04	-0,03	-0,06	-0,05	-0,11	-0,10	-0,19
V _{bi2}	0,68	0,89	1,15	1,17	1,15	1,25	1,47	1,75

Tf112								
T (K)	100	125	150	175	200	225	250	282
V _{bi1}	0,648	0,647	0,646	0,620	0,607	0,594	0,560	0,550
V _{bi2}	1,14	1,08	1,11	1,06	1,06	1,04	1,03	0,99

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα παρακάτω διαγράμματα:







5.7 Παρατηρήσεις-Συμπεράσματα

Παρατηρούμε ότι η διαφορά του V_{bi} ανάμεσα στις χαμηλές ανάστροφες τάσης και στις υψηλές είναι της τάξης του 1 Volt. Επίσης παρατηρούμε ότι γενικά πέφτει η τιμή του V_{bi} με την θερμοκρασία και αυτό είναι λογικό γιατί όσο μεγαλώνει η θερμοκρασία τόσο και περισσότεροι φορείς ελευθερώνονται και μεγαλώνει η διάχυση από την μια μεριά στην άλλη μέχρι να ισορροπήσει η επαφή. Οπότε μειώνεται και το εσωτερικό δυναμικό.

Επίσης παρατηρούμε ότι στο δείγμα 232 η τιμή του V_{bi} είναι πολύ μεγαλύτερη και αυτό είναι λογικό γιατί το 232 είναι ένα δείγμα p-i-n και η καμπύλη του $1/C^2$ vs V είναι μετατοπισμένη προς τα πάνω κατά ένα παράγοντα ανάλογο του πάχους της περιοχής i.

Τέλος θα ήθελα να επισημάνω ότι στα δείγματα που είχαν υποστεί RTA παρατηρήσαμε αρνητικό V_{bi} το οποίο έχει παρατηρηθεί και σε δείγματα Schottky Si και έχει αποδοθεί σε ανομοιόμορφο δίοδο και εξάρτηση του φραγμού δυναμικού με την θερμοκρασί

5.8 Γενικά συμπεράσματα-Σχόλια

Παρατηρούμε από τις φωτογραφίες των δειγμάτων μας ότι αυτά που πέρασαν από το RTA φαίνεται ότι το υλικό έχει γίνει πιο καλό με λιγότερες ανομοιομορφίες.

Αυτό το βλέπουμε και από τις μετρήσεις που κάναμε ότι γενικά στα δείγματα που έχουν περάσει από RTA τα αποτελέσματα μας είναι αρκετά καλύτερα.

Επίσης παρατηρήσαμε ότι στις μετρήσεις TLM τα γραμμικά βγάζουν πιο σωστά αποτελέσματα αλλά για λόγους processing πολλές φορές προτιμούνται τα κυκλικά που είναι πιο εύκολα στην κατασκευή τους.

Στα δείγματα που είχαν αναπτυχθεί πάνω σε n πυρίτιο παρατηρήσαμε ότι το SrCu_2O_2 συμπεριφέρεται σαν ημιαγωγός p. Έτσι αυτό που είδαμε ήταν μια επαφή p/n. Όταν όμως το τοποθετήσαμε πάνω σε πυρίτιο τύπου p παρατηρήσαμε ότι τα SrCu_2O_2 συμπεριφέρθηκε σαν ημιαγωγός τύπου n. Επειδή είχαμε επαληθεύσει με τα δείγματα tf204.5 και το tf204.5 όπως αναφέραμε και στην αρχή ότι το SrCu_2O_2 είναι τύπου p φτάσαμε στο συμπέρασμα ότι τελικά είναι τύπου p με μικρότερη συγκέντρωση οπών από αυτή του p πυριτίου. Έτσι η επαφή που είχαμε ήταν μια επαφή τύπου p̄p.

