



# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &  
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων  
Αποφάσεων

## ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΧΑΡΤΙΟΥ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΜΟΡΦΗΣ 250/2500 $\mu\text{s}$



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΡΤΖΑΝΑΚΗΣ Ν. ΣΩΚΡΑΤΗΣ

Επιβλέπων : Π. Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2008



# **Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &  
Μηχανικών Υπολογιστών**

**Τομέας Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων  
Αποφάσεων**

## **ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΛΜΑΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΧΑΡΤΙΟΥ ΥΠΟ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ ΜΟΡΦΗΣ 250/2500 $\mu\text{s}$**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΡΤΖΑΝΑΚΗΣ Ν. ΣΩΚΡΑΤΗΣ**

**Επιβλέπων : Π. Δ. ΜΠΟΥΡΚΑΣ**  
**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

Π.Δ. Μπούρκας      Ν. Θεοδώρου      Κ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.    Καθηγητής Ε.Μ.Π.    Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2008

**Μερτζανάκης Ν. Σωκράτης**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μερτζανάκης Ν. Σωκράτης 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, 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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και οι επιπτώσεις αυτών, σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστική τάση της μορφής 250/2500  $\mu$ s. Πρόκειται για μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού, λόγω των μερικών εκκενώσεων, σε δοκίμια πεπιεσμένου χαρτιού πάχους  $d=1$  mm και  $d=2$  mm και στατιστική ανάλυση των μετρήσεων αυτών.

Αρχικά γίνεται μια περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών (στερεά, υγρά, αέρια) που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, καθώς και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάσπαση αυτών υπό υψηλή τάση. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι εργαστηριακές διατάξεις και ο τρόπος που γίνονται οι μετρήσεις των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών, προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός γήρανσης-καταστροφής των μονωτικών υλικών. Τέλος, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις όλων των μετρούμενων μεγεθών καθώς και οι προσεγγιστικές γραφικές παραστάσεις εκθετικής μορφής.

Τα στοιχεία για το θεωρητικό μέρος αυτής της εργασίας, αντλήθηκαν κυρίως από το βιβλίο του καθηγητή Π. Δ. Μπούρκα «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά». Τυχόν άλλες πηγές αναφέρονται συνοπτικά στο τέλος της εργασίας. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι αυτή η εργασία έγινε σε συνεργασία με τον φοιτητή Δρόσο Δημήτριο, ενώ τα αποτελέσματα για τις δικές του σειρές μετρήσεων θα παρατεθούν στην δικιά του διπλωματική εργασία.

## **Λέξεις κλειδιά**

Μονωτικά υλικά, Διάσπαση – Διάτρηση μόνωσης, Μερικές εκκενώσεις, Γήρανση υλικών, Κρουστική τάση, Δύναμη Coulomb, Ανομοιογένειες υλικού.

## Περιεχόμενα

### Ευχαριστίες

### Εισαγωγή

### Κεφάλαιο 1

Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

1.1	Βασικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών	6
1.2	Διηλεκτρική αντοχή	6
1.3	Σχετική διηλεκτρική σταθερά	7
1.4	Συντελεστής απωλειών	8
1.5	Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	10
1.6	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	12
1.7	Επιφανειακή αγωγιμότητα	13
1.8	Μηχανική αντοχή	17
1.9	Γεωμετρική διάταξη μονωτήρων	17

### Κεφάλαιο 2

Υγρά μονωτικά

2.1	Βασικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών	20
2.2	Το μονωτικό λάδι	20
2.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών	21
2.4	Συντήρηση -επεξεργασία του μονωτικού λαδιού	22
2.5	Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών	24

### Κεφάλαιο 3

Μονωτικά αέρια

3.1	Γενικά χαρακτηριστικά μονωτικών αερίων	28
3.2	Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στα αέρια μονωτικά	28
3.3	Ο ιονισμός των ηλεκτρομονωτικών αερίων	30
3.4	Ιονισμός με κρούσεις	31
3.5	Φωτοϊονισμός	32
3.6	Θερμοεκπομπή	32
3.7	Το φαινόμενο της χιονοστιβάδας ηλεκτρονίων	33
3.8	Ενέργεια ιονισμού -συνθήκη ιονισμού με κρούσεις	33
3.9	Η θεωρία Townsend για την ηλεκτρική διάσπαση	34
3.10	Κριτήρια για την ηλεκτρική εκκένωση Townsend	35
3.11	Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων χωρίς τον μηχανισμό ανασύνδεσης	36
3.12	Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων με μηχανισμό ανασύνδεσης	37
3.13	Ο νόμος του Paschen	37
3.14	Αποκλίσεις από τον νόμο του Paschen	39
3.15	Η σημασία της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον ιονισμό	39
3.16	Απόδοση λειτουργίας αερίων μονωτικών κάτω από συνθήκες ρύπανσης	41
3.17	Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά	42
3.18	Το κενό ως αέριο μονωτικό	42

## **Κεφάλαιο 4**

Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των μονωτικών υλικών

4.1	Η διάσπαση στα αέρια και στερεά μονωτικά υλικά	46
4.2	Ο μηχανισμός της υπερπήδησης	46
4.3	Η επιφανειακή διάσπαση	47
4.4	Η ηλεκτρική διάσπαση	48
4.5	Η μακροσκοπική θεωρία της διάσπασης	50
4.6	Οι μερικές εκκενώσεις	51
4.7	Θερμική διάσπαση -θερμοχημική διάσπαση	52
4.8	Η κβαντομηχανική θεωρία της διάσπασης	53
4.9	Παράδειγμα μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης	53
4.10	Συνδυασμός μακροσκοπικής -κβαντομηχανικής θεωρίας	56
4.11	Η διάσπαση των αερίων μονωτικών	57
4.12	Συνθήκες χαμηλής πίεσης και διάσπασης στο κενό	59

## **Κεφάλαιο 5**

Εργαστηριακές διατάξεις διερεύνησης φαινομένων σε μονωτικά υλικά

5.1	Εργαστηριακός έλεγχος των μονωτικών υλικών	62
5.2	Πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων	62
5.3	Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση	67
5.4	Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών	69
5.5	Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση	70
5.6	Η διάταξη των ηλεκτροδίων	72

## **Κεφάλαιο 6**

Συγκεντρωτικοί πίνακες μετρήσεων -σχεδιαγράμματα

6.1	Τυπολόγιο	74
6.2	Συγκεντρωτικοί πίνακες μετρήσεων	76
6.3	Γραφικές παραστάσεις	84
6.4	Προσεγγιστικές γραφικές παραστάσεις εκθετικής μορφής	144
6.5	Συμπεράσματα	204

## **Βιβλιογραφία**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας η οποία συνεπάγεται και την περάτωση τω προπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ.Μπούρκα Περικλή καθηγητή του Εθνικού Μετσοβείου Πολυτεχνείου για την βοήθεια που μου προσέφερε ώστε να ολοκληρώσω αυτή την εργασία με επιτυχία.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο μου και συμφοιτητή Δρόσο Δημήτριο με τον οποίο άλλωστε και συνεργάστηκα για την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής

Δεν θα έπρεπε ακόμη να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους μου Αντρέα Σιμιτζή και Γιώργο Μούντριχα οι οποίοι πρόθυμα με βοηθήσανε σε όλους τους τομείς όπου χρειάστηκα βοήθεια

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου ,τους γονείς μου Νίκο και Βάσω ,και την αδερφή μου Εύη για τα εφόδια και την ηθική στήριξη που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου και την πίστη τους σε εμένα ως άνθρωπο πρώτα και έπειτα ως ηλεκτρολόγο μηχανικό

MEPTZANAKΗΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μερικών εκκενώσεων και οι επιπτώσεις αυτών , σε βιομηχανικά μονωτικά υλικά υπό κρουστική τάση της μορφής 250/2500  $\mu$ s. Πρόκειται για μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού, λόγω των μερικών εκκενώσεων, σε δοκίμια πεπιεσμένου χαρτιού πάχους  $d=1$  mm και  $d=2$  mm Σε θερμοκρασίες των 20,40 και 80 βαθμών κέλσιου και στατιστική ανάλυση των μετρήσεων αυτών.

Αρχικά γίνεται μια περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των μονωτικών υλικών (στερεά, υγρά, αέρια) που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλές εφαρμογές, καθώς και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάσπαση αυτών υπό υψηλή τάση. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι εργαστηριακές διατάξεις και ο τρόπος που γίνονται οι μετρήσεις των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών , προκειμένου να διερευνηθεί ο μηχανισμός γήρανσης-καταστροφής των μονωτικών υλικών. Τέλος, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις όλων των μετρούμενων μεγεθών καθώς και οι προσεγγιστικές γραφικές παραστάσεις εκθετικής μορφής.

Τα στοιχεία για το θεωρητικό μέρος αυτής της εργασίας, αντλήθηκαν κυρίως από το βιβλίο του καθηγητή Π.Δ.Μπούρκα «Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά». Τυχόν άλλες πηγές αναφέρονται συνοπτικά στο τέλος της εργασίας. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι αυτή η εργασία έγινε σε συνεργασία με τον φοιτητή Δρόσο Δημήτριο, ενώ τα αποτελέσματα για τις δικές του σειρές μετρήσεων θα παρατεθούν στην δικιά του διπλωματική εργασία.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΒΑΣΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- 1.1 Βασικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών
- 1.2 Η Διηλεκτρική Αντοχή
- 1.3 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά
- 1.4 Ο συντελεστής απωλειών
- 1.5 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
- 1.6 Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- 1.7 Επιφανειακή αγωγιμότητα
- 1.8 Μηχανική αντοχή
- 1.9 Γεωμετρική διάταξη μονωτήρων

## 1.1 Βασικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών

Ως μονωτικά σώματα ή μονωτές χαρακτηρίζονται τα υλικά που πρακτικά δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος. Στη χημική τους σύνθεση οι μονωτές είναι σώματα ιοντικής, ομοιοπολικής ή μοριακής κατασκευής. Καθώς μάλιστα τα ιόντα των σωμάτων αυτών είναι δυσκίνητα, ή η ισχύς των ομοιοπολικών δεσμών είναι μεγάλη, ή τα μόριά τους είναι σταθερά, δηλαδή δεν διασπώνται εύκολα σε φορτισμένες ρίζες, δεν υπάρχουν στα παραπάνω σώματα ευκίνητοι φορείς σε αξιόλογη ποσότητα, και έτσι δεν έχουν την δυνατότητα της εκδήλωσης μιας ουσιαστικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Πάντως είναι πρακτικά αναπόφευκτη η ύπαρξη, σε κάθε σώμα, ενός κάποιου πλήθους προσμίξεων, ακαθαρσιών, διεγέρσεων και διασπάσεων που δημιουργούν έναν μικρό αριθμό φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος.

Αποτέλεσμα της έλλειψης αξιόλογης ηλεκτρικής αγωγιμότητας, τα μονωτικά σώματα είναι κατάλληλα για να εμποδίζουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων δια μέσου της μάζας τους, και για να διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα διάφορα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων. Έτσι βρίσκουν πολύ σημαντικές χρήσεις, κυρίως ως ηλεκτρικές μονώσεις σε όλες τις ηλεκτρικές εφαρμογές, και ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών .

Η ανάγκη για την αξιόπιστη, διαχρονική συμπεριφορά των μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής αυτών .Αυτά είναι η διηλεκτρική αντοχή, η σχετική διηλεκτρική σταθερά, ο συντελεστής απωλειών και η ειδική αγωγιμότητα. Σε πολλές εφαρμογές ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντοχή των μονωτικών υλικών σε μηχανικές καταπονήσεις καθώς και η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα.

## 1.2 Η Διηλεκτρική Αντοχή

Ως διηλεκτρική αντοχή ( $E_d$ ) ενός μονωτικού υλικού ορίζεται το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση ( $U_{dmin}$ ) προς την απόσταση των ηλεκτροδίων ( $d$ ) σε ομογενές πεδίο :

$$E_d = U_{dmin} / d \quad (\text{συνήθως σε kV/cm}) \quad (1.1-1)$$

Για μια δεδομένη διάταξη των ηλεκτροδίων η τιμή  $E_d$  αποτελεί ένα πρώτο κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων μονωτικών .Οι τιμές που δίνονται στον παρακάτω πίνακα για τη διηλεκτρική αντοχή μερικών μονωτικών ( σε ομογενές πεδίο, συχνότητας 50 Hz και για μικρό χρονικό διάστημα καταπόνησης ) δείχνουν τη δυνατότητα αυτή.

**Πίνακας 1.2 - 1 :**  $E_d$  για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz

Μονωτικό υλικό	d (mm)	$E_d$ (kV/cm)
αέρας		21
λάδι μετασχηματιστών		60...200
πορσελάνη	0,5...3	340...380
στεατίτης	0,5...3	200...300
γυαλί	<1	160...450
χαρτόνι ..	0,5...1,5	300...450
χαρτί στο λάδι	<2	200...400
σκληρό	<3	300...500
ελαστικό	<3	30...50
ξύλο	<3	30...50
Glimmer	0,01...0,1	500...1000

Η διηλεκτρική αντοχή μετριέται με επιβολή ημιτονικής εναλλασσόμενης τάσης σε δοκίμιο πάχους 1 mm, και είναι η ενεργός τιμή της τάσης στην οποία εκδηλώνεται ακαριαία η διάσπαση του υλικού. Στις εφαρμογές όμως ενδιαφέρει η μακροχρόνια και όχι η στιγμιαία συμπεριφορά των υλικών. Επειδή λοιπόν όταν η τάση επιβάλλεται για μεγάλο χρονικό διάστημα προκαλείται εξασθένηση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού, λόγω κυρίως των μερικών εκκενώσεων, στους υπολογισμούς των μονωτικών υλικών θεωρείται συνήθως ότι η διηλεκτρική αντοχή τους είναι πρακτικά περίπου 10% της τιμής που μετριέται στις δοκιμές.

### 1.3 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$ , ή απλούστερα διηλεκτρική σταθερά (ή επιτρεπτότητα ή διαπερατότητα) ενός υλικού είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διαφόρων μονωτικών υλικών, που συνθέτουν μία μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών, μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, ώστε να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που ο συνδυασμός του μονωτικού λαδιού και του χαρτιού βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Τα δύο μονωτικά υλικά έχουν την ίδια περίπου σχετική διηλεκτρική σταθερά με αποτέλεσμα να μην συμβαίνει διάθλαση των πεδιακών γραμμών στη διαχωριστική επιφάνειά τους. Επιπλέον το λάδι εμποτίζει το χαρτί, ώστε να αποκλείεται η ύπαρξη του αέρα ο οποίος μόνο προβλήματα θα μπορούσε να δημιουργήσει λόγω της μικρής του διηλεκτρικής αντοχής, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2-1.

Έτσι, σε έναν μονωτή έχουμε εκτός από το χωρητικό ρεύμα  $I_c$ , ένα ρεύμα διαρροής  $I_R$ . Στο σχήμα 1.4-1 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή  $C$  με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες, λόγω της αγωγιμότητας  $G$ .

**Πίνακας 1.3-1 :** Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C

Μονωτικό υλικό	$\epsilon_r$	Μονωτικό υλικό	$\epsilon_r$
αέρας	1,000594	Mikanit	4...6
αέρας (κανονικές συνθήκες)	1,5	πάγος	2...3
απεσταγμένο νερό	8	Petrinax	4,8...5,4
βακελίτης	3,5...8,2	PVC	4...6
Condense	4...8	Plexiglas	2,6...3,5
Glimmer	4...8	πορσελάνη	5,5...6
γυαλί	5...16	Presspan	2,5...3,4
θερμοπλαστικά συνθετικά	2...5	ρητίνη	2,2
λάδι μετασχηματιστών	2,0...2,5	στεατίτης	6,4
λάστιχο	218...6,5	χαλαζίας	3... 7
ξύλο	215...6,5	χαρτί	1,8...2,6

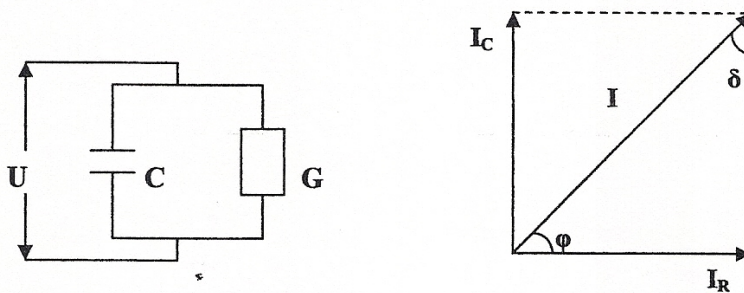
#### 1.4 Ο συντελεστής απωλειών

Όταν τα μονωτικά υλικά βρίσκονται κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών πεδίων, αναπτύσσονται διάφοροι μηχανισμοί οι οποίοι απορροφούν ενέργεια από τα πεδία. Δηλαδή έχουμε ανεπιθύμητη απώλεια ενέργειας. Το φαινόμενο είναι επιπρόσθετα δυσάρεστο, διότι η ενέργεια που απορροφάται στα υλικά μετατρέπεται κυρίως σε θερμότητα, η οποία αν δεν αποβάλλεται προς το περιβάλλον με αρκετά ταχύ ρυθμό, προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία, τις βλάβες και την πρόωρη καταστροφή των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων.

Ειδικότερα, κάτω από συνεχή τάση η απορρόφηση της ενέργειας οφείλεται στη δημιουργία του ρεύματος διαρροής στο μονωτικό σώμα, εξαιτίας της όποιας αγωγιμότητας όγκου ή και της επιφανειακής του αγωγιμότητας. Δηλαδή η θέρμανση του υλικού οφείλεται στο φαινόμενο Joule. Στα εναλλασσόμενα πεδία εμφανίζεται επιπλέον μία συνήθως πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας και θέρμανση του σώματος, που προκαλείται από τις περιοδικές πολώσεις και αποπολώσεις του, σύμφωνα με τους διάφορους μηχανισμούς πόλωσης. Στην περίπτωση αυτή η απώλεια ενέργειας ανά περίοδο και ανά μονάδα όγκου του σώματος δίνεται από τη σχέση :

$$W = \pi E_m^2 \epsilon_0 \epsilon_r \operatorname{tg} \delta \quad (1.4-1)$$

όπου  $\operatorname{tg} \delta$  ο συντελεστής απωλειών και  $E_m$  η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης.



**Σχήμα 1.4-1 :** Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G

Ο συντελεστής απωλειών :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (1.4-2)$$

είναι κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού, ή μιας μονωτικής διάταξης γενικότερα, γιατί παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αγωγιμότητά του.

Οι απώλειες Joule ( $P_w$ ) στην αγωγιμότητα είναι :

$$P_w = I_R U = GU^2 = U^2 \cdot C \operatorname{tg} \delta = P_B \operatorname{tg} \delta \quad (1.4-3)$$

όπου  $P_w$  η άεργος ισχύς στη χωρητικότητα C.

Αν υποθέσουμε, ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό υλικό χωρητικότητας C τότε θα είναι :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1.4-4)$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει ότι :

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (1.4-5)$$

όπου  $\sigma$  η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή, σύμφωνα με τις σχέσεις (1.4 -2) και (1.4 -3) θα είναι :

$$P_w = U^2 \omega \epsilon \frac{A}{d} \operatorname{tg} \delta \quad (1.4-6)$$

και πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με την απόσταση d :

$$P_w = \left( \frac{U}{d} \right)^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta (A d) = \left( \frac{U}{d} \right)^2 \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta V \quad (1.4-7)$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

Αν θεωρήσουμε ότι ο στοιχειώδης όγκος dV μίας τυχαίας διάταξης ηλεκτροδίων είναι ένας μικρός πυκνωτής επιπέδων πλακών, τότε οι απώλειες Joule της διάταξης θα είναι :

$$P_w = \omega \epsilon \operatorname{tg} \delta \int \left( \frac{U}{d} \right)^2 dv = \epsilon \operatorname{tg} \delta \int E^2 dv \quad (1.4-8)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορεί εύκολα να υπολογιστούν οι απώλειες Joule μιας μόνωσης.

Για ένα ομοιογενές μονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι :

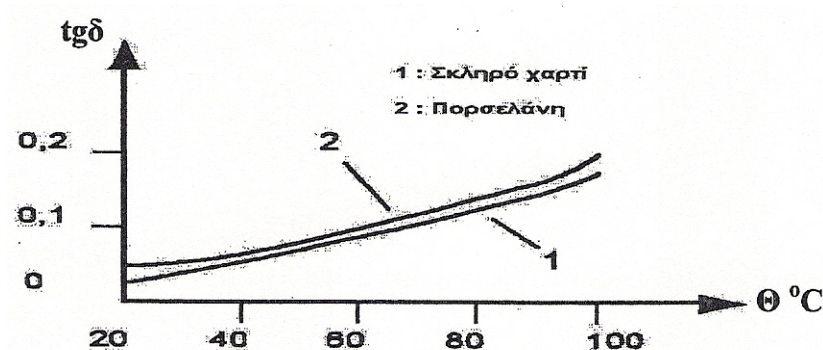
$$\varepsilon \operatorname{tg} \delta = \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta = \sigma / \omega \quad (1.4-9)$$

όπου  $\varepsilon_0 = 8,857 \text{ pF/m}$  και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα. Στην πράξη χρησιμοποιείται συννηθέστερα το γινόμενο  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$  για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 1.4 -1 δίνονται οι τιμές  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$  για ορισμένα υλικά.

**Πίνακας 1.4 -1 :** Τάξη μεγέθους της τιμής  $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$  για ορισμένα μονωτικά υλικά στους  $20^\circ\text{C}$

Μονωτικό υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\varepsilon \operatorname{tg} \delta$
λάδι μετασχηματιστών		0,004...0,046
πορσελάνη	0,5...3	0,085...0,16
στεατίτης	0,5...3	0,006...0,02
γυαλί	<1	0,003...0,1
χαρτόνι	0,5...1,5	0,01
Glimmer	0,01...0,1	0,009...0,012

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4-2 ο συντελεστής απωλειών εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος του μονωτικού υλικού.



**Σχήμα 1.4 -2 :** Αύξηση του συντελεστή απωλειών συναρτήσει της θερμοκρασίας

## 1.5 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Στο κρυσταλλικό πλέγμα των μετάλλων, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια βρίσκονται σε συνεχή άτακτη κίνηση υπό την επίδραση της θερμικής διέγερσης του περιβάλλοντος και των διαδοχικών προσκρούσεων στα άτομα. Με την- επίδραση όμως ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, οι τροχιές των ηλεκτρονίων καμπυλώνουν αντίθετα προς αυτό. Έτσι αν σε μια μεταλλική ράβδο, διατομής 1ης προς τη μονάδα, επιβληθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο με ένταση  $E_x$  κατά τον άξονα  $x$ , η μετακίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων αποκτά έναν προσανατολισμό αντίθετο προς την κατεύθυνση του πεδίου. Η προσανατολισμένη αυτή μετακίνηση των ηλεκτρονίων

εκδηλώνεται ως ηλεκτρικό ρεύμα, που η πυκνότητά του δίνεται από τη σχέση :

$$J_x = n e v \quad (1.5-1)$$

όπου  $n$  η συγκέντρωση (ή η πυκνότητα) των ελεύθερων ηλεκτρονίων του μετάλλου, δηλαδή το πλήθος τους ανά μονάδα όγκου του σώματος,  $e$  το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και  $v$  η φαινόμενη μέση ταχύτητα της ολίσθησης των ηλεκτρονίων προς την κατεύθυνση  $x$ .

Η ταχύτητα ολίσθησης  $v$  είναι ανάλογη με την ένταση του πεδίου  $E_x$  :

$$v = \mu E_x \quad (1.5-2)$$

και η σταθερά  $\mu$  της αναλογίας στην παραπάνω σχέση ονομάζεται κινητικότητα (ή ευκινησία) του ηλεκτρονίου με μονάδες  $m^2 s^{-1} V^{-1}$ . Μία άλλη σχέση αναλογίας, που είναι μια μορφή του γνωστού νόμου του Ohm, συνδέει την πυκνότητα του ρεύματος με την ένταση του πεδίου :

$$J_x = \sigma E_x \quad (1.5-3)$$

όπου  $\sigma$  είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του μετάλλου.

Από τις σχέσεις (1.5 -1), (1.5 -2) και (1.5 -3) βρίσκουμε ότι :

$$\sigma = n e \mu \quad (1.5-4)$$

Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά υλικά, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίνεται από την σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (1.5-5)$$

όπου  $\sigma$  : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας  $\theta$  ως προς το περιβάλλον

$\sigma_0$  : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

$W$  : η ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)

$k$  : η σταθερά Boltzmann ( $1,37 \cdot 10^{-3} \text{ Ws/}^\circ\text{K}$ )

$T$  : η απόλυτη θερμοκρασία

$\beta$  : ένας συντελεστής του υλικού

π.χ. για το υλικό Presspan  $\beta \approx 0,02$

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά έχει παρατηρηθεί, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω Π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης. Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις; όπως στα ιονισμένα αέρια και ότι παύει να ισχύει η σχέση (1.5-5).

Για την αύξηση της τιμής  $\sigma$ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις έχει διατυπωθεί η σχέση :

$$\sigma = \sigma_0 \frac{e^{\beta\theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (1.5-6)$$

όπου  $E$  η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως το υγιές τμήμα) και  $\delta$  ένας συντελεστής που εκφράζει την συμμετοχή των ανομοιογενειών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής  $\sigma$ . Για το ομοιογενές υλικό είναι  $\delta = 0$ , διαφορετικά  $\delta > 0$ .

Τέλος, η αγωγιμότητα των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ειδικότερα οι ακτίνες  $X$  μπορεί να προκαλέσουν διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών υλικών. Το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως επαγόμενη αγωγιμότητα, αποτελεί πρόβλημα στις διαστημικές κατασκευές λόγω του υψηλού ποσοστού κοσμικής ακτινοβολίας.

## 1.6 Συντελεστή, θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις περιοχές όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο μονωτικό λάδι, παρουσία υγρασίας στην περίπτωση αέριου μονωτικού). Γενικά ισχύει ο κανόνας ότι όσο πιο κάλος μονωτής είναι ένα υλικό τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες. Στον πίνακα 1.6 -1 δίνονται τιμές του συντελεστή  $\lambda$  για ορισμένα μονωτικά υλικά.

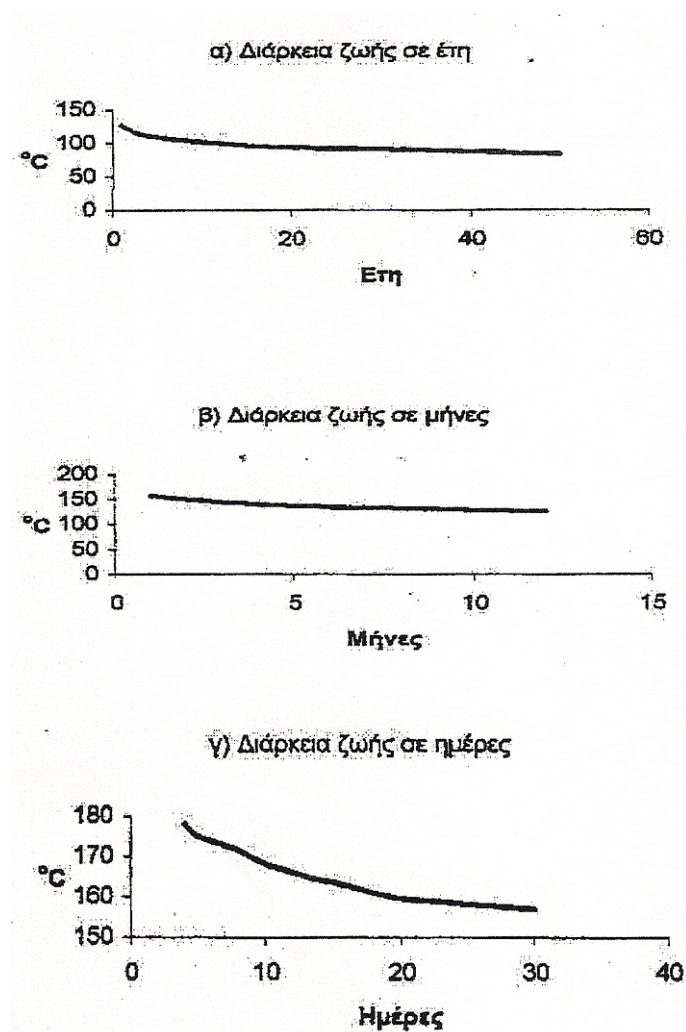
**Πίνακας 1.6 -1 :** Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών

Μονωτικό υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\lambda$ σε $\frac{Wcm}{cm^2 grad}$
πορσελάνη	0,5...3	0,008...0,015
στεατίτης	0,5...3	0,02...0,026
γυαλί	<1	0,0075...0,012
ξύλο	<3	0,001...0,002
χαρτόνι	0,3...1,5	0,003
σκληρό ελαστικό	<3	0,001
Glimmer	<0,5	0,003
χαρτί στο λάδι	<2	0,014...0,03

Σε πολλές προδιαγραφές γίνεται διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες με χρήσιμες πληροφορίες για την έγκαιρη συντήρηση - αντικατάσταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε μια κατασκευή. Στα γραφήματα (α),



(β) και (γ) του σχήματος 1.6 -1 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας στη μείωση του χρόνου ζωής του μονωτικού υλικού.



Σχήμα 1.6 -1 : Διάρκεια ζωής του χαρτιού ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας

## 1.7 Επιφανειακή αγωγιμότητα

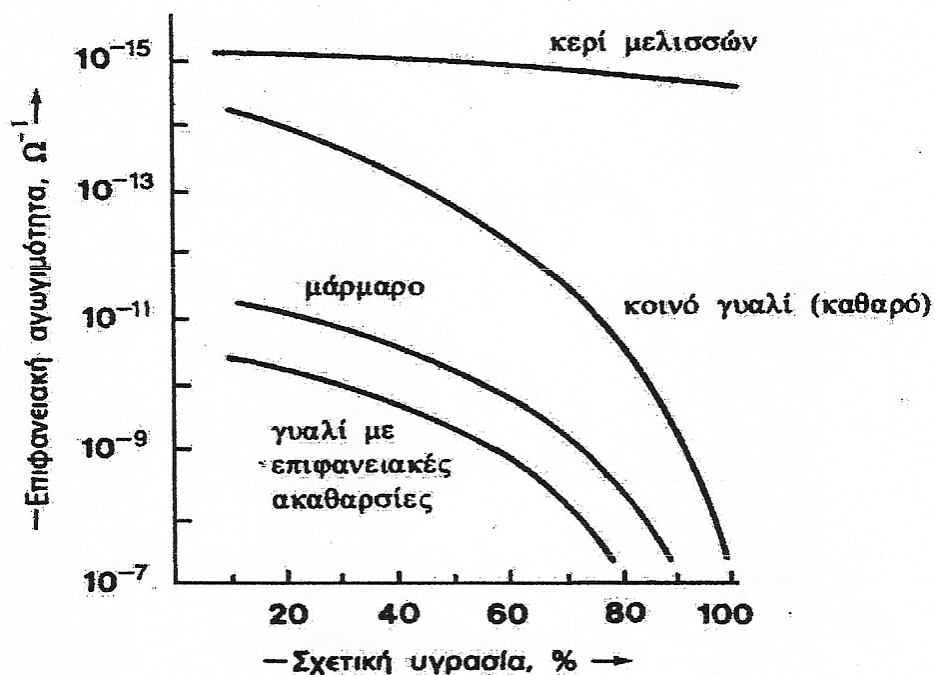
Στα στερεά μονωτικά υλικά, ειδικότερα, παρουσιάζεται μια ιδιομορφία ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Δηλαδή έκτος από την αγωγιμότητα διαμέσου της μάζας τους εκδηλώνεται και μια επιφανειακή αγωγιμότητα με μετακίνηση φορέων κατά μήκος της εξωτερικής τους επιφάνειας, έξω από το κυρίως σώμα. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί αγωγιμότητας είναι ανεξάρτητοι ο ένας από τον άλλο. Για διάκριση, οι αντίστοιχες ειδικές αγωγιμότητες ονομάζονται ειδική αγωγιμότητα όγκου ( $\sigma$ ), και ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα ( $\sigma_e$ ). Η δεύτερη ορίζεται ως η αγωγιμότητα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων τοποθετημένων παράλληλα πάνω στην επιφάνεια του σώματος, που βρίσκονται σε απόσταση ίση με το μήκος τους. Η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα ( $\sigma_e$ ) εκφράζεται σε μονάδες  $\Omega^{-1}$ , και όχι σε  $\Omega^{-1}m$  όπως η  $\sigma$ .

Στα περισσότερα μονωτικά υλικά η αγωγιμότητα όγκου είναι πολύ μικρή, και έτσι η επιφανειακή τους αγωγιμότητα αποκτά συχνά κυρίαρχη σημασία, ιδίως όταν ευνοείται από το γεωμετρικό του σχήμα. Η επιφανειακή αγωγιμότητα επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του περιβάλλοντος και από τη ρύπανση της επιφάνειας του σώματος. Όταν η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερη από 70 - 80%, η επιφανειακή αγωγιμότητα των περισσότερων σωμάτων αποκτά αξιόλογες τιμές. π.χ. σε ξηρή ατμόσφαιρα με περίπου 20% σχετική υγρασία, το κοινό γυαλί έχει ασήμαντη επιφανειακή αγωγιμότητα, της τάξης του  $10^{-13} \Omega^{-1}$ . Σε υγρασία όμως 70% η επιφανειακή αγωγιμότητα του γυαλιού ανεβαίνει στο  $10^{-11} \Omega^{-1}$  όταν η επιφάνειά του είναι καθαρή και στο  $10^{-8} \Omega^{-1}$  περίπου όταν είναι ακάθαρτη, δηλαδή εκατό χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από του καθαρού γυαλιού σε ξηρή ατμόσφαιρα.

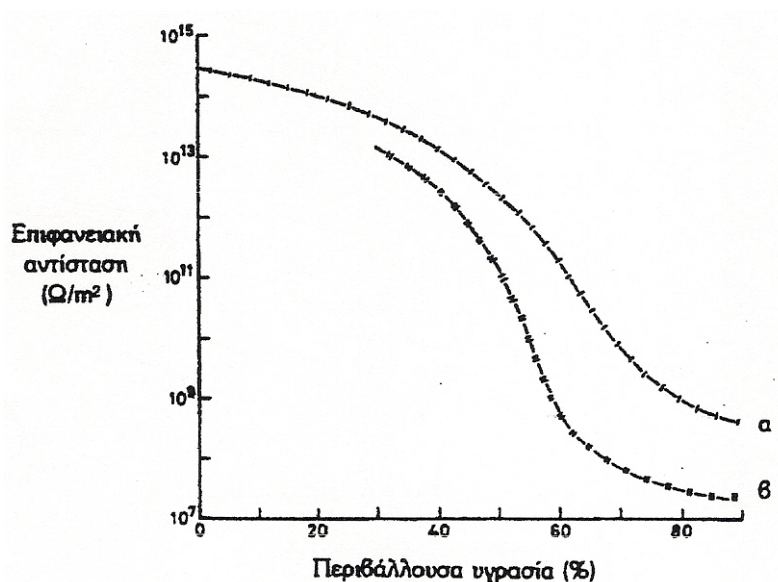
Η αύξηση αυτή της επιφανειακής αγωγιμότητας οφείλεται στα ιόντα που συγκεντρώνονται στη λευκή υδάτινη στοιβάδα που σχηματίζεται στην επιφάνεια των σωμάτων, όταν βρίσκονται σε υγρή ατμόσφαιρα. Τα ιόντα προέρχονται ή από τις ακαθαρσίες που επικάθονται στην επιφάνεια των στερεών, ή από τη χημική δομή του σώματος, όπως π.χ. τα ιόντα νατρίου του κοινού γυαλιού. Το επιφανειακό στρώμα ενός αντιπροσωπευτικά ρυπαρού μονωτήρα θα περιέχει αδρανή ορυκτή ύλη, ηλεκτρικά αγωγή σκόνη όπως άνθρακα ή οξείδια μετάλλου, διαλυτά άλατα στο νερό και υγρασία. Αυτό το στρώμα θα συμπεριφέρεται σαν ένας μεταβλητός, μη γραμμικός αντιστάτης, ασταθής στις περισσότερες περιπτώσεις στην εμφάνιση ηλεκτρικών πεδίων. Το ρεύμα διαρροής θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας, των ηλεκτροχημικών προϊόντων ηλεκτρόλυσης και των ηλεκτρικών μερικών εκκενώσεων. Οι δευτερογενείς επιπτώσεις μπορούν να ποικίλουν από την ηλεκτροχημική διάβρωση μέχρι την δημιουργία μερικών εκκενώσεων, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην υπερπήδηση του μονωτήρα και το σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου στο περιβάλλον μέσο. Το ρεύμα διαρροής και οι επιπτώσεις του καθορίζουν το σχεδιασμό ενός μονωτήρα, ειδικά στις κατηγορίες των μονωτήρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εξωτερικούς χώρους, εκτεθειμένους σε ατμοσφαιρική υγρασία και ρύπανση.

Η επίδραση της υγρασίας ε(ναι μικρότερη σε μη διαβρέξιμα σώματα, όπως το κερί διότι δεν σχηματίζεται εύκολα μιας συνεχής στοιβάδα νερού στην επιφάνεια τους. Αντίθετα, ε(ναι εντονότερη στα πορώδη σώματα, όπως το μάρμαρο, διότι η απορρόφηση υγρασίας στους πόρους τους, διευκολύνει τον σχηματισμό της επιφανειακής στοιβάδας του νερού. Ειδικότερα, στην περίπτωση του μαρμάρου, στην αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας συμβάλλουν και τα ευδιάλυτα ιόντα όπως τα  $Fe^{+2}$  και  $Mg^{+2}$ , από τις προσμίξεις που εγκλείονται συνήθως στους πόρους του.

Στο σχήμα 1.7 -1 φαίνεται η μεταβολή της επιφανειακής αγωγιμότητας ορισμών υλικών συναρτήσει της υγρασίας και της καθαρότητας της επιφάνειας τους.



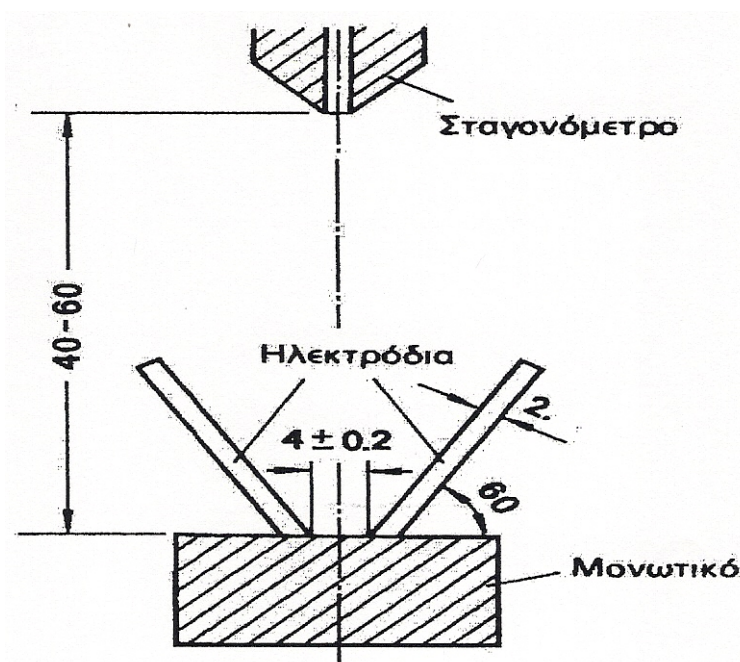
Σχήμα 1.7-1 : Η μεταβολή της ειδικής επιφανειακής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών Ι σε συνάρτηση με την καθαρότητα της επιφάνειάς τους και τη σχετική υγρασία του αέρα στο περιβάλλον



Σχήμα 1.7-2 : Μεταβολή της επιφανειακής αντίστασης σε σχέση με την περιβάλλουσα υγρασία.  
α) υαλώδης πορσελάνη  
β) μη υαλώδης πορσελάνη

Το ρεύμα που δημιουργεί η επιφανειακή αγωγιμότητα των στερεών μονωτικών σωμάτων ονομάζεται ρεύμα ερπυσμού και είναι σχετικά σταθερό όταν οι συνθήκες δεν μεταβάλλονται. Η κατανομή όμως της πυκνότητας των ρευμάτων αυτών δεν είναι ομοιόμορφη, διότι οι φορείς τους ακολουθούν κατά προτίμηση ορισμένους αγωγίμους δρόμους διαρροής στην επιφάνεια ή σε ρωγμές των σωμάτων.

Μεγάλη δυσκολία παρουσιάζει η αντικειμενική σύγκριση των σωμάτων ως προς την επιφανειακή αγωγιμότητα, αφού η ιδιότητα αυτή δεν παρατηρείται ουσιαστικά στο εξεταζόμενο σώμα αλλά εκδηλώνεται έξω από αυτό, στο λεπτό υγρό στρώμα που σχηματίζουν η υγρασία και οι ακαθαρσίες που επικάθονται στην επιφάνειά του. Εκείνο που έχει ενδιαφέρον, στην περίπτωση αυτή είναι να εκτιμηθεί η προδιάθεση του μονωτικού υλικού να διαβρέχεται από την υγρασία και να ευνοεί έτσι το σχηματισμό του λεπτού επιφανειακού αγωγίμου στρώματος. Σε μια συμβατική μέθοδο, που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, ρίχνονται διαδοχικές σταγόνες ενός αγωγίμου υδατικού διαλύματος πάνω στην επιφάνεια του μονωτικού, ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια και καταγράφεται ο αριθμός των σταγόνων που απαιτούνται για την εμφάνιση ενός έντονου ρεύματος ερπυσμού. Όταν αρκούν μέχρι 10 σταγόνες το υλικό θεωρείται μειονεκτικό από πλευράς επιφανειακής αγωγιμότητας, από 11 έως 100 σταγόνες χαρακτηρίζουν το υλικό ως μέτριο και πάνω από 101 σταγόνες σημαίνουν ότι το υλικό είναι ικανοποιητικά ανθεκτικό εναντίον της ανάπτυξης επιφανειακής αγωγιμότητας.



**Σχήμα 1.7 -3 :** Έλεγχος της προδιάθεσης ενός μονωτικού υλικού για τη δημιουργία ρεύματος ερπυσμού στην επιφάνεια του. Οι διαστάσεις είναι σε mm. Τα ηλεκτρόδια είναι από λευκόχρυσο.

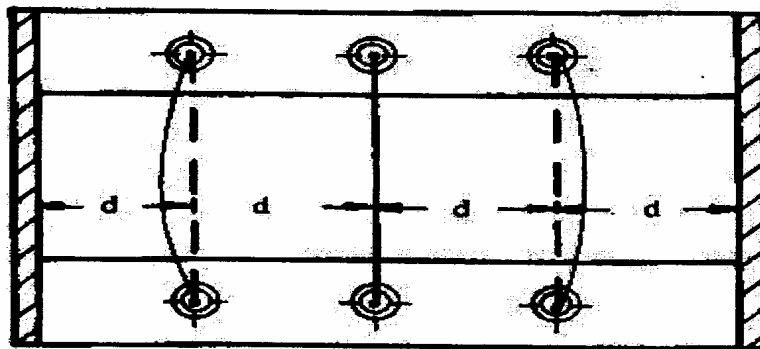
## 1.8 Μηχανική αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μηχανική αντοχή των μονωτικών υλικών, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που εξασκούνται σε αυτά (δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου και μηχανικές δυνάμεις). Εξαιτίας της αύξησης των τάσεων μεταφοράς και της εισαγωγής πολλαπλών αγωγών ανά φάση, τα μηχανικά φορτία που πρέπει να στηριχθούν από τους μονωτήρες εναέριων γραμμών υπερέβησαν το κατωφλικό επίπεδο των 40 τόνων, που προξενεί θραύση σε έναν απλό δίσκο πορσελάνης λογικού βάρους και όγκου. Για το λόγο αυτό αναζητήθηκαν νέα υλικά και σχήματα των μονωτήρων ώστε να καλύπτουν τόσο τις απαιτήσεις ηλεκτρικής μόνωσης όσο και τις μηχανικές από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από το βάρος των αγωγών.

Σε πολλές κατασκευές (πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, διακοπές υψηλών τάσεων) τα μονωτικά υλικά εξετάζονται και ως προς την μηχανική τους αντοχή σε δυνάμεις ηλεκτρικής προέλευσης, όπως αυτές αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια χειρισμών ή ενός βραχυκυκλώματος. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα.

Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα εξασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από τα μέσα προστασίας του δικτύου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η καταπόνηση που έχουν υποστεί οι ζυγοί ενός πίνακα μετά από τριφασικό βραχυκύκλωμα.



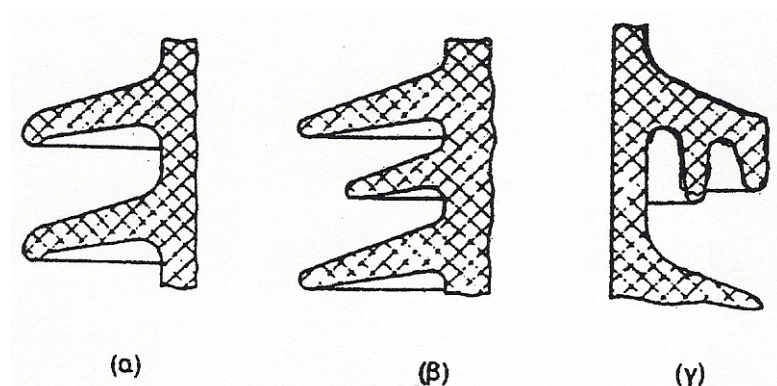
**Σχήμα 1.8-1 :** Παραμόρφωση των ζυγών ενός πίνακα κατά τη δοκιμή υπό τριφασικό βραχυκύκλωμα.

## 1.9 Γεωμετρική διάταξη μονωτήρων

Στην περίπτωση των στερεών μονωτικών και ειδικότερα για τους μονωτήρες εξωτερικής χρήσης δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην γεωμετρική μορφή τους. Η γεωμετρική μορφή του μονωτήρα και η πλευρική κατανομή είναι δυνατόν να διαφέρει κατά πολλούς τρόπους. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι μέγιστες ανεκτές επιφανειακές επικαθίσεις (ρύπανση) στην κάθε κατανομή, έχει αξιολογηθεί ένας μεγάλος αριθμός πλευρικών γεωμετριών. Οι γεωμετρίες αυτές ποικίλουν,



ξεκινώντας από τους τύπους αντοχής σε ομίχλη, που χαρακτηρίζονται από βαθιές αυλακώσεις στην κάτω πλευρά των πλευρικών προεξοχών, μέχρι τις περιπτώσεις με απλές προεξοχές χωρίς καμία αυλάκωση. Τυπικά σχήματα πλευρικών προεξοχών σε μονωτήρες φαίνονται στο σχήμα 1.9 -1.



**Σχήμα 1.9-1 :** Κατανομές τυπικών κεραμικών μονωτήρων με πλευρικές προεξοχές.

- α) Απλή προεξοχή
- β) Εναλλασσόμενη μικρή -μεγάλη προεξοχή
- γ) Προεξοχή προστασίας ομίχλης

Πειραματικές έρευνες έχουν αξιολογήσει τις διαφορετικές μορφές πλευρικών προεξοχών σε στερεούς μονωτήρες και έδειξαν μία καλή σχέση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών άλατος - ομίχλης και της επιδράσεως της φυσικής ρύπανσης που επέρχεται σε παράκτιες περιοχές. Επίσης, αξιολογούνται οι δυνατότητες αυτοκαθαρισμού των μονωτήρων και φαίνεται ότι στο θέμα αυτό υπερτερούν οι κατανομές απλών προεξοχών (χωρίς αυλακώσεις) λόγω της αεροδυναμικής τους γεωμετρίας. Έτσι, σε όλες σχεδόν τις ξηρές ερημικές τοποθεσίες με πολλή σκόνη χρησιμοποιούνται μονωτήρες αυτής της κατανομής. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών προεξοχών, η εναέρια ανάρτηση και ο λόγος του μήκους ερπυσμού προς το μήκος υπερπήδησης πρέπει να συνεξετασθούν με τη μηχανική αντοχή των πλευρικών προεξοχών προκειμένου να παραχθεί ένας μονωτήρας με ικανοποιητική απόδοση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΥΓΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ

- 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών
- 2.2 Το μονωτικό λάδι
- 2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών
- 2.4 Συντήρηση - επεξεργασία του μονωτικού λαδιού
- 2.5 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

## 2.1 Βασικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγάλη διηλεκτρική αντοχή συγκρινόμενα με τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση ( Πίνακας 1.2 -1). Έτσι ενώ η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm, η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού που χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές, είναι 60...200 kV/cm. Η σημασία των υγρών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη διότι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

α) Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας λόγω των απωλειών Joule. Στους μετασχηματιστές εφαρμόζεται συνήθως η κυκλοφορία μονωτικού ορυκτέλαιου ώστε να επιτυγχάνεται ψύξη των τυλιγμάτων .Πάντως η θερμότητα και οι εκκενώσεις προκαλούν αλλοιώσεις στο ορυκτέλαιο, που συνοδεύονται με την έκλυση αερίων , όπως το υδρογόνο και το μεθάνιο, τα οποία μπορεί να σχηματίσουν εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα.

β) Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών και επιπλέον οξειδώνει το υγρό μονωτικό. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.

## 2.2 Το μονωτικό λάδι

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο μονωτικό υγρό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται είτε ορυκτέλαια είτε συνθετικά μονωτικά λάδια ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Τα ζωικά έλαια δεν είναι κατάλληλα για ηλεκτρολογικές εφαρμογές διότι είτε είναι μεγάλου ιξώδους, είτε τείνουν να σχηματίσουν λιπαρά οξέα, τα οποία προσβάλλουν ινώδη υλικά , όπως το χαρτί. Αλλά και τα φυτικά έλαια (κυρίως ρητινώδη) δεν είναι κατάλληλα διότι παρουσιάζουν αστάθεια στην ποιότητά τους, και όπως συμβαίνει και με τα ζωικά έλαια, τείνουν να σχηματίσουν καταστροφικά λιπαρά οξέα. Κατάλληλα για ηλεκτροτεχνικούς σκοπούς είναι τα ορυκτέλαια, τα οποία προκύπτουν ως κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου, και η χημική τους σύσταση διαφέρει, ανάλογα με την προέλευση του πετρελαίου.

Για την αποφυγή των κινδύνων έκρηξης (από τη συγκέντρωση των αερίων προϊόντων της αλλοίωσης του ορυκτέλαιου) ή ανάφλεξης του λαδιού και των προϊόντων του, χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις συνθετικά μονωτικά λάδια που είναι αρκετά σταθερότερα στην επίδραση της θερμότητας και των εκκενώσεων .Συνήθως είναι χλωριωμένα παράγωγα του διφαινυλίου ( $C_6H_5-$   $C_6H_5$ ) και κυκλοφορούν στο εμπόριο με διάφορες ονομασίες, όπως Clophene, Aroclore, Askarel, Pyranol, Inerteen, Clorextol, Permitol, Afcolin κλπ. Τα μονωτικά αυτά έχουν διπλάσια ως τριπλάσια διηλεκτρική αντοχή συγκρινόμενα με το ορυκτέλαιο. Συνήθως χαρακτηρίζονται ως «άκαυστα έλαια» κάτι το οποίο δεν είναι απόλυτο. Η χρήση των χλωριωμένων υδρογονανθράκων τα τελευταία χρόνια τείνει να εξλειφθεί διότι περιέχουν τοξικές ουσίες οι οποίες είναι λίαν επικίνδυνες για το προσωπικό συντήρησης των διαφόρων ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον δεν έχει



καταστεί εφικτή η καταστροφή αυτών με μια διαδικασία ακίνδυνη για το προσωπικό και φιλική προς το περιβάλλον .

Μια άλλη κατηγορία μονωτικών υγρών είναι οι σιλικονούχοι υδρογονάνθρακες. Πρόκειται για υδρογονάνθρακες που περιέχουν πυρίτιο και χαρακτηρίζονται από υψηλό σημείο αναφλέξεως. Η εφαρμογή τους όμως είναι περιορισμένη λόγω του μεγάλου κόστους παραγωγής τους.

### **2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των υγρών μονωτικών υλικών**

Κατά την εκλογή ενός μονωτικού ελαίου σε μια ηλεκτροτεχνική εφαρμογή θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα κάτωθι χαρακτηριστικά :

#### **α) Ιξώδες**

Το ιξώδες προσδιορίζει την ικανότητα ψύξεως και μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας. Για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας σε έναν μετασχηματιστή, όπου υπάρχουν μικρά διάκενα μεταξύ των τυλιγμάτων του, είναι απαραίτητο το μονωτικό λάδι να χαρακτηρίζεται από χαμηλό ιξώδες, έτσι ώστε να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα.

#### **β) Μονωτική ικανότητα**

Σχεδόν όλα τα μονωτικά λάδια στο σύνολό τους είναι κάλοι μονωτές. Εντούτοις, σε μεγάλο βαθμό ενδιαφέρει η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου, λόγω της παρουσίας υγρασίας, η οποία θα πρέπει να αποφεύγεται αυστηρώς. Μια πολύ μικρή ποσότητα υγρασίας, εντός του ελαίου, μειώνει σε μεγάλο βαθμό την αξία του μονωτικού, ενώ η παρουσία σκόνης και μικρών ινών τείνει να δημιουργήσει οδούς μεγάλης αγωγιμότητας.

#### **γ) Σημείο αναφλέξεως**

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το μονωτικό έλαιο, θερμαινόμενο εντός ειδικής συσκευής (Pensky -Martens), αναδίδει ατμούς, σε ποσότητα τέτοια ώστε αναμειγνυόμενο με τον ατμοσφαιρικό αέρα να σχηματίζουν εύφλεκτο μίγμα και με την παρουσία σπινθήρα να αναφλέγονται αυτοστιγμεί. Για λόγους ασφαλείας και αξιοπιστίας του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού το σημείο αναφλέξεως θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο προς 130°C.

#### **δ) Σημείο καύσεως**

Είναι η θερμοκρασία στην οποία το έλαιο, θερμαινόμενο υπό κανονικές συνθήκες δοκιμής, αναδίδει ατμούς επάρκειας τέτοιας, ώστε να αναφλεγεί και να συνεχίσει καιγόμενο. Η θερμοκρασία αυτή είναι περίπου 25% υψηλότερα του σημείου αναφλέξεως.

#### **ε) Καθαρότητα**

Το έλαιο δεν πρέπει να περιλαμβάνει προσμίξεις όπως είναι το θείο και ενώσεις αυτού. Η παρουσία θείου προκαλεί διάβρωση των μεταλλικών τμημάτων και επιταχύνει την παραγωγή ιζήματος (λάσπης).

#### **στ) Σχηματισμός ιζήματος**

Η ευκολία με την οποία σχηματίζεται ίζημα αποτελεί μεγάλης σημασίας χαρακτηριστικό, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μετασχηματιστών . Πρόκειται για τον βραδύ σχηματισμό ημιστερεών υδρογονανθράκων, ενίοτε οξειδωμένης μορφής, οι οποίοι επικάθονται επί των τυλιγμάτων και των τοιχωμάτων του δοχείου του μετασχηματιστή. Ο σχηματισμός του ιζήματος συνδέεται άμεσα με

την θερμοκρασία και την οξείδωση του λαδιού. Το ίζημα σχηματιζόμενο, καθιστά το σύνολο του μετασχηματιστή θερμότερο, όσο δε αυξάνει η θερμοκρασία μεταβάλλει προς το χειρότερο την κατάσταση από απόψεως ιζήματος, έως ότου αποφραχθούν τελικώς οι σωληνώσεις ψύξεως και ο μετασχηματιστής καταστεί ακατάλληλος προς χρήση, λόγω υπερθέρμανσης. Η εμπειρία δείχνει ότι το ίζημα σχηματίζεται ταχύτερα εκεί που υπάρχουν στιλπνές επιφάνειες χαλκού.

#### ζ) Οξύτητα

Μεταξύ των παραγόμενων προϊόντων οξειδώσεως του λαδιού είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), πτητικά οργανικά και ανόργανα οξέα διαλυτά στο νερό και νερό. Τα παραπάνω προϊόντα σε συνδυασμό δύναται να προσβάλουν και να διαβρώσουν τα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν ειδικές διατάξεις που εμποδίζουν την είσοδο του υγρού αέρα στο δοχείο λαδιού και επιπλέον απομακρύνουν τα ανεπιθύμητα προϊόντα οξείδωσης.

#### η) Δυνατότητα εμπλουτισμού του ελαίου

Η αλλοίωση του ελαίου κατά τη διάρκεια της χρησιμοποίησής του είναι δυνατόν να επιβραδυνθεί με εμπλουτισμό του, κατά την κατεργασία του, με αντιοξειδωτικά μέσα (oxidation inhibitors). Τα αντιοξειδωτικά αυτά, τα οποία συνήθως είναι τύπου φαινόλης ή αμίνης, μετατρέπουν τα εις το έλαιο σχηματισμένα μοριακά συγκροτήματα σε αδρανή μόρια, καταναλισκόμενα βαθμιαία κατά τη λειτουργία. Οι αντιοξειδωτικές ουσίες εμπλουτισμού αυξάνουν σημαντικά την διάρκεια χρησιμοποίησής του ελαίου, αφού ο σχηματισμός οξέων και ιζήματος είναι κατ' ουσία μηδενικός.

**Πίνακας 2.3 -1 :** Τεχνικές ιδιότητες ορισμένων υγρών μονωτικών υλικών

	Πυκνότητα gr/cm <sup>3</sup>	Ειδική αντίσταση Ω cm	Διηλεκτρική αντοχή KV/cm	Διηλεκτρική σταθερά	Συντελεστής απώλειών	Σημείο ανάφλεξης °C	Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία
Ορυκτέλαιο	<0,89	10 <sup>14</sup>	110	2,2	10 <sup>-3</sup>	130	90 °C
Βαζελίνη (>55°C)	0,90	10 <sup>15</sup>	300	2,2	10 <sup>-4</sup>	130	90 °C
Πολυισοβουτυλένιο	0,85	10 <sup>14</sup>	150	2,2	10 <sup>-3</sup>	200	85 °C
Έλαιο σιλικόνης	0,96	10 <sup>15</sup>	100	2,8	10 <sup>-4</sup>	300	150 °C

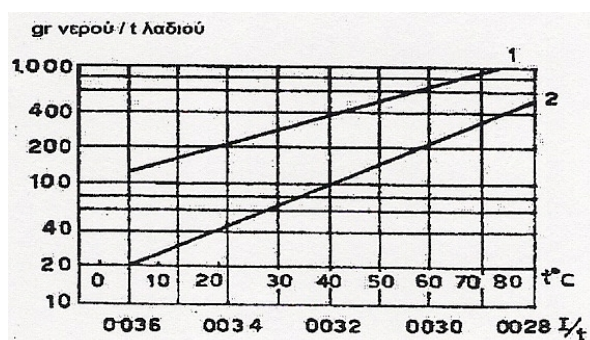
## 2.4 Συντήρηση-επεξεργασία του μονωτικού λαδιού

Η εξέλιξη των μετασχηματιστών σε ολοένα και μεγαλύτερες τάσεις λειτουργίας και παροχής ισχύος έχει δημιουργήσει την ανάγκη να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην κατάλληλη συντήρηση και επεξεργασία του μονωτικού λαδιού, έτσι ώστε να διατηρεί τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά καλής λειτουργίας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του λαδιού είναι αρκετοί και σε πολλές περιπτώσεις ενδέχεται να οδηγήσουν στην αχρηστία ακριβές ηλεκτροτεχνικές κατασκευές. Η παρουσία νερού μειώνει την μονωτική ικανότητα του λαδιού και επιπλέον συμβάλει στην οξείδωση των επιμέρους τμημάτων της διάταξης.

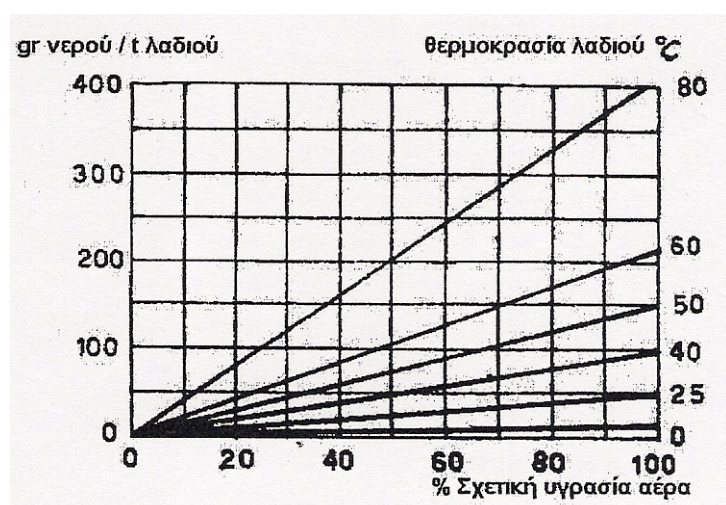
Μονωτικό λάδι, εκτεθειμένο στον αέρα, απορροφά υγρασία, το δε ποσοστό αυτής εξαρτάται από διάφορους παραμέτρους όπως είναι ο τύπος του λαδιού και η θερμοκρασία.

Ένα καλώς διυλισμένο ή φτωχό σε αρωματικούς υδρογονάνθρακες λάδι, είναι δυνατόν να απορροφήσει, σε θερμοκρασία 20 °C , μέχρι 40gr H<sub>2</sub>O/t<sub>λαδιού</sub>, ενώ λάδι που περιέχει αρωματικούς υδρογονάνθρακες έως 240gr H<sub>2</sub>O/t<sub>λαδιού</sub>. Οι οριακές αυτές τιμές αντιστοιχούν σε λάδι σε επαφή με αέρα 100% κεκορεσμένο σε υγρασία επί μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης το νερό δύναται να εμφανισθεί εντός του λαδιού και ως προϊόν οξειδώσεως.



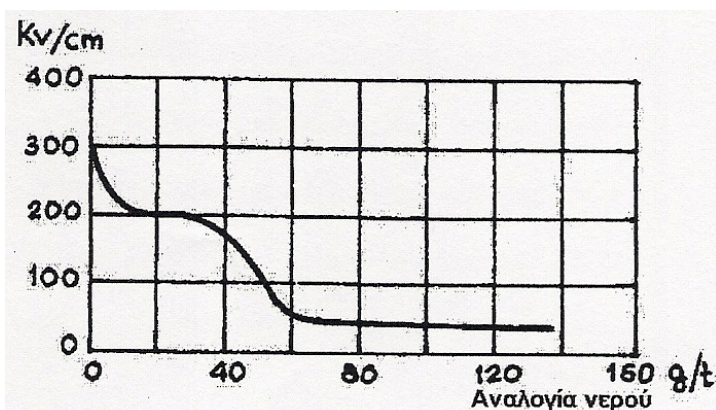
1: λάδι με αρωματικούς υδρογονάνθρακες      2: λάδι μετασχηματιστών

**Σχήμα 2.4 -1 :** Μέγιστη διαλυτότητα του νερού στο μονωτικό λάδι συναρτήσει της θερμοκρασίας του ελαίου .



**Σχήμα 2.4 -2 :** Περιεκτικότητα νερού σε μονωτικό λάδι μετασχηματιστή συναρτήσει της % σχετικής υγρασίας του αέρα

Το νερό με όποια μορφή (διαλυμένο ή διεσπαρμένο κατά περιοχές) και εάν εμφανισθεί εντός του λαδιού, επιδρά καθοριστικά στη μονωτική ικανότητα του λαδιού και παράλληλα συμμετέχει ενεργά στη διαδικασία γήρανσης της μόνωσης. Είναι γεγονός ότι το χαρτί, που περιβάλλει τα τυλίγματα ενός μετασχηματιστή καταστρέφεται σταδιακά από την παρουσία νερού στο μονωτικό λάδι. Με την πάροδο του χρόνου και εφόσον δεν ληφθεί μέριμνα για την ξήρανση του λαδιού εκδηλώνονται διασπάσεις μεταξύ των ελιγμάτων , επιταχύνοντας την απαξίωση της μόνωσης και της ηλεκτρολογικής διάταξης γενικότερα.



**Σχήμα 2.4 -3 :** Τάση διάσπασης ορυκτού ελαίου συναρτήσει της περιεκτικότητας σε νερό ( $\text{gr H}_2\text{O/t}_{\text{λαδιού}}$ )

Προκειμένου να διατηρηθεί η μονωτική ικανότητα του λαδιού σε ικανοποιητικά επίπεδα κατά περίπτωση, κρίνεται αναγκαίος ο περιοδικός έλεγχος αυτού, έτσι ώστε να αποφευχθούν ατυχήματα και καταστροφή του εξοπλισμού. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί στο μονωτικό λάδι υπάρχουν προσμίξεις, αέρας, υγρασία ή μικροσωματίδια τότε είναι δυνατή η συμβατική αναγέννηση του λαδιού. Με τον όρο συμβατική αναγέννηση εννοούμε τον μηχανικό καθαρισμό του λαδιού με διύλιση, την αφυδάτωση (ξήρανση) σε κενό, την απαέρωση σε δοχείο κενού.

Κατά τη διύλιση απομακρύνονται προϊόντα γήρανσης, τα οποία εμφανίζονται υπό μορφή ιζήματος, ίνες μονωτικών υλικών και νερό. Κατά κανόνα το μονωτικό λάδι θα πρέπει να διυλίζεται εντελώς ψυχρό διότι ορισμένα προϊόντα γήρανσης και το νερό διαλύονται εύκολα στο θερμό λάδι.

Η αφυδάτωση υπό κενό και η απαέρωση λαμβάνουν χώρα σε ειδικές συσκευές κενού, έτσι ώστε να αποκλειστεί η πιθανότητα επαφής του λαδιού με τον αέρα και διάφορα σωματίδια.

## 2.5 Μέσα ελέγχου της μονωτικής ικανότητας του λαδιού κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών

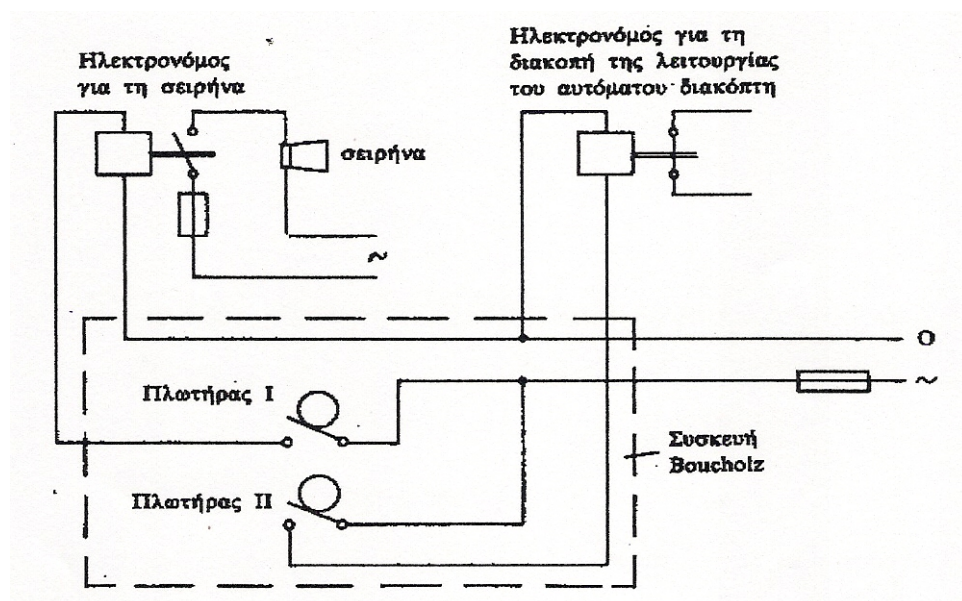
Η υγρασία και τα αέρια, που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για την αποφυγή βλαβών και ατυχημάτων προβλέπονται μέσα ελέγχου που προειδοποιούν, κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή, για την μείωση της μονωτικής ικανότητας του λαδιού. Προβλέπεται επίσης, προστασία του μετασχηματιστή, όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και τη συσκευή Boucholz, που πρέπει να περιλαμβάνει κάθε μετασχηματιστής.

Ο αφυγραντήρας τοποθετείται στο δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή και περιέχει στο εσωτερικό του siticagel. Πρόκειται για υλικό το οποίο έχει την ικανότητα να απορροφά την υγρασία και παράλληλα να αλλάζει το χρώμα του από γαλάζιο σε κόκκινο ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που αυτό περιέχει. Παρακολουθώντας το χρώμα του siticagel στον αφυγραντήρα μπορούμε να διαπιστώσουμε την κατάσταση του μονωτικού λαδιού. Στην περίπτωση που διαπιστωθεί ότι το siticagel έχει κόκκινο χρώμα τότε αυτό σημαίνει ότι είναι κορεσμένο από υγρασία και το λάδι του μετασχηματιστή θα πρέπει να υποβληθεί σε ξήρανση για την απομάκρυνση της υγρασίας. Η διαδικασία της ξήρανσης του

μονωτικού λαδιού καθορίζεται από διεθνείς κανονισμούς, και περιλαμβάνει την θέρμανση του λαδιού για 3 ως 6 ώρες σε θερμοκρασία περίπου 140 °C .

Η αρχή λειτουργίας της συσκευής Boucholz (Σχήμα 2.5 -1) βασίζεται στα αέρια που παράγονται κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού. Τα παραγόμενα αέρια διέρχονται από τη συσκευή Boucholz, η οποία έχει δύο πλωτήρες I και II. Όταν ο χώρος του Boucholz καταλαμβάνεται μόνο από λάδι, τότε οι πλωτήρες αυτοί είναι δύο ανοιχτές επαφές. Κατά τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού τα παραγόμενα αέρια εισχωρούν στο χώρο όπου βρίσκονται οι πλωτήρες.

Όταν το ποσοστό τους είναι μικρό τότε κλείνει ο πλωτήρας I και ενεργοποιείται έτσι το κύκλωμα της σειρήνας. Για μεγαλύτερο ποσοστό των αερίων κλείνει και ο πλωτήρας II, με αποτέλεσμα να τεθεί εκτός λειτουργίας ο αυτόματος διακόπτης. Η συσκευή Boucholz διαθέτει χειροκίνητη βαλβίδα εξερισμού, η οποία είναι απαραίτητη κατά την πρώτη εγκατάσταση ή μετά την αντικατάσταση του λαδιού. Με λήψη δείγματος των παραγόμενων αερίων από τη συσκευή Boucholz και χημική ανάλυση αυτών , μπορεί να εκτιμηθεί η κατάσταση του μονωτικού λαδιού και του μετασχηματιστή γενικότερα.



Σχήμα 2.5 -1 : Αρχή λειτουργίας της προστασίας Boucholz





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΑΕΡΙΑ

- 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά μονωτικών αερίων
- 3.2 Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στα αέρια μονωτικά
- 3.3 Ο ιονισμός των ηλεκτρομονωτικών αερίων
- 3.4 Ιονισμός με κρούσεις
- 3.5 Φωτοϊονισμός
- 3.6 Θερμοεκπομπή
- 3.7 Το φαινόμενο της χιονοστιβάδας ηλεκτρονίων
- 3.8 Ενέργεια ιονισμού-συνθήκη ιονισμού με κρούσεις
- 3.9 Η θεωρία Townsend για την ηλεκτρική διάσπαση
- 3.10 Κριτήρια για την ηλεκτρική εκκένωση Townsend
- 3.11 Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων χωρίς τον μηχανισμό ανασύνδεσης
- 3.12 Χιονοστιβάδα με μηχανισμό ανασύνδεσης
- 3.13 Ο νόμος του Paschen
- 3.14 Αποκλίσεις από τον νόμο του Paschen
- 3.15 Η σημασία της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον ιονισμό
- 3.16 Απόδοση λειτουργίας αερίων μονωτικών υπό συνθήκες ρύπανσης
- 3.17 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά
- 3.18 Το κενό ως αέριο μονωτικό

### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά μονωτικών αερίων

Από τα χιλιάδες χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών μεταφοράς γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελεί το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μονωτικό από την κατηγορία των αερίων μονωτικών υλικών. Αποτελεί επίσης την μόνωση πολλών ηλεκτροτεχνικών διατάξεων όπως είναι οι αποζεύκτες, διακόπτες φορτίου, πίνακες μέσης τάσης κλπ. Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21 kV/cm, σύμφωνα με τον Πίνακα 1.2 -1, ενώ η διηλεκτρική σταθερά είναι περίπου ίση με τη μονάδα και πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ίση με εκείνη του κενού.

Βασικό χαρακτηριστικό των περισσότερων μονωτικών αερίων είναι το γεγονός ότι η διηλεκτρική τους συμπεριφορά επανέρχεται, μετά την εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου οφειλόμενο σε διάσπαση ή σε χειρισμούς υπό τάση, σε υψηλά επίπεδα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (από 1-5  $\mu$ s). Αντίθετα στα στερεά μονωτικά υλικά η διάσπαση δημιουργεί τις περισσότερες φορές μόνιμες βλάβες, οι οποίες με τη σειρά τους επιταχύνουν τη διαδικασία γήρανσης της μόνωσης.

Οι μονωτικές ιδιότητες των αερίων μονωτικών υλικών επηρεάζονται από την πίεση, στην οποία βρίσκονται, και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Σημαντική μείωση στην διηλεκτρική αντοχή των αερίων μονωτικών προκαλούν τα μικροσωματίδια, η υγρασία και οι διάφορες αστοχίες στα στερεά μονωτικά με τα οποία συνεργάζονται, σε μία ηλεκτρολογική εφαρμογή.

Ο αέρας έχει συγκριτικά με άλλα μονωτικά υλικά, χαμηλή διηλεκτρική αντοχή και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλα διάκενα αέρος για να αποφευχθούν οι διασπάσεις, πράγμα που γίνεται ιδιαίτερα αντιληπτό στις εφαρμογές υψηλής τάσης. Ωστόσο τα τελευταία 30 χρόνια έχουν γίνει αρκετές έρευνες με σκοπό την ανάπτυξη αερίων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο από αυτά είναι το ξηρό εξαφθοριούχο θείο SF<sub>6</sub>, του οποίου η διηλεκτρική αντοχή σε πίεση μίας ατμόσφαιρας είναι δύο φορές καλύτερη από αυτή του αέρα ενώ παράλληλα διαθέτει άριστη χαρακτηριστική θερμικής καταπόνησης και δυνατότητα σβέσης των ηλεκτρικών τόξων. Δυαδικά μίγματα του SF<sub>6</sub> με φθηνά αέρια συστατικά όπως N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>O βρίσκονται κάτω από συνεχή έρευνα προκειμένου να κατασκευασθούν αποτελεσματικά και οικονομικά μονωτικά, αλλά και να κατανοηθούν καλύτερα οι διαδικασίες που αφορούν τη λειτουργία των αερίων διηλεκτρικών. Το μοναδικό μίγμα που βρίσκεται εμπορική εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος είναι το μίγμα SF<sub>6</sub> και N<sub>2</sub>.

### 3.2 Κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στα αέρια μονωτικά

Όταν ένας ελεύθερος ηλεκτρικός φορέας με φορτίο  $q$  και μάζα ηρεμίας  $m_0$  κινείται ανεμπόδιστα (όπως περίπου ισχύει για το κενό) με ταχύτητα  $v < 0,2c$  (όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός), υπό την επίδραση ενός ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου, τότε αποκτά επιτάχυνση :

$$\ddot{x} = \frac{F}{m_0} = \frac{qE}{m_0} \quad (3.2-1)$$

Η κινητική ενέργεια του φορέα για μία διαδρομή  $\chi$  με διαφορά δυναμικού  $\Delta\phi$  (μεταξύ τέλους και αρχής της διαδρομής) είναι :



$$W_k = q \int E dx = \frac{m_0 v^2}{2} = q \Delta \phi \quad (3.2-2)$$

όπου  $v$  η ταχύτητα στο τέλος της διαδρομής. Έτσι η ταχύτητα στο τέλος της διαδρομής μπορεί να γραφτεί :

$$v = \sqrt{\frac{2q_e \Delta \phi}{m_0}} \quad (3.2-3)$$

όπου  $m_0 = 9,1 \times 10^{-31}$  kg και  $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$  As. Έτσι η ταχύτητα θα είναι :

$$v = 600 \sqrt{\Delta \phi} \text{ σε cm/s} \quad (3.2-4)$$

όπου  $\Delta \phi$  σε Volt. Για ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου  $v = 0,2c$  θα είναι  $\Delta \phi = 10,25$  kV.

Όταν η ταχύτητα κίνησης του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα είναι μεγαλύτερη από  $0,2c$ , τότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεταβολή της μάζας, σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς Lorentz.

$$m = m_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (3.2-5)$$

Στην περίπτωση αυτή η κινητική ενέργεια και η ταχύτητα θα είναι αντίστοιχα :

$$W_k = q_e \sqrt{\Delta \phi} \quad (3.2-6)$$

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{q_e \Delta \phi}{m_0 c} + 1\right)^2}} \quad (3.2-7)$$

Στους προηγούμενους υπολογισμούς θεωρήθηκε, ότι οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς κινούνται ανεμπόδιστα, σαν να πρόκειται για κίνηση στο κενό. Σε ένα ηλεκτρομονωτικό αέριο οι κινήσεις των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων περιορίζονται, λόγω των κρούσεων με άλλα μόρια του αερίου. Για τη μαθηματική προσέγγιση της κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, γίνεται η υπόθεση ότι η ταχύτητά τους (υπό την επίδραση του ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου) είναι πολύ μεγάλη συγκρινόμενη με εκείνη της θερμικής κίνησης των μορίων του αερίου, και ότι οι κρούσεις είναι ανελαστικές.

Μία κρούση ηλεκτρονίου -μορίου χαρακτηρίζεται ως "ελαστική" όταν παρατηρείται κυρίως μεταβολή στη διεύθυνση και όχι μεταβολή στην ταχύτητα του ελεύθερου ηλεκτρονίου, δηλαδή η κινητική ενέργεια παραμένει πρακτικά αμετάβλητη. Αντίθετα η "ανελαστική" κρούση προϋποθέτει κυρίως μεταβολή στην ενέργεια του ελεύθερου ηλεκτρονίου.

Με τις προϋποθέσεις αυτές ένας ελεύθερος ηλεκτρικός φορέας συγκρούεται διαδοχικά (κατά την εξαναγκασμένη ευθύγραμμη κίνησή του από το πεδίο), με μόρια

του αερίου, τα οποία απέχουν μεταξύ τους τυχαίες αποστάσεις. Ως μέσο ελεύθερο μήκος ( $\lambda$ ) του παραπάνω ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα για κίνηση του σε απόσταση  $x$ , έχει οριστεί το πηλίκο :

$$\lambda = \frac{x}{z} \quad (3.2-8)$$

όπου  $Z$  ο αριθμός των κρούσεων .

Συμβολίζοντας με  $r$  και  $R$  τις ακτίνες αντίστοιχα του ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα και του μορίου, ο όγκος στον οποίο συμβαίνουν οι  $Z$  κρούσεις είναι :

$$V = \pi (r + R)^2 x \quad (3.2-9)$$

Για  $N$  μόρια στον όγκο  $V$ , τα οποία συγκρούστηκαν με τον ελεύθερο ηλεκτρικό φορέα, ο αριθμός των κρούσεων  $z$  είναι :

$$z = NV = N \pi (r + R)^2 x \quad (3.2-10)$$

Από τις σχέσεις 3.2 -8 και 3.2 -10 έπεται ότι :

$$\lambda = \frac{1}{N \pi (r + R)^2 x} \quad (3.2-11)$$

Επειδή η ακτίνα του ηλεκτρονίου είναι  $r = 1,87 \times 10^{-13}$  cm και του μορίου  $R \approx 0,1 \dots 0,2 \times 10^{-7}$  cm, το μέσο μήκος ( $\lambda$ ) για το ηλεκτρόνιο θα είναι :

$$\lambda_e = \frac{1}{N \pi R^2} \quad (3.2-12)$$

Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες (πίεση  $p=1,013$  bar και θερμοκρασία  $\theta=200^\circ\text{C}$ ) είναι  $\lambda_e = 0,57 \mu\text{m}$ .

Στην περίπτωση ιόντος έχουμε  $r \approx R$ , οπότε το μέσο ελεύθερο μήκος είναι :

$$\lambda_i = \frac{1}{4 N \pi R^2} = \lambda_e / 4 \quad (3.2-13)$$

### 3.3 Ο ιονισμός των ηλεκτρομονωτικών αερίων

Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε μία περιοχή που παρεμβάλλεται κάποιο αέριο, συνήθως δεν εμφανίζει ροή ηλεκτρικού ρεύματος εκτός από την περίπτωση που προϋπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρικά φορτία. Όταν η ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι ασθενής, η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος οφείλεται εξ ολοκλήρου σε φορτισμένα σωματίδια τα οποία έχουν δημιουργηθεί από εξωγενείς παράγοντες (υπάρχουσα και κοσμική ακτινοβολία), και είναι ένα μικρό ποσοστό του  $\mu\text{A}$ . Κατά τη εφαρμογή ισχυρότερων ηλεκτρικών πεδίων λαμβάνουν χώρα ανελαστικές κρούσεις μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των μορίων του αερίου, οι οποίες προκαλούν μεταβολές της ενεργειακής κατανομής των δεσμευμένων ηλεκτρονίων στα μόρια. Μερικές φορές από αυτές τις ανελαστικές

κρούσεις παράγονται πρόσθετα φορτισμένα σωματίδια τα οποία προσδίδουν στο αέριο υψηλή αγωγιμότητα.

Στην περίπτωση της διέγερσης ένα ηλεκτρόνιο, που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από το μόριο, μεταφέρεται προς υψηλότερες ενεργειακές στάθμες από αυτές που καταλαμβάνει όταν το μόριο βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση. Η διεγερμένη κατάσταση των μορίων δεν είναι ευσταθής και έτσι η διέγερση ακολουθείται πάντα από μια άλλη διεργασία, η οποία αποδίδει την πλεονάζουσα ενέργεια που κατέχει το διεγερμένο μόριο. Συχνά τα διεγερμένα μόρια χάνουν την περίσσια της ενέργειας εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Η διαδικασία αυτή μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



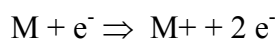
Όπου  $e^-$  και  $M$  αντιπροσωπεύουν το ηλεκτρόνιο και το μόριο αντίστοιχα που συγκρούονται,  $M^*$  αντιπροσωπεύει το διεγερμένο μόριο και  $h\nu$  το εκπεμπόμενο φωτόνιο συχνότητας  $\nu$  και ενέργειας  $h\nu$ , όπου  $h$  η σταθερά του Planck. Ο χρόνος ζωής μιας διεγερμένης κατάστασης είναι συνήθως της τάξης του  $10^{-8}$  s ή μικρότερος, αλλά μερικά μόρια αέριων υπάρχουν και στις μετασταθείς καταστάσεις, οι οποίες έχουν χρόνο ζωής περίπου  $10^{-2}$  s.

Η δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από κρούσεις, μπορεί να συμβεί, όταν η προσδιδόμενη από τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς (που κινούνται, υπό την επίδραση του πεδίου, εντός του ηλεκτρομονωτικού αερίου) ενέργεια είναι αρκετή, ώστε τα ηλεκτρόνια των ατόμων ή των μορίων του αερίου να βρεθούν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Για την εκδήλωση του φαινομένου αυτού (που είναι γνωστό ως ιονισμός με κρούσεις) είναι φανερό ότι απαιτείται μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από εκείνη για τις διεργασίες διέγερσης.

Η δημιουργία γενικά ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στα ηλεκτρομονωτικά αέρια ονομάζεται ιονισμός. Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις ιονισμού : τον ιονισμό με κρούσεις, τον φωτοϊονισμό και την θερμοεκπομπή (ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου).

### 3.4 Ιονισμός με κρούσεις

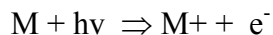
Όταν το προσπίπτον ηλεκτρόνιο διαθέτει κινητική ενέργεια τουλάχιστον ίση με την ενέργεια ιονισμού του μορίου με το οποίο συγκρούεται, τότε το μόριο είναι δυνατόν να ιονιστεί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να παρασταθεί ως εξής :



Το θετικό ιόν μπορεί να εμφανισθεί αρχικά σε διεγερμένη κατάσταση και στη συνέχεια, μετά την εκπομπή φωτονίου, να μεταπέσει στη θεμελιώδη του κατάσταση. Αν το αέριο δεν είναι μονατομικό μπορεί να συμβεί θραύση κατά τη διαδικασία της κρούσης, οπότε ένα ή και περισσότερα από τα παραγόμενα προϊόντα (θραύσματα) μπορεί να παρουσιαστεί σε διεγερμένη κατάσταση. Σε οποιαδήποτε πάντως περίπτωση ένα ακόμα ελεύθερο ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται προς το αέριο μέσο.

### 3.5 Φωτοϊονισμός

Όταν ένα φωτόνιο έχει ενέργεια  $h\nu$  τουλάχιστον ίση με την ενέργεια ιονισμού ενός μορίου του αερίου τότε είναι δυνατόν να προκληθεί ιονισμός του μορίου σύμφωνα με τη σχέση:



Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα αισθητό κατά την εφαρμογή ισχυρής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε αέρια (ή άλλα μονωτικά) και είναι γνωστό ως "αγωγιμότητα επαγόμενη δι' ακτινοβολίας" (Radiation induced conductivity). Από μετρήσεις είναι γνωστό, ότι στον αέρα αναπαράγονται το δευτερόλεπτο λόγω κοσμικής ακτινοβολίας και φυσικής ραδιενέργειας περίπου 5...20 ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά  $\text{cm}^3$ .

### 3.6 Θερμοεκπομπή

Η άνοδος των ηλεκτρονίων σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες σημαίνει ότι αυξάνεται η κινητική τους ενέργεια, δηλαδή η ζωνρότητα περιφοράς τους στο κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου. Όταν η ενέργειά τους ξεπεράσει ένα όριο, τα ηλεκτρόνια είναι σε θέση να εγκαταλείψουν το κρυσταλλικό πλέγμα και να βγουν στο κενό. Η διαφορά της ενέργειας, πάνω από τη στάθμη Fermi, που απαιτείται για την πραγματοποίηση αυτής της ηλεκτρονικής εξόδου από το στερεό ονομάζεται έργο εξόδου ή έργο εξαγωγής και συμβολίζεται με το γράμμα " $\phi$ ". Έτσι, όταν τα μέταλλα βρεθούν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, εκπέμπουν από την επιφάνειά τους έναν σημαντικό αριθμό ηλεκτρονίων (θερμιονικό ρεύμα). Η ένταση της θερμιονικής εκπομπής δίνεται από την εξίσωση Richardson -Dushman:

$$J = A T^2 e^{-\phi/kT} \quad (3.6-1)$$

όπου  $J$  είναι η πυκνότητα του θερμιονικού ρεύματος ανά μονάδα επιφάνειας του μετάλλου και  $A$  μία σταθερά χαρακτηριστική για το μέταλλο.

Η εκπομπή ελεύθερων ηλεκτρονίων από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια αποτελεί μια ανεπιθύμητη διαδικασία για τις κατασκευές όπου υπάρχει συνεργαζόμενο μονωτικό αέριο. Για τον λόγο αυτό επιλέγονται μέταλλα με μεγάλο έργο εξόδου και ταυτόχρονα εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές για την γρήγορη σβέση του ηλεκτρικού τόξου, ώστε να αποφευχθούν οι υψηλές θερμοκρασίες σε αυτά.

### 3.7 Το φαινόμενο της χιονοστιβάδας ηλεκτρονίων

Υποθέτουμε ότι ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται με τη βοήθεια κάποιας εξωτερικής επίδρασης (υπάρχουσα ακτινοβολία ή κοσμική ακτινοβολία) προς ένα αέριο μέσο στο οποίο εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο. Εάν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αρκετά ισχυρή και το ελεύθερο ηλεκτρόνιο δεν παγιδευτεί από κάποιο μόριο με το φαινόμενο της ανασύνδεσης, τότε είναι πιθανό το ελεύθερο ηλεκτρόνιο να προκαλέσει ιονισμό με κρούση σε κάποιο από τα μόρια του αερίου. Το αποτέλεσμα θα είναι να παραχθούν δύο ελεύθερα ηλεκτρόνια και ένα θετικό ιόν. Τα δύο αυτά ηλεκτρόνια, με τη σειρά τους, είναι ικανά να ιονίσουν με κρούσεις και άλλα μόρια του αερίου δημιουργώντας έτσι συνολικά τέσσερα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τρία θετικά ιόντα. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και ο αριθμός

των ελεύθερων ηλεκτρονίων αυξάνει καθώς αυτά κινούνται κάτω από την επίδραση του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, με κατεύθυνση προς την άνοδο. Η συσσώρευση των ηλεκτρονίων και των θετικών ιόντων που δημιουργούνται με τον παραπάνω τρόπο καλείται φαινόμενο χιονοστιβάδας και αποτελεί την φυσική κατάληξη της διαδικασίας ιονισμού με κρούσεις. Σε ένα διάστημα λίγων χιλιοστών του δευτερολέπτου το φαινόμενο της χιονοστιβάδας είναι ικανό να οδηγήσει στην εμφάνιση εκατομμυρίων ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αρκεί να τονιστεί ότι οι τυπικές συγκεντρώσεις ελεύθερων ηλεκτρονίων σε μονωτές, ημιαγωγούς και μέταλλα είναι περίπου αντίστοιχα ίσες προς  $10^8 \text{ e/m}^3$ ,  $10^{18} \text{ e/m}^3$  και  $10^{28} \text{ e/m}^3$ .

Η εμφάνιση χιονοστιβάδας ηλεκτρονίων αποτελεί πρωταρχικό γεγονός της απώλειας της μονωτικής ικανότητας του αερίου μέσου. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται και εντείνεται έως ότου τα ηλεκτρόνια, είτε φθάσουν στο θετικό ηλεκτρόδιο είτε εισέλθουν σε άλλη περιοχή του χώρου, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν είναι τόσο υψηλή, οπότε προξενούν και εκεί το φαινόμενο του ιονισμού με κρούσεις, με συνέπεια ο όγκος του πλάσματος να επεκτείνεται και σε άλλες περιοχές. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των ιόντων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια του φαινομένου, διαφέρει από μία εκδήλωση σε μία άλλη. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η φύση της διεξαγωγής των κρούσεων είναι τυχαία. Λόγω της στατιστικής φύσεως του φαινομένου, το κάθε εξωτερικά δημιουργούμενο ηλεκτρόνιο δεν έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση.

### 3.8 Ενέργεια ιονισμού-συνθήκη ιονισμού με κρούσεις

Η ενέργεια που πρέπει να προσφερθεί σε ένα άτομο αερίου για να συμβεί ιονισμός ονομάζεται ενέργεια ιονισμού  $W_i$ . Ο ιονισμός ενός ατόμου μπορεί να θεωρηθεί ως επιδίωξη του ηλεκτρονίου να απομακρυνθεί σε απόσταση  $\Gamma$  από τον μητρικό του πυρήνα. Έτσι, για το ηλεκτρόνιο εντός του, κατά προσέγγιση, σφαιρικού πεδίου του πυρήνα ισχύει :

$$W_i = \int_{r_i}^{\infty} \vec{F} d\vec{r} = q_e \int_{r_i}^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = q_e U_i \quad (3.8-1)$$

όπου  $U_i$  η τάση ιονισμού.

Για την πεδιακή ένταση  $E$  σε απόσταση  $r$  από το κέντρο του πυρήνα έχουμε :

$$E = E_\pi \left( \frac{r_\pi}{r} \right)^2 \quad (3.8-2)$$

όπου  $E_\pi$  η πεδιακή ένταση στην επιφάνεια του πυρήνα για την οποία ισχύει :

$$E_\pi = \frac{q_e}{4\pi r_\pi^2 \epsilon_0} \quad (3.8-3)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις για την ενέργεια ιονισμού θα έχουμε:

$$W_i = q_e E_\pi r_\pi^2 \int_{r_\pi}^{\infty} \frac{dr}{r} = \frac{q_e E_\pi r_\pi^2}{r_\tau} = \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 r_\tau} \quad (3.8-4)$$

Με  $\epsilon_0 = 8,854 \text{ pF/m}$  και  $r_\tau = 0,1 \text{ nm}$  θα είναι  $W_i \approx 14,38 \text{ eV}$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω για να συμβεί ιονισμός με κρούσεις ενός ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα επί ενός ατόμου ηλεκτρομονωτικού αερίου, θα πρέπει :

$$W_k = q \Delta\phi = q E \lambda \geq W_i \Rightarrow E \lambda \geq U_i \quad (3.8-5)$$

η τελευταία ανισότητα είναι γνωστή ως "συνθήκη ιονισμού".

### 3.9 Η θεωρία Townsend για την ηλεκτρική διάσπαση

Κατά την ηλεκτρική διάσπαση με τον μηχανισμό Townsend η πρώτη χιονοστιβάδα των ηλεκτρονίων ενεργοποιείται συνήθως από κάποιο εξωτερικό παράγοντα, όπως π.χ. προϋπάρχουσα ακτινοβολία η οποία έχει εισάγει ένα σχετικά μικρό αριθμό ελεύθερων ηλεκτρονίων στον όγκο του αερίου μονωτικού. Οι διαδοχικοί ιονισμοί που προξενούνται από αυτή την χιονοστιβάδα ενεργοποιούν μία ή περισσότερες χιονοστιβάδες που ονομάζονται δευτερεύουσες, και οι οποίες με τη σειρά τους ενεργοποιούν άλλες δευτερεύουσες χιονοστιβάδες. Μία συνεχής αλυσίδα από χιονοστιβάδες δημιουργεί μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση (ηλεκτρικό τόξο).

Τα αρχικά ηλεκτρόνια που ενεργοποιούν τις δευτερεύουσες χιονοστιβάδες είναι δυνατόν να δημιουργηθούν από πολλές διαφορετικές αιτίες. Για παράδειγμα, μπορούν να δημιουργηθούν στην κάθοδο από προσκρούσεις θετικών ιόντων ή φωτονίων ή τέλος από προσκρούσεις μορίων που βρίσκονται σε μετασταθή κατάσταση και τα οποία έχουν ικανοποιητικά μεγάλο χρόνο ζωής και διαχέονται προς την κάθοδο πριν επανέλθουν στη θεμελιώδη τους κατάσταση. Λόγω της στατιστικής φύσεως του φαινομένου, το κάθε εξωτερικά δημιουργούμενο ηλεκτρόνιο δεν έχει την δυνατότητα να ενεργοποιήσει μία αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση. Όταν όμως το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο παραμένει αρκετά ισχυρό (δηλαδή  $0,1 \text{ MV/cm}$ ) η έναρξη μιας αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι πλέον καθαρά θέμα χρόνου.

Σαν αποτέλεσμα του γρήγορου και επαναλαμβανόμενου φαινομένου της χιονοστιβάδας ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων αυξάνει με το χρόνο και η περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου ελέγχεται από το "χωρικό πεδίο", το οποίο ανά πάσα στιγμή καθορίζεται από τη συγκεκριμένη θέση που καταλαμβάνουν τα φορτισμένα σωματίδια μέσα στον όγκο του αερίου μονωτικού. Για ένα αρχικά ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, η εισαγωγή των ευκίνητων ηλεκτρικών φορτίων συνήθως καταλήγει σε μία ασταθή κατάσταση όπου το ρεύμα αυξάνει πολύ γρήγορα ενώ η εφαρμοζόμενη τάση σταδιακά καταρρέει (αρνητική διαφορική αντίσταση). Όταν το πεδίο γύρω από τα ηλεκτρόδια γίνει κατά τόπους πολύ ισχυρό, (έντονα ανομοιογενές πεδίο) τότε τα συσσωρευμένα ιόντα γύρω από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια δημιουργούν ένα είδος ηλεκτροστατικής θωράκισης και ενδέχεται να αναστείλουν την εμφάνιση της αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης ή ακόμα και να προξενήσουν σβέση σε μία ήδη υπάρχουσα. Στην περίπτωση αυτή, η προκύπτουσα εκκένωση

χαρακτηρίζεται ως στεματοειδής και το συνολικό ρεύμα που την χαρακτηρίζει να είναι είτε παλμικής είτε συνεχούς μορφής με μέση τιμή εντάσεως που ενδέχεται να φθάνει σημαντικά ποσοστά του ενός ampere.

### 3.10 Κριτήρια για την ηλεκτρική εκκένωση Townsend

Θεωρούμε δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια τοποθετημένα μέσα σε αέριο μονωτικό υλικό, μεταξύ των οποίων εφαρμόζεται μία διαφορά δυναμικού η οποία εγκαθιστά ένα χρονικά αμετάβλητο ηλεκτρικό πεδίο. Δεχόμαστε ότι, σε κάθε δευτερόλεπτο απελευθερώνονται προς το αέριο  $n_0$  ηλεκτρόνια, τα οποία υποθέτουμε ότι εξάγονται από την επιφάνεια της καθόδου (αρνητικό ηλεκτρόδιο) με κάποιο φυσικό μηχανισμό μεταφοράς φορτίων, π.χ. θερμιονική εκπομπή, εκπομπή πεδίου, ιονισμό πεδίου. Κάτω από την επίδραση του εξωτερικά επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται στο υπάρχον διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων με συνολική κατεύθυνση προς την άνοδο και εφ' όσον η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι αρκετά ισχυρή, θα προξενήσουν και τον πολλαπλασιασμό της συγκέντρωσής τους στο διάκενο με την εκδήλωση του φαινομένου της χιονοστιβάδας.

Επιλέγοντας ικανοποιητικά μεγάλη την αρχική τιμή του  $n_0$ , ή θεωρώντας ότι η παραπάνω διαδικασία εξελίσσεται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι επιδράσεις των στατιστικών διαφορών μεταξύ των διαδοχικών χιονοστιβάδων είναι αμελητέες. Δεχόμαστε λοιπόν ότι όλες οι χιονοστιβάδες είναι φαινομενικά ίδιες. Έστω ότι  $Mn_0$  ηλεκτρικά φορτία συλλέγονται από την άνοδο, ενώ μόνο  $n_0$  εκπέμπονται από την κάθοδο, συμπεραίνουμε ότι  $(M-1)n_0$  φορτία ελευθερώθηκαν στο αέριο κατά την διαδικασία του ιονισμού με κρούσεις. Επομένως  $(M-1)n_0$  κρούσεις με ιονισμό πρέπει να δημιουργήθηκαν και  $(M-1)n_0$  θετικά ιόντα τελικά θα φθάσουν στην κάθοδο. Στο παραπάνω παράδειγμα γίνεται η παραδοχή ότι μία κρούση με ιονισμό εισάγει ένα μόνο πρόσθετο ηλεκτρόνιο αφήνοντας και ένα θετικά φορτισμένο ιόν, ενώ παράλληλα δεχόμαστε ότι δεν γίνονται ανασυνδέσεις μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των θετικών ιόντων.

Ορίζουμε τον δευτερογενή συντελεστή  $\gamma$ , ως το ποσοστό των δευτερογενών ηλεκτρονίων που συλλέγονται από την άνοδο ανά κρούση χιονοστιβάδας. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των δευτερογενών ηλεκτρονίων που συλλέγονται από την άνοδο κατά την πρώτη κρούση θα είναι  $\gamma(M-1)n_0$ .

Τα  $\gamma(M-1)n_0$  ηλεκτρόνια είναι μόνο η πρώτη γενεά δευτερογενών ηλεκτρονίων. Αυτά με τη σειρά τους θα δημιουργήσουν και άλλες χιονοστιβάδες παράγοντας ακόμα  $[\gamma(M-1)]^2 n_0$  δευτερεύοντα ηλεκτρόνια. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται και ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων που συλλέγονται από την άνοδο ανά μονάδα χρόνου, συμπεριλαμβανομένου και των δευτερογενών ηλεκτρονίων είναι :

$$n_0(1+\mu+\mu^2+\mu^3+\dots) \quad \text{όπου } \mu = \gamma(M-1)$$

Αν το  $\mu$  είναι μεγαλύτερο ή ίσο με τη μονάδα τότε η σειρά αποκλίνει και η ροή του ρεύματος στο διάκενο μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων θα αυξάνει χωρίς όριο. Κριτήριο λοιπόν για την εκκίνηση της αυτοσυντηρούμενης ηλεκτρικής εκκένωσης θα είναι :

$$\gamma(M-1) = 1 \quad (3.10-1)$$

Το κριτήριο το οποίο εκφράζεται από τη σχέση 3.10 -1 είναι έγκυρο για ένα

ευρύ φάσμα συνθηκών .

Για την τιμή του  $M$  έχουν γίνει ορισμένες παραδοχές σχετικά με τις φυσικές διαδικασίες που καθορίζουν την αριθμητική τιμή του. Στη σχέση 3.10 -1 είναι λογικό ότι πρέπει να λαμβάνεται κυρίως υπ' όψη ο ιονισμός με κρούσεις. Όμως η ίδια εξίσωση παραμένει σε ισχύ ακόμα και όταν ο μηχανισμός διάσπασης του διάκενου συνοδεύεται και από φαινόμενα ανασύνδεσης, αποσύνδεσης και/ή άλλες διεργασίες. Επίσης, το ίδιο κριτήριο παραμένει σε ισχύ και κατά την συνύπαρξη οποιασδήποτε δευτερεύουσας διεργασίας που συντελεί στην πρόσθετη έγχυση δευτερογενών ηλεκτρονίων από την επιφάνεια της καθόδου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο συνολικός ρυθμός εκπομπής ηλεκτρονίων προς το διάκενο. Τέλος, για την περίπτωση εισαγωγής δευτερογενών ηλεκτρονίων οπουδήποτε αλλού στο διάκενο, για παράδειγμα όταν έχουμε φωτοϊονισμό του διάκενου, το κριτήριο δεν είναι μεν σε απόλυτη ισχύ, πλην όμως εξακολουθεί να παρέχει μια καλή προσέγγιση του φαινομένου για πολλές περιπτώσεις. Προκειμένου να γίνει χρήση της σχέσης 3.10 -1 στην κάθε ειδική εφαρμογή, θα πρέπει να αντικατασταθεί το  $M$  με μία άλλη κατάλληλη συνάρτηση.

### 3. 11 Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων χωρίς τον μηχανισμό ανασύνδεσης

Για την περίπτωση ιονισμού με κρούσεις ορίζουμε τον συντελεστή  $\alpha$  έτσι ώστε, όταν μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων εξελίσσεται στο μήκος της διαδρομής της κατά το στοιχειώδες διάστημα  $dx$ , ο αριθμός των ιονισμών με κρούσεις ανά ηλεκτρόνιο να είναι  $(\alpha dx)$ . Αν η χιονοστιβάδα περιλαμβάνει  $n_e(x)$  ηλεκτρόνια στο σημείο  $x$ , τότε ο αριθμός αυτός αυξάνει κατά  $dn_e(x)$  καθώς η χιονοστιβάδα εξελίσσεται από το σημείο  $x$  στο σημείο  $(x+dx)$ , επομένως :

$$dn_e(x) = n_e(x) \alpha dx \quad (3.11-1)$$

Αν η χιονοστιβάδα έχει ως αφετηρία το σημείο  $x=0$  τότε ο αριθμός των ηλεκτρονίων που θα περιλαμβάνει όταν φθάσει στο σημείο  $x=s$  θα παρέχεται με τροποποίηση και ολοκλήρωση της σχέσης 3.11 -1.

$$n_e(s) = n_e(0) \exp \int_0^s \alpha dx \quad (3.11-2)$$

2)

Θεωρώντας  $s=d$  το μήκος του διάκενου μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, τότε θα ισχύει :  $n_e(0) = n_0$  και  $n_e(d) = M n_0$ . Έτσι η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$M = \exp \int_0^d \alpha dx \quad (3.11-3)$$

Στην περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ομογενές, η σχέση 3.11 -3 γίνεται :

$$M = \exp (\alpha d) \quad (3.11-4)$$



### 3.12 Χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων με μηχανισμό ανασύνδεσης

Στην περίπτωση αυτή γίνεται η παραδοχή ότι σχηματίζονται μόνο ευσταθή αρνητικά ιόντα, δηλαδή δεν παρουσιάζονται φαινόμενα αποσύνδεσης μεταξύ των ιόντων αυτών.

Κατ' αναλογία προς τον συντελεστή  $\alpha$  ορίζεται και ο συντελεστής ανασύνδεσης  $n$ . Κάθε σύγκρουση που προξενεί ιονισμό τείνει να αυξήσει τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά ένα, ενώ κάθε σύγκρουση που καταλήγει σε ανασύνδεση οδηγεί στην μείωση του αριθμού αυτών επίσης κατά ένα. Όπως και για τη σχέση 3.11 -1, έχουμε:

$$dn_e(x) = n_e(X) \alpha^* dx \quad (3.12-1)$$

όπου  $\alpha^* = \alpha - n$

Ανάλογα με τη σχέση 3.11 -2, θεωρώντας ότι  $s = d$ , για την γενική περίπτωση θα έχουμε:

$$n_e(d) = n_e(0) \exp \int_0^d \alpha^* dx \quad (3.12 -2)$$

ενώ για την περίπτωση ομογενούς πεδίου θα έχουμε:

$$n_e(d) = n_e(0) \exp(\alpha^* d) \quad (3.12 -3)$$

Προκειμένου να συνεκτιμηθεί ο παράγοντας  $M$ , θα πρέπει να εξετασθεί ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρικών φορτίων που συλλέγονται από την άνοδο (ελεύθερα ηλεκτρόνια και αρνητικά ιόντα). Για την περίπτωση ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου καταλήγουμε σε μία σχέση της μορφής:

$$M = \alpha / \alpha^* \exp[(\alpha^* d) - (n / \alpha^*)] \quad (3.12-4)$$

### 3.13 Ο νόμος του Paschen

Για δεδομένο αέριο, η τιμή του συντελεστή  $\alpha$  πρέπει προφανώς να εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι εάν δεχθούμε ότι ο ιονισμός με κρούση περιλαμβάνει μόνον δύο σωματίδια, τότε η ποσότητα  $(\alpha/N)$  θα είναι μόνον συνάρτηση του  $(E/N)$ , όπου  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $N$  η πυκνότητα του αερίου.

Για ένα αέριο σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, στο οποίο δεν λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ανασύνδεσης, μπορούμε να συνδυάσουμε τις σχέσεις 3.11 -1 και 3.11 -4 και να γράψουμε το κριτήριο για την ηλεκτρική διάσπαση ως εξής:

$$\gamma[\exp(\alpha d) - 1] = 1 \quad (3.13-1)$$

Γράφοντας:

$$\alpha/N = f(E/N) \quad (3.13 -2)$$

και εκφράζοντας τον συντελεστή  $\gamma$  ως συνάρτηση του λογού  $(E/N)$ , δηλαδή:

$$\gamma = g(E/N) \quad (3.13 -3)$$

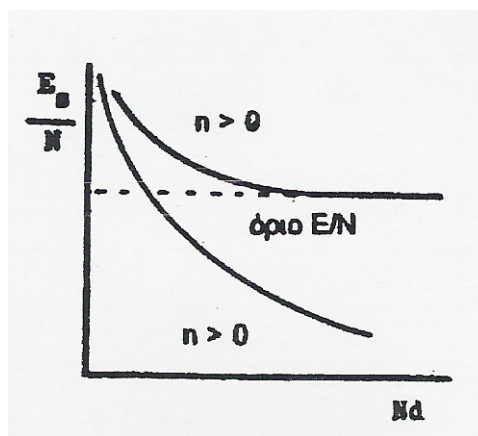
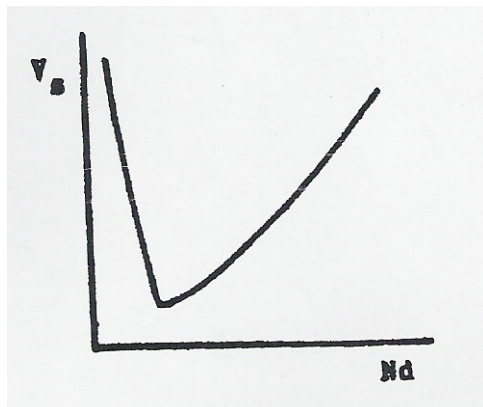
τότε, το κριτήριο για την ηλεκτρική διάσπαση γίνεται:

$$g(V_s/ Nd) \{ \exp[Nd f(V_s/Nd)] -1 \} = 1 \quad (3.13 -4)$$

όπου  $V_s$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση κατά την ηλεκτρική διάσπαση.

Η συμβολή της σχέσης 3.13 -4 στην περιγραφή της διάσπασης των αερίων μονωτικών υλικών εκφράζεται ως εξής: για οποιαδήποτε τιμή του γινομένου  $Nd$  υπάρχει μία μόνο τιμή της τάσης  $V_s$  που ικανοποιεί το κριτήριο. Με άλλα λόγια, η τάση της ηλεκτρικής διάσπασης  $V_s$  εξαρτάται αποκλειστικά από την πυκνότητα του αερίου και το μήκος του διάκενου. Αυτός είναι ο νόμος του Paschen, ο οποίος ισχύει επίσης και για αέρια υλικά στα οποία υπάρχουν και φαινόμενα ανασύνδεσης.

Η τάση διάσπασης για αέρια εντός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να παρασταθεί σε ένα διάγραμμα  $V_s - Nd$ . Αυτό το διάγραμμα λέγεται καμπύλη του Paschen και έχει τη γενική μορφή που φαίνεται στο σχήμα 3.13 -1 (α). Αφού κάθε τιμή του  $Nd$  παρέχει μία μοναδική τιμή τη τάσης  $V_s$ , θα αντιστοιχεί επίσης και σε μία μοναδική τιμή της ποσότητας  $(V_s/Nd)$ . Αυτή η ποσότητα είναι ίση με  $E/N$  (όπου  $E_s$  η ένταση του πεδίου κατά την ηλεκτρική διάσπαση) και η καμπύλη Paschen μπορεί ισοδύναμα να παρασταθεί σε ένα διάγραμμα  $E_s/N - Nd$ . Το διάγραμμα Paschen αυτή τη φορά θα έχει τη μορφή του σχήματος 3.13 -1 (β). Εδώ η περίπτωση των αερίων με φαινόμενα ανασύνδεσης διακρίνεται με την εμφάνιση μιας τιμής  $E/N$  κάτω από την οποία η ηλεκτρική διάσπαση είναι αδύνατη για ένα οποιαδήποτε πεπερασμένο διάκενο.



**Σχήμα 3.13 -1 :** Μορφές της καμπύλης Paschen

Το όριο  $E/N$  υπάρχει στα αέρια με φαινόμενα ανασύνδεσης επειδή υπάρχει μία τιμή του λόγου αυτού, κάτω από την οποία η διαδικασία της ανασύνδεσης επικρατεί της διαδικασίας του ιονισμού με κρούσεις, με αποτέλεσμα ο σχηματισμός της χιονοστιβάδας να είναι αδύνατος. Σε ένα αέριο το οποίο σχηματίζει μόνο ευσταθή αρνητικά ιόντα, το όριο  $E/N$  αντιστοιχεί στην τιμή  $E/N$  για την οποία ισχύει  $\alpha=\pi$ .

Σε ένα ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο η ηλεκτρική εκκένωση γίνεται αυτοσυντηρούμενη για μία τιμή της τάσης  $V_{si}$ , και μπορεί να καταλήξει είτε σε

ολοκληρωτική διάσπαση είτε σε στεματοειδής εκκένωση. Εδώ ο νόμος του Paschen θα πρέπει να αντικατασταθεί με μία πιο γενική έκφραση, την αρχή της ομοιομορφίας, σύμφωνα με την οποία η τάση  $V_{si}$  είναι συνάρτηση του όρου  $Nd$  υπό την προϋπόθεση ότι οι μεταβολές σε απόσταση  $d$  συνοδεύονται από ανάλογες μεταβολές για όλες τις άλλες θέσεις του διάκενου.

Στις περιπτώσεις που η ανομοιογένεια του πεδίου είναι σημαντική, η έναρξη της αυτοσυντηρούμενης εκκένωσης καθορίζεται από γεγονότα που λαμβάνουν χώρα σε μια μικρή περιοχή του χώρου στην οποία τυγχάνει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου να είναι ισχυρότερη. Στις περιπτώσεις αυτές, ο νόμος του Paschen μπορεί να θεωρηθεί μόνον σαν μια χρήσιμη προσεγγιστική σχέση στην οποία υπεισέρχεται το μέγεθος  $E_{sir}$ . Το οποίο είναι συνάρτηση του παράγοντα  $Nr$ , όπου  $E_{si}$  είναι η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης στο διάκενο όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι  $V_{si}$  και  $r$  είναι η επιφανειακή ακτίνα καμπυλότητας του ηλεκτροδίου στο σημείο που εμφανίζει την ισχυρότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου. Τα συμπεράσματα αυτά πηγάζουν από την αρχή της ομοιομορφίας και ισχύουν μόνο όταν αλλαγές στην τιμή του  $r$  συνοδεύονται από ανάλογες μεταβολές σε όλες τις άλλες διαστάσεις του διάκενου.

### 3.14 Αποκλίσεις από τον νόμο του Paschen

Σημαντικές αποκλίσεις από τον νόμο του Paschen (ή την αρχή της ομοιομορφίας) παρατηρούνται συχνά σε πιέσεις αερίων μονωτικών υλικών όταν βρίσκονται σε πιέσεις μερικών ατμοσφαιρών, πράγμα που πρακτικά συνίσταται στη μείωση της τάσης διάσπασης κατά 50% από τις τιμές που προβλέπονται από τον νόμο του Paschen. Σε πολλές άλλες περιπτώσεις και σίγουρα στο  $SF_6$ , κάτω από συνθήκες πρακτικού ενδιαφέροντος η μείωση αυτή προξενείται από διαφοροποιήσεις του ηλεκτρικού πεδίου που οφείλονται στην τραχύτητα της επιφάνειας του ηλεκτροδίου ή από την παρουσία στερεών φορτισμένων σωματιδίων τα οποία είτε είναι ακίνητα είτε μπορούν να κινηθούν.

### 3.15 Η σημασία της πίεσης και της θερμοκρασίας για τον ιονισμό

Για τον αριθμό ( $N$ ) των μορίων του ηλεκτρομονωτικού αερίου στη μονάδα του όγκου, υπό πίεση  $P$  και θερμοκρασία  $T$ , ισχύει κατά τη θερμοδυναμική, η σχέση:

$$N = \frac{P}{kT} \quad (3.15-1)$$

Όπου  $k$  η σταθερά του Boltzmann.

Επειδή από τη σχέση (3.2 -12) έχουμε ότι  $N=1/(\pi\lambda_e R^2)$  συνεπάγεται ότι :

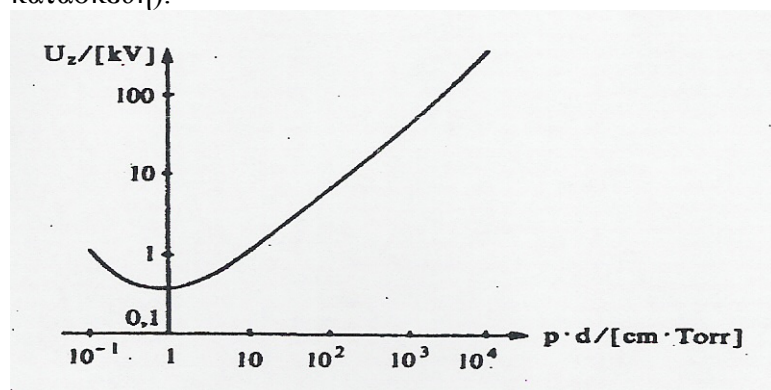
$$\lambda_e = \frac{kT}{\pi p R^2} \quad (3.15 -2)$$

Συνεπώς για την συνθήκη ιονισμού θα έχουμε:

$$E \frac{kT}{\pi p R^2} \geq U_i \quad (3.15 -3)$$

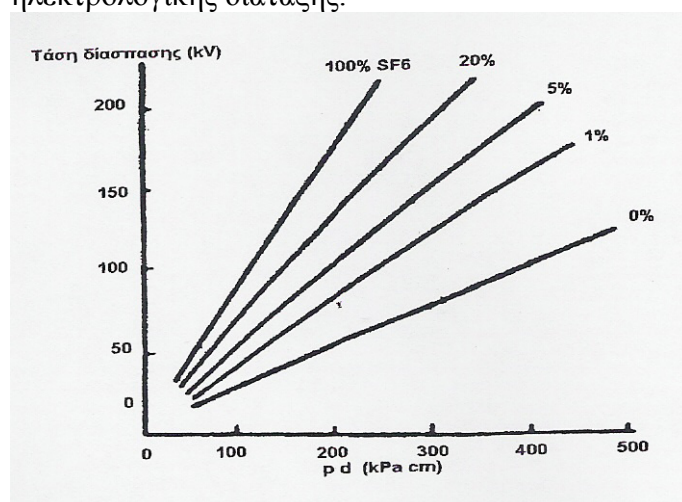
Από την τελευταία ανισότητα γίνεται φανερό, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας διευκολύνει τον ιονισμό με κρούσεις, ενώ η αύξηση της πίεσης του αερίου παίζει ανασταλτικό ρόλο. Επειδή ο ιονισμός με κρούσεις είναι τελικά (λόγω της παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων) μία εκκένωση, που επενεργεί για τη μετατροπή του επιδιωκόμενου ηλεκτροστατικού πεδίου σε ένα πεδίο ροής (μερική εκκένωση, διάσπαση) συμπεραίνεται ότι : η διηλεκτρική αντοχή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου, ενώ γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνει η πίεση του αερίου.

Από το παραπάνω συμπέρασμα γίνεται φανερός ο λόγος χρησιμοποίησης των ηλεκτρομονωτικών αερίων υπό πίεση. Όσο αυξάνει η τάση του δικτύου, όπου θα εγκατασταθούν διατάξεις με μονωτικό αέριο, τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση του αερίου, ανάλογα με το είδος του αερίου (κυρίως αέρας και SF<sub>6</sub>). Στους διακόπτες Π.χ. αέρος του δικτύου των 150 kV η πίεση είναι περίπου 20 atm, ενώ στους διακόπτες με SF<sub>6</sub> στο δίκτυο των 150 kV είναι αρκετά μικρότερη (2,5 έως 6 atm, ανάλογα με την κατασκευή).



**Σχήμα 15 -1 :** Τάση έναυσης (τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) του αέρα στους 20°C σε συνάρτηση με την πίεση P και την απόσταση d των ηλεκτροδίων

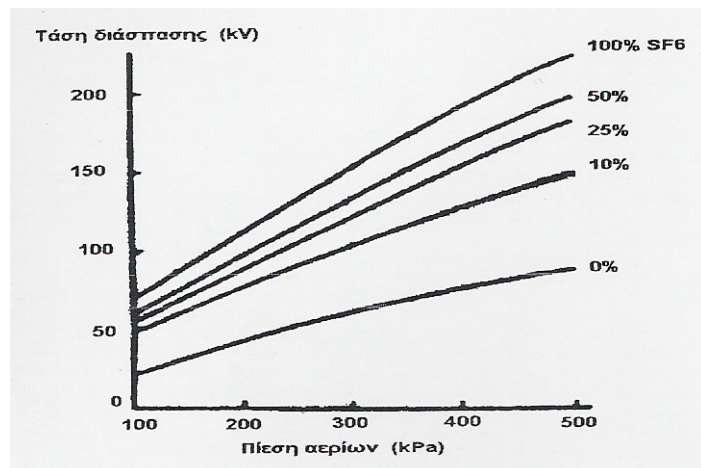
Στις εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται κάποιο αέριο μίγμα (SF<sub>6</sub> - N<sub>2</sub>) μεγάλη σημασία δίνεται στην αναλογία των αερίων συστατικών του μίγματος, αφού μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στην μονωτική ικανότητα ολόκληρης της ηλεκτρολογικής διάταξης.



**Σχήμα 3.15 -2 :** Τάση διάσπασης για μίγμα SF<sub>6</sub> - N<sub>2</sub> στους 20°C

### 3.16 Απόδοση λειτουργίας αέριων μονωτικών κάτω από συνθήκες ρύπανσης

Η παρουσία αέρα σε διατάξεις όπου το μονωτικό αέριο είναι το  $\text{SF}_6$  είναι γενικά ανεπιθύμητη αφού μειώνει σημαντικά την διηλεκτρική αντοχή ολόκληρης της διάταξης, ιδιαίτερα όταν ο αέρας περιέχει μικροσωματίδια ή υγρασία (Σχήμα 3.16 -1). Έχει αποδειχθεί ότι η παρουσία σωματιδιακής ρύπανσης με μέγεθος κόκκων 2-20  $\mu\text{m}$  έχει τη δυνατότητα να μειώσει την ικανότητα διηλεκτρικής αντοχής διακένων σε ποσοστό 30% στις κρουστικές τάσεις, 40% στις τάσεις χειρισμού και ως 70% στις περιπτώσεις καταπονήσεων ισχύος συχνότητας (power frequency), στη συνήθη πίεση λειτουργίας του  $\text{SF}_6$ .



Σχήμα 3.16 -1 : Τάση διάσπασης του  $\text{SF}_6$  για διάφορες περιεκτικότητες σε αέρα

Τα συστήματα με αέρια μονωτικά είναι δυνατόν να ρυπανθούν από τα παραγόμενα παραπροϊόντα της αποσύνθεσης του αερίου κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώσεως από το ρεύμα του τόξου διακοπής. Τα συνήθη παραπροϊόντα για το  $\text{SF}_6$ , σε ξηρό περιβάλλον είναι τα  $\text{SF}_4$ ,  $\text{S}_2\text{F}_2$ ,  $\text{F}_2$  ενώ όταν συνδυάζονται με παράγωγα υγρασίας δημιουργούνται  $\text{SOF}_2$ ,  $\text{SO}_2\text{F}_2$  και  $\text{SO}_2\text{F}_4$  τα οποία είναι ιδιαίτερα τοξικά. Πειράματα έχουν δείξει ότι, όταν η περιεκτικότητα του αερίου σε υγρασία είναι 44  $\text{mg H}_2\text{O/kg SF}_6$  ή μικρότερη, δεν συμβαίνει καμία μείωση στην τάση διάσπασης. Όμως στην περίπτωση που υπάρχουν αυξημένες περιεκτικότητες υγρασίας, τα όξινα προϊόντα αποσύνθεσης, επιδρούν στα στερεά μονωτικά υλικά πολύ δραστικά, κυρίως όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία υπερβαίνει την τιμή των 74  $\text{mg H}_2\text{O/kg SF}_6$ . Η δημιουργία ανεξέλεγκτων τόξων μεγάλης ισχύος και μεγάλης χρονικής διάρκειας στο  $\text{SF}_6$  εκλύει μεγάλες ποσότητες υδρογόνου το οποίο ενώνεται με τα διασπασθέντα άτομα θείου δημιουργώντας υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ) οπότε όλο το αέριο μίγμα των δεξαμενών χρειάζεται αναγέννηση ή αντικατάσταση.

Επίσης κατά την εμφάνιση των ηλεκτρικών τόξων δημιουργούνται παράλληλα με τα παραπροϊόντα των διασπάσεων και φθοριούχες ποσότητες σκόνης μετάλλου από τους ατμούς των μεταλλικών επαφών. Τα προϊόντα αυτά λόγω της επίδρασης των βαρυτικών δυνάμεων κατευθύνονται προς τα χαμηλότερα τμήματα των θαλάμων του αερίου μονωτικού και πολλές φορές επικάθονται στους στερεούς μονωτήρες αυξάνοντας δραστικά το ρεύμα ερπυσμού.

### **3.17** Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά

Επειδή το αέριο δεν προσφέρει κάποια μηχανική υποστήριξη χρησιμοποιείται πάντοτε σε συνδυασμό με κάποια στερεά μονωτικά (μονωτήρες στήριξης). Η διεπιφάνεια μεταξύ στερεού - αερίου μονωτικού υλικού θα πρέπει να εξεταστεί με ιδιαίτερη προσοχή κατά την ηλεκτρική σχεδίαση μιας διάταξης, δεδομένου ότι οι αδυναμίες αυτής της περιοχής ενδέχεται να επηρεάζουν την λειτουργία της διάταξης με πιθανά αποτελέσματα τις έρπουσες μερικές εκκενώσεις, την υπερπήδηση ή και την διάσπαση των μονωτικών.

Τα αέρια μονωτικά έχουν το μειονέκτημα να προκαλούν βλάβες στα στερεά μονωτικά, που συνεργάζονται μαζί τους. Αυτό οφείλεται στις ξένες κυρίως επικαθίσεις, λόγω των οποίων μειώνονται οι αποστάσεις μόνωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση εκκενώσεων στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών. Προκαλούν επίσης βλάβες στα στερεά και υγρά μονωτικά, όταν εγκλωβίζονται σ' αυτά, γιατί τότε επενεργούν ως ανεπιθύμητες ανομοιογένειες, οι οποίες μειώνουν (κυρίως λόγω μερικών εκκενώσεων) τη διηλεκτρική αντοχή των στερεών και υγρών μονωτικών. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποφυγής της ανεπιθύμητης συνεργασίας των αερίων μονωτικών με τα στερεά και υγρά μονωτικά είναι η πλήρωση του δοχείου των μετασχηματιστών με μονωτικό λάδι υπό συνθήκες κενού.

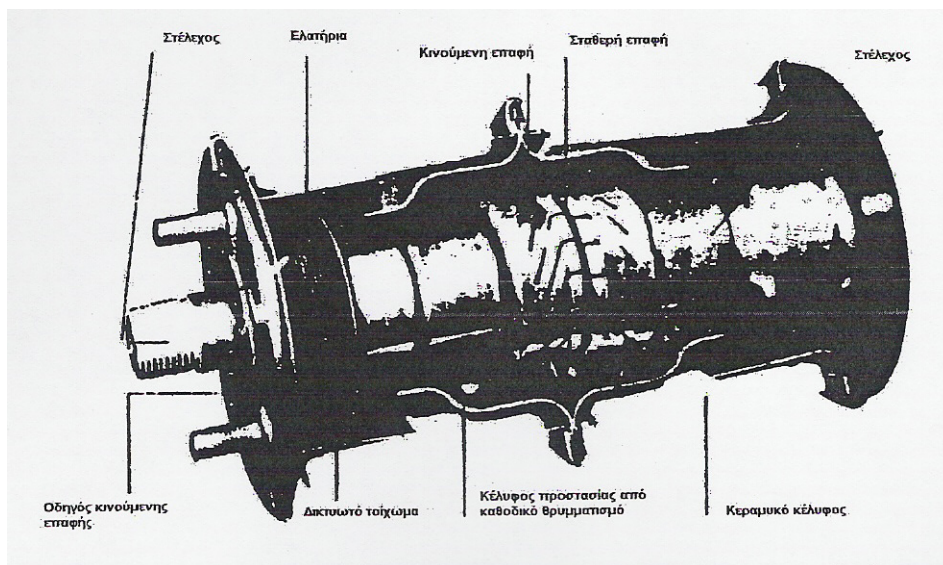
### **3.18** Το κενό ως αέριο μονωτικό

Στα αέρια μονωτικά υλικά πολλές φορές συμπεριλαμβάνεται και το υψηλό κενό το οποίο σε τιμές πιέσεων μικρότερες από  $10^{-6}$  mbar εμφανίζει διηλεκτρική αντοχή 30 kV/mm. Κάτω από συνθήκες ηλεκτρικού τόξου, το απαραίτητο αέριο για τον ιονισμό παρέχεται από ατμούς του μετάλλου στη ρίζα του τόξου των ηλεκτροδίων (κατάσταση πλάσματος στην περιοχή πλησίον των μεταλλικών ηλεκτροδίων), οπότε η διάσπαση ενός διάκενου στο κενό εξαρτάται από τη φύση των ηλεκτροδίων. Συνήθως τα ηλεκτρόδια σε διατάξεις κενού είναι από σκληρά υλικά (όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας) τα οποία δίνουν τάση διάσπασης τρεις φορές μεγαλύτερη από άλλα μαλακά υλικά (όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο). Η επιφανειακή ρύπανση των ηλεκτροδίων είναι επίσης σημαντική δεδομένου ότι μειώνεται το έργο εξόδου των ηλεκτρονίων (ενέργεια που απαιτείται ώστε ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στοιβάδας, να εγκαταλείψει τον μητρικό πυρήνα του μετάλλου).

Η σβέση του τόξου στους διακόπτες κενού (VCB vacuum circuit breakers) επιτυγχάνεται ψύχοντας γρήγορα την ρίζα του τόξου έτσι ώστε να συγκαλυφθούν γρήγορα οι περιοχές υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό επιτυγχάνεται με ταχεία περιστροφή των επαφών στην ρίζα του τόξου χρησιμοποιώντας το δικό τους μαγνητικό πεδίο και επιλέγοντας υλικό ηλεκτροδίων με υψηλό σημείο τήξης και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Η διηλεκτρική αντοχή του κενού διασφαλίζει ότι με την πρώτη σβέση του τόξου, συνήθως στον πρώτο μηδενισμό του ρεύματος, καμία επανάφλεξη δεν αναμένεται να συμβεί, δεδομένου ότι η διηλεκτρική του συμπεριφορά επανέρχεται σε υψηλά επίπεδα σε χρόνο της τάξης του 1  $\mu$ s.

Οι επαφές είναι εγκατεστημένες σε ένα ερμητικά κλειστό και στεγανό υάλινο ή κεραμικό δοχείο με κινητό σύστημα μεταλλικών ελατηρίων και δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση. Εάν για κάποιο λόγο, η εσωτερική πίεση των θαλάμων κενού ανέβει μόνιμα πάνω από τα  $10^{-2}$  mbar, η διάταξη είναι ακατάλληλη για περαιτέρω χρήση.





**Σχήμα 3.18 -1 :** Τυπική γεωμετρία (τομή) διακόπτη υψηλού κενού

Οι διακόπτες κενού έχουν παρουσιάσει εξαιρετική συμπεριφορά και απόδοση λειτουργίας όταν χρησιμοποιούνται σε συστήματα διανομής με ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας τους  $< 40\text{kA}$  στα  $33\text{ kV}$ . Οι διακόπτες κενού προσφέρουν την ιδανική επιλογή εκεί που απαιτούνται πολλαπλές διακοπές της τροφοδοσίας ισχύος, Π.χ. ηλεκτρικοί σιδηρόδρομοι, φούρνοι. Η κύρια χρήση των VCB βρίσκεται στη διανομή στις εφαρμογές  $11\text{ kV}$ ,  $33\text{ kV}$  και  $66\text{ kV}$  και εκεί που απαιτούνται διακόπτες χωρίς καμία ανάγκη συντήρησης (και δεν επιθυμούνται ελαιδιακόπτες ).





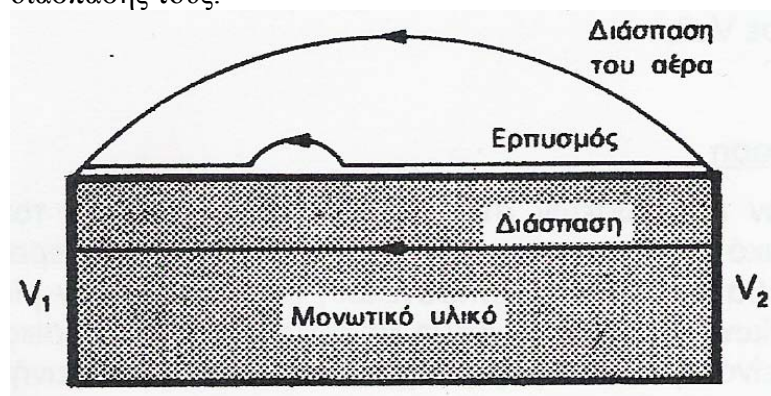
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

- 4.1 Η διάσπαση στα αέρια και στερεά μονωτικά υλικά
- 4.2 Ο μηχανισμός της υπερπήδησης
- 4.3 Η επιφανειακή διάσπαση
- 4.4 Η ηλεκτρική διάσπαση
- 4.5 Η μακροσκοπική θεωρία της διάσπασης
- 4.6 Οι μερικές εκκενώσεις
- 4.7 Θερμική διάσπαση - θερμοχημική διάσπαση
- 4.8 Η Κβαντομηχανική θεωρία της διάσπασης
- 4.9 Παράδειγμα μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης
- 4.10 Συνδυασμός μακροσκοπικής - κβαντομηχανικής θεωρίας
- 4.11 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών
- 4.12 Συνθήκες χαμηλής πίεσης και διάσπαση στο κενό

#### 4.1 Η διάσπαση στα αέρια και στερεά μονωτικά υλικά

Τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των ηλεκτρομονωτικών αερίων έχουν εξεξηγηθεί ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται βασικά στη μικρή σταθερότητα των μορίων τους, ως προς εκείνη των υγρών και προ πάντων των στερεών μονωτικών, με αποτέλεσμα να επανέρχεται το αέριο μετά την διάσπαση (ή την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων) στην αρχική του κατάσταση. Στα στερεά μονωτικά, η ικανότητα δημιουργία ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει ως αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σε αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις κλπ). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε, βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών υλικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδηση και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού γήρανσης και διάσπασης τους.



**Σχήμα 4.1-1 :** Η απώλεια της μονωτικής ικανότητας ενός στερεού μονωτικού μπορεί να γίνει με ηλεκτρική διάσπαση του υλικού ή με υπερπήδηση που εκδηλώνεται με ρεύμα ερπυσμού και με διάσπαση του αέρα.

#### 4.2 Ο μηχανισμός της υπερπήδησης

Η υπερπήδηση σε ρυπαρούς μονωτήρες με τον μηχανισμό σχηματισμών επί μέρους ζωνών έχει τεκμηριωθεί από πολλές πειραματικές διατάξεις. Συστηματικές έρευνες πάνω σε αυτό το θέμα έχουν αποδείξει ότι η εφύγρανση των ρύπων οδηγεί στην αύξηση του ρεύματος διαρροής στην επιφάνεια του μονωτήρα (ρεύμα ερπυσμού). Η μεταβολή στην πυκνότητα του ρεύματος ερπυσμού ελέγχεται από την γεωμετρία του μονωτήρα και τα ανομοιόμορφα επίπεδα εφύγρανσης που οδηγούν στο σχηματισμό ξηρών ζωνών ή περιοχών υψηλής αντίστασης. Οι ξηρές ζώνες τείνουν να συγκρατούν το ρεύμα διαρροής και συγχρόνως υφίστανται την μέγιστη επιφανειακή καταπόνηση (πτώση τάσης στην επιφάνεια του μονωτήρα).

Έχει αποδειχθεί ότι η τάση με την οποία καταπονείται μία ξηρή ζώνη σταθεροποιείται ελαφρώς κάτω από το επίπεδο που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί μία εκκένωση μέσα από τον αέρα.

Αν αυτή η λεπτή ισορροπία διαταραχθεί, τότε θα συμβεί εκκένωση κατά μήκος της ξηρής ζώνης και η περαιτέρω μεταφορά του επιφανειακού παλμού ρεύματος θα περιορίζεται μόνο από την αντίσταση της υπόλοιπης ρυπαρής επιφάνειας. Η διάδοση των εκκενώσεων κατά μήκος των ξερών ζωνών εξαρτάται από

πολλούς παράγοντες, όπως η ανομοιομορφία της επιφανειακής ρύπανσης, η ειδική αντίσταση των επικαθίσεων και η τιμή του ρεύματος κορυφής της διαρροής.

Οι μονωτήρες εξετάζονται χρησιμοποιώντας την μέθοδο αλατούχου ομίχλης και ένα στρώμα επικαθίσεων στερεών ρύπων (μέθοδος Kieselguhr). Ως "κρίσιμο ρεύμα"  $I_{\max}$  χαρακτηρίζεται Το μέγιστο ρεύμα διαρροής στον καταπονούμενο μονωτήρα κατά τη διάρκεια της ημιπεριόδου που προηγείται του φαινομένου εμφάνισης της υπερπήδησης.

$$I_c = I_{\max} = \frac{800 X_c}{V_c} \quad (4.2 -1)$$

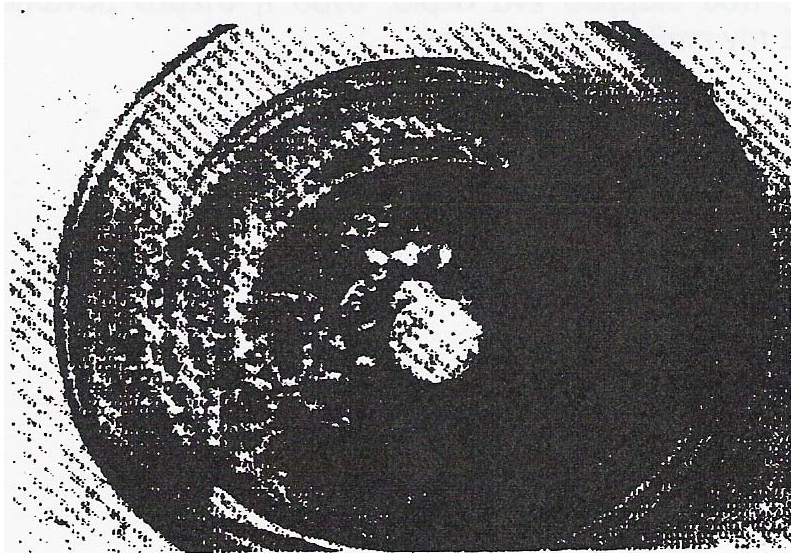
όπου 800 είναι μία σταθερά,  $X_c$  είναι το κρίσιμο μήκος του τόξου σε cm το οποίο λαμβάνεται ίσο προς τα 2/3 του συνολικού μήκους ερπυσμού και  $V_c$  είναι η τάση υπερπήδησης σε Volts.

### 4.3 Η επιφανειακή διάσπαση

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού στερεό μονωτικό - αέριο μονωτικό, ή του συνδυασμού στερεό μονωτικό - υγρό μονωτικό θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων ( η οποία με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μια διαδρομή της δένδροειδούς φωτεινής ακτινοβολίας, που εκδηλώνεται) θα προκαλέσει μείωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων (δηλαδή μείωση της απόστασης μόνωσης), ώστε τελικά να συμβεί ένας οχετός διάσπασης στην επιφάνεια του στερεού (επιφανειακή διάσπαση), ή στο περιβάλλον μέσο (υπερπήδηση).

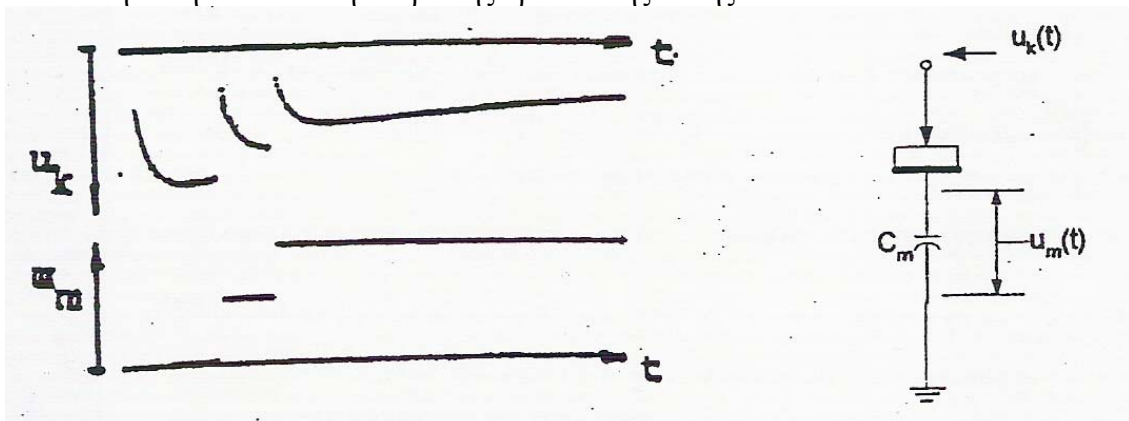
Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι  $30 \text{ \AA}$  ( $30 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ ). Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στην μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια), μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και άλλοι παράγοντες όπως οι απώλειες Joule και οι δυνάμεις Coulomb.

Η ρύπανση στην επιφάνεια ενός στερεού μονωτικού (π.χ. ενός μονωτήρα σε μία γραμμή μεταφοράς) μπορεί να οφείλεται σε αλατούχες επικαθίσεις των οποίων η πυκνότητα εξαρτάται από την απόσταση από ακτές, τους πνέοντες ανέμους της περιοχής, την ύπαρξη χημικών συστατικών προερχόμενων από πλησίον κείμενες βιομηχανίες, σκόνη άμμο, και αλατούχες ενώσεις σε περιοχές ερήμων. Η ρύπανση αυτή είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί με λίγη βροχή, με την παρουσία ομίχλης ή με αυξημένα ποσοστά υγρασίας. Η τελευταία μπορεί να προξενήσει σοβαρότερα λειτουργικά προβλήματα στους μονωτήρες από μία δυνατή βροχή, λόγω των επιφανειακών διασπάσεων.



**Σχήμα 4.3 -1 :** Διάβρωση μονωτήρα μετά από έκθεση διάρκειας 3 μηνών σε περιβάλλον αλάτων και έντονης ρύπανσης.

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά υλικά των πρακτικών εφαρμογών, με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ότι υπάρχει ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης με εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης.



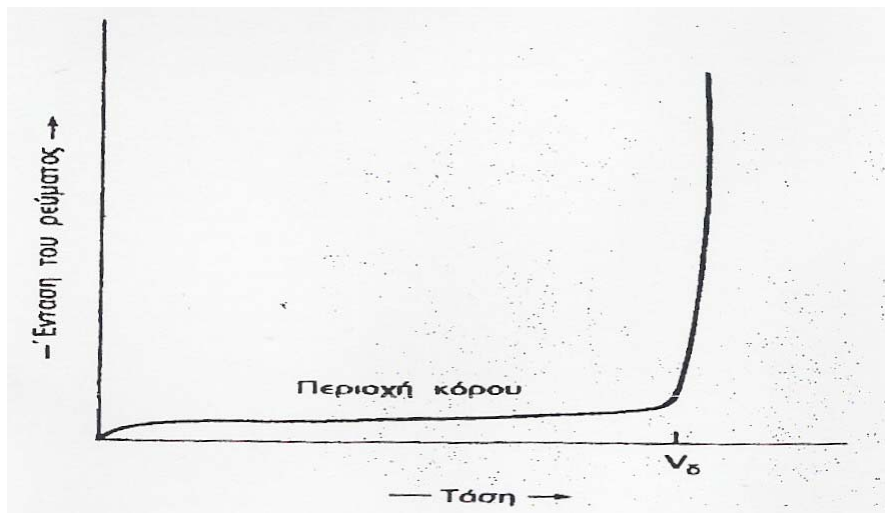
**Σχήμα 4.3-2 :** Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200μs και διάταξη ακίδα - πλάκα.

$$C_m = 1835 \text{ nF}$$

$$U_k = 70 \text{ kV}$$

#### 4.4 Η ηλεκτρική διάσπαση

Στο σχήμα 4.4 -1 δείχνεται η μορφή της καμπύλης μεταβολής της έντασης του ρεύματος, που διαρρέει ένα αέριο, υγρό ή στερεό μονωτικό σώμα, σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση.



**Σχήμα 4.4 -1 :** Μεταβολή της έντασης του ρεύματος σε ένα μονωτικό υλικό, σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη τάση, μέχρι την ηλεκτρική διάσπαση

Αρχικά, υπάρχει μια περιοχή, όπου η ένταση του ρεύματος έχει μια μικρή τιμή, περίπου ανάλογη προς την τάση, που οφείλεται κυρίως στα λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και στις προσμίξεις του μονωτικού σώματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιοχή κόρου, όπου η ένταση του ρεύματος διατηρείται περίπου σταθερή, διότι το πλήθος των φορέων που εκπέμπονται από τα ηλεκτρόδια ή που δημιουργεί το πεδίο, ιονίζοντας τα συστατικά του σώματος, αντισταθμίζεται περίπου από το πλήθος τους που εξουδετερώνεται στα ηλεκτρόδια. Η περιοχή αυτή των τάσεων ονομάζεται περιοχή ιονισμού. Τέλος, με την αύξηση της τάσης πέρα από μια κρίσιμη τιμή  $V_\delta$ , που ονομάζεται τάση διάσπασης, η ένταση του ρεύματος αυξάνει απότομα και γίνεται ανεξέλεγκτη. Εμφανίζεται δηλαδή το φαινόμενο της ηλεκτρικής (ή διηλεκτρικής) διάσπασης του μονωτικού.

Μαζί με την εκκένωση του ισχυρού ρεύματος διαμέσου του μονωτικού, η ηλεκτρική διάσπαση συνοδεύεται με την υπερθέρμανση του σώματος και με φωτεινά - ηχητικά φαινόμενα. Ειδικότερα στα στερεά μονωτικά υλικά, συγχρόνως με την ηλεκτρική διάσπαση πραγματοποιείται και η διάτρηση του σώματος. Δηλαδή, η μεγάλη θερμοκρασία που δημιουργεί η διέλευση του πολύ έντονου ρεύματος της διάσπασης, προκαλεί τοπικά την τήξη, καύση ή εξαέρωση του υλικού, και έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό μιας λεπτής τρύπας στο σώμα, κατά μήκος του πεδίου. Γίνεται επομένως καταστροφή του υλικού και μόνιμη απώλεια της μονωτικής του ικανότητας. Αντίθετα, στα αέρια και υγρά μονωτικά η διάσπαση δεν προκαλεί σοβαρή μόνιμη βλάβη αφού αν στη συνέχεια μειωθεί η τάση κάτω από την κρίσιμη τιμή, γίνεται αποκατάσταση των μονωτικών συνθηκών.

Τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης στα στερεά βιομηχανικά μονωτικά υλικά ερμηνεύονται με μεθόδους, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο θεωρίες:

- τη μακροσκοπική θεωρία της διάσπασης
- τη κβαντομηχανική θεωρία της διάσπασης.



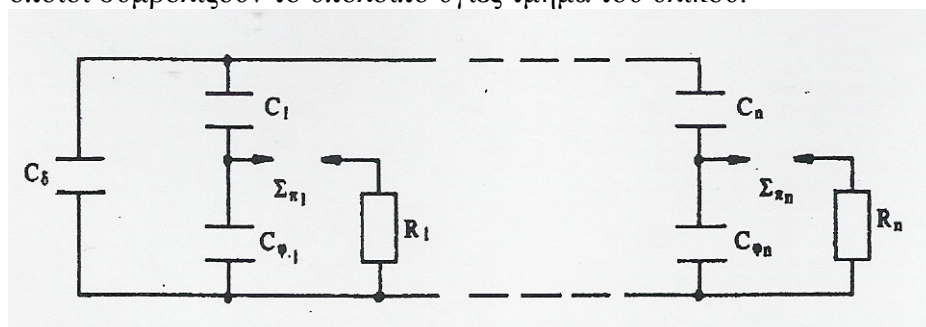
#### 4.5 Η μακροσκοπική θεωρία της διάσπασης

Σύμφωνα με την μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών αποσκοπούν (ή βασίζονται) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα από γραμμικά στοιχεία, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με τις οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση φωτεινών φαινομένων και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού. Κατά τη θεωρία αυτή, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλεται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες:

- τις απώλειες Joule
- τις μερικές εκκενώσεις
- τις δυνάμεις Coulomb, και
- την θερμότητα του περιβάλλοντος.

Οι παραπάνω παράγοντες υποβοηθούνται βέβαια στην πράξη από διάφορες τοπικές συνθήκες λειτουργίας έτσι, ώστε η γήρανση και η διάσπαση του στερεού μονωτικού να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

Ως σημαντικότερος παράγοντας γήρανσης του υλικού θεωρούνται οι μερικές εκκενώσεις, οι οποίες διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές. Ένα από τα περισσότερο γνωστά ισοδύναμα κυκλώματα για τις μερικές εκκενώσεις, κατά την παραπάνω μακροσκοπική θεωρία, φαίνεται στο σχήμα 4.5 -1. Σύμφωνα με αυτό η διάσπαση των επί μέρους θέσεων διαταραχής ( $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$ ) έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση των πυκνωτών  $C_1 \dots C_n$ , οι οποίοι συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του υλικού.



**Σχήμα 4.5-1:** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Germant και Philipoff.

$C_{\delta}$  : χωρητικότητα της διάταξης

$C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$  : φυσαλίδες αερίων και άλλες ανομοιογένειες

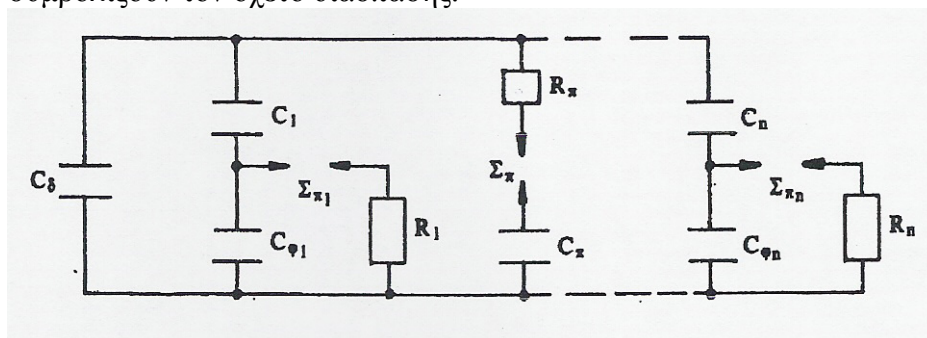
$\Sigma \pi_1 \dots \Sigma \pi_n$  : σπινθηριστές που συμβολίζουν τη διάσπαση των  $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$

$R_1 \dots R_n$  : αντίσταση του τόξου κατά τη διάσπαση  $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$

$C_1 \dots C_n$  : πυκνωτές που συμβολίζουν το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού

Από τον συνδυασμό ηλεκτρικών μετρήσεων και οπτικών παρατηρήσεων, κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών (κυρίως φορτίο λόγω μερικών εκκενώσεων, μετρήσεις ρεύματος, εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη και εικόνα επιφανειακών διαταραχών), έχουν προταθεί διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα, ώστε να αποδίδονται από αυτά και άλλοι παράγοντες γήρανσης και διάσπασης. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά το σχήμα 4.5 -2 είναι μια βελτίωση του προηγούμενου, γιατί διευκολύνει στη διάκριση μεταξύ της διάσπασης λόγω μερικών εκκενώσεων

(ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση) και εκείνης από τις δυνάμεις Coulomb (ηλεκτρομηχανική διάσπαση: δένδροειδής ή υπό μορφή οχετού), σε μία ιδιαίτερα πολωμένη περιοχή του υλικού (πυκνωτής  $C_\pi$ ). Η αντίσταση  $R_\pi$  και ο σπινθηριστής  $\Sigma_\pi$  συμβολίζουν τον οχετό διάσπασης.



**Σχήμα 4.5-2 :** Ισοδύναμο κύκλωμα για την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και τη διάσπαση λόγω των δυνάμεων Coulomb.

$C_\pi$  : ιδιαίτερα πολωμένη περιοχή του υλικού

$\Sigma_\pi$  και  $R_\pi$  : διαδρομή εκκένωσης λόγω διάσπασης του  $C_\pi$

$C_\delta, C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}, \Sigma_{\pi 1} \dots \Sigma_{\pi n}, C_1 \dots C_n$  και  $R_1 \dots R_n$  όπως στο σχήμα 4.5 -1

#### 4.6 Οι μερικές εκκενώσεις

Στα πορώδη μονωτικά όπως η μίκα, τα κεραμικά υλικά, το χαρτί κλπ., υπάρχουν εγκλείσματα αέρα που ιονίζεται με τάση πολύ χαμηλότερη από την τάση διάσπασης του μονωτικού. Ο ιονισμός αυτός προκαλεί μικρές τοπικές εκκενώσεις στο εσωτερικό του υλικού και με την πάροδο του χρόνου, τα ιόντα του αέρα που δημιουργούνται, βομβαρδίζουν και διασπούν στη συνέχεια το μονωτικό, χωρίς να έχει φθάσει η πεδιακή ένταση στα όρια της διηλεκτρικής αντοχής του. Επίσης, κατά την κατασκευή των μονωτικών υλικών είναι δυνατόν να υπάρξουν ξένες αγωγίμες προσμίξεις (υπό μορφή π.χ. ρινισμάτων). Επί της επιφάνειας αυτών προκαλείται ισχυρή συγκέντρωση των δυναμικών γραμμών (μεγάλη τιμή πεδιακής έντασης) και κατά συνέπεια διάσπαση του περιβάλλοντος μονωτικού υλικού. Για τον λόγο αυτό στις μετρήσεις για τη μελέτη της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών μονωτικών, τα δοκίμια είναι λεπτού πάχους ώστε να μην περιέχουν πολλές ανομοιογένειες ή κυρίως εγκλείσματα αέρα. Έτσι, οι τιμές των μετρήσεων δείχνουν τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού, αυτού καθαυτού, και όχι των ενδεχόμενων ανωμαλιών.

Οι παραπάνω εκκενώσεις ονομάζονται μερικές εκκενώσεις. Είναι γενικά ασθενείς σε ενέργεια και εμφανίζονται επί της επιφάνειας ή εντός της μάζας του μονωτικού (εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα των ερευνών για την χρονική εκδήλωση των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της κρουστικής τάσης, έχουν δείξει ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές κατά τη διάρκεια της ουράς της. Είναι δυνατόν να ανιχνευθούν από τα φωτεινά φαινόμενα που προκαλούν, τον ακουστικό θόρυβο ή και από τις ηλεκτρικές διαταραχές. Οι μερικές εκκενώσεις με την πάροδο του χρόνου επιφέρουν μεταβολές στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του μονωτικού υλικού, με συνέπεια την μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του. Εν ολίγοις, επιφέρουν την γήρανση του υλικού, το οποίο καταστρέφεται (υπό τάση λειτουργίας) σε χρόνο εξαρτώμενο από την ένταση των, εντός του μονωτικού υλικού, μερικών εκκενώσεων.

#### 4.7 Θερμική διάσπαση - θερμοχημική διάσπαση

Εκτός από τις παραπάνω μορφές διάσπασης γίνεται διάκριση και σε άλλες δύο: τη θερμική διάσπαση, από τις απώλειες Joule και τη θερμοχημική διάσπαση, από τη μεγάλη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το μικρής έντασης ρεύμα που διαρρέει το μονωτικό σώμα λόγω της αγωγιμότητας όγκου ή της επιφανειακής του αγωγιμότητας, κάτω από την επίδραση του επιβαλλόμενου πεδίου, η επαφή του με θερμά εξαρτήματα, και κυρίως η απορρόφηση ενέργειας με τους μηχανισμούς πόλωσης σε εναλλασσόμενα πεδία, μπορούν συχνά να προκαλέσουν μία σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του. Στις συνθήκες αυτές διευκολύνεται ο βομβαρδισμός των ατόμων από τα επιταχυνόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια και η διάσπαση πραγματοποιείται σε πολύ χαμηλότερη πεδιακή ένταση, σε σύγκριση με τις κανονικές συνθήκες ή το στατικό πεδίο. Αν δεν υπήρχε η θέρμανση από τους μηχανισμούς πόλωσης, θα έπρεπε η διηλεκτρική αντοχή των μονωτικών υλικών σε εναλλασσόμενο πεδίο να είναι μεγαλύτερη από του συνεχούς πεδίου, αφού η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων προς κάθε κατεύθυνση διαρκεί μόνο στο μισό της περιόδου. Αντίθετα τα μονωτικά υλικά παρουσιάζουν αυξημένη διηλεκτρική αντοχή στις σύντομες κρουστικές τάσεις, σε σύγκριση με το συνεχές πεδίο, διότι έτσι παρέχεται αρκετός χρόνος για την απαλλαγή του σώματος από τη θερμότητα, που θα είχε προέλθει Π.χ. από ένα ρεύμα διαρροής. Πάντως έχει παρατηρηθεί ότι η διηλεκτρική αντοχή των υλικών αυξάνει σε πολύ μεγάλες συχνότητες Π.χ. πάνω από 1 MHz. Η αιτία δεν είναι μόνο ότι όσο μεγαλώνει η συχνότητα τόσο λιγότεροι είναι οι μηχανισμοί πόλωσης που διεγείρονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η θέρμανση του σώματος, αλλά επίσης διότι η ταχεία εναλλαγή του πεδίου εμποδίζει τη μετακίνηση των φορτισμένων σωματιδίων σε όλο το μήκος της διαδρομής διαμέσου του πάχους του μονωτικού σώματος.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος προκαλεί μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, γιατί ενισχύεται ο ρόλος των υπολοίπων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και της ισχύος των μερικών εκκενώσεων).

Οι διάφορες μαθηματικές ερμηνείες της μακροσκοπικής θεωρίας βασίζονται κυρίως στη θερμοδυναμική σχέση:

$$P = P_a + C_o (d\theta/dt) \quad (4.7 -1)$$

όπου P η ηλεκτρική ισχύς,  $P_a$  η επαγόμενη θερμική ισχύς,  $C_o$  η θερμοχωρητικότητα του υλικού,  $\theta$  η αύξηση της θερμοκρασίας και t ο χρόνος.

Η μεταβολή της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \sigma_o e^{\beta\theta} / (1 - \delta E)^2 \quad (4.7 -2)$$

όπου  $\sigma_o$  η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας προ της καταπόνησης,  $\sigma$  η τιμή της μετά την καταπόνηση,  $\theta$  η αύξηση της θερμοκρασίας του υλικού και E η πεδιακή ένταση. Το  $\beta$  είναι ένας συντελεστής του υλικού ο οποίος εξαρτάται από την τιμή και την μορφή της τάσης, το χρόνο καταπόνησης, της συνθήκες του περιβάλλοντος και τη διάταξη των ηλεκτροδίων εφαρμογής της τάσης. Το  $\delta$  είναι ένας συντελεστής του υλικού για την συμμετοχή των μερικών εκκενώσεων στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής και εξαρτάται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν για τον συντελεστή  $\beta$ .

Με τη βοήθεια των παραπάνω σχέσεων μπορούν να διατυπωθούν μαθηματικές σχέσεις, τόσο για τις θεωρητικές μορφές διάσπασης όσο και για



διάφορους συνδυασμούς τους. Αν και οι σχέσεις αυτές δεν εξυπηρετούν, χωρίς τη συμβολή πειραματικών αποτελεσμάτων, σε κάποιους υπολογισμούς, συμπληρώνουν την ερμηνεία των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης, που δίνονται από τα διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα.

#### 4.8 Κβαντομηχανική θεωρία της διάσπασης

Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi, των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για το μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η γήρανση και η διάσπαση, κατά τη θεωρία αυτή, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες. Το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές αρκετά μεγαλύτερες από 20 eV.

Καθοριστικός παράγοντας για τη δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 3,5...4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου  $\sim 0,2$  MV/cm. Για τιμές του πεδίου μέχρι  $-0,5$  MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση:

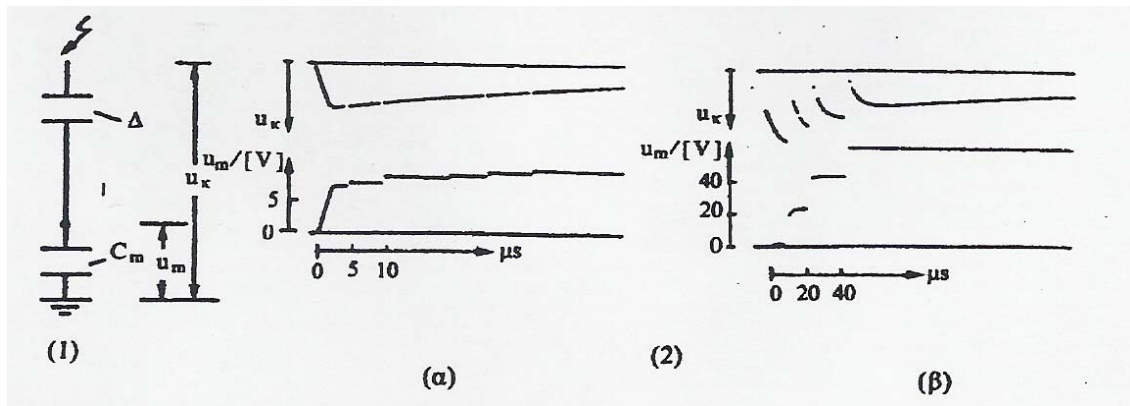
$$\sigma = \sigma_0 e^{(-W/kT)} \quad (4.8-1)$$

όπου  $k$  η σταθερά Boltzmann,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία και  