Από τις μετρήσεις ρεύματος τάσης παρατηρήσαμε ότι σε θερμοκρασία δωματίου για δείγματα με την ίδια συγκέντρωση Ba αυτά που πέρασαν από RTA παρουσιάζουν μικρότερες τιμές συντελεστή ιδανικότητας n και αρκετά μικρότερη αντίσταση. Αυτό μπορεί να συμβαίνει γιατί μετά το RTA το υλικό του SrCu_2O_2 βελτιώνεται και 'δένετε πιο καλά με το Si' έτσι ώστε η ένωση τους να είναι πιο σωστή με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα.

Ακόμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία στο ίδιο δείγμα ο συντελεστής ιδανικότητας γίνεται όλο και μικρότερος και αυτό συμβαίνει γιατί πιθανόν να μειώνονται τα ρεύματα επανασύνδεσης και η δίοδος να συμπεριφέρεται καλύτερα.

Για τον ίδιο λόγο την ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η αντίσταση. Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας έχουμε περισσότερους φορείς που μπορούν να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικού με αποτέλεσμα να μειώνεται και η αντίσταση και γενικά μειώνεται η αντίσταση του SCO μετά την ανόπτηση.

Όσον αφορά την συγκέντρωση Ba στα δείγματα μας βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται η συγκέντρωση ο συντελεστής ιδανικότητας μικραίνει και αυτό μπορεί να οφείλεται στους περισσότερους φορείς και λιγότερες ατέλειες-κέντρα επανασύνδεσης που μας δίνει το Ba.

Το ίδιο παρατηρούμε και με την αντίσταση. Όσο μεγαλώνει η συγκέντρωση τόσο πιο πολύ μικραίνει η αντίσταση του υλικού μας.

Τέλος για τις μετρήσεις ρεύματος τάσης παρατηρούμε ότι το ρεύμα διαρροής μικραίνει στα δείγματα που είχαν περάσει από RTA.

Άρα τα δείγματα που είχαν περάσει από RTA έδειξαν πιο καλή συμπεριφορά.

Στις μετρήσεις χωρητικότητας τάσης είδαμε καταρχήν πως επηρεάζει το στρώμα i σε μια επαφή p-i-n την καμπύλη $1/C^2-V$. Παρατηρήσαμε ότι μετατοπίζει την καμπύλη μας προς τα πάνω όπως προβλέπει η θεωρία κατά ένα $(d/\epsilon)^2$ όπου d το πάχος της περιοχής I και ϵ η διηλεκτρική σταθερά.

Επίσης παρατηρήσαμε ότι για το ίδιο δείγμα το εσωτερικό δυναμικό μειώνεται με την θερμοκρασία. Αυτό συμβαίνει γιατί αυξάνονται με την θερμοκρασία οι φορείς που είναι διαθέσιμοι.

Τέλος στα δείγματα που είχαν περάσει από RTA είδαμε αρνητικό εσωτερικό δυναμικό που είναι λίγο παράξενο και θέλει περισσότερο διερεύνηση για να βρεθούν τα ακριβή αίτια που το προκαλούν.

6. Βιβλιογραφία:

G.W. Newdeck "The PN Junction Diode"

R.S. Muller & T.I. Kamins "Device Electronics for integrated circuits"

S.M. Sze "Physics of Semiconductor devices"

Α.Γεωργακίλας "Ηλεκτρονικές Διατάξεις Ι" (σημειώσεις μαθήματος)

Κουφακη Μαρια "Μελετη διοδων pn και pin GaAs"

Ψυχιας Σπυρος "Κατασκευη και χαρακτηριση GaAs και GaN Schottky διοδων με ITO και ITON για Schottky επαφη"

Βαρδα Μαρια "p-SrCu₂O₂ and n-ZnO(:Al) thin films: Growth, property and applications"

Cecile Cason "Transmission line model measurements"

J. Osvald, "Comments on 'Negative Schottky barrier between titanium and n-type Si(001) for low resistance ohmic contacts'", Solid State Electronics 48 (2004) 2347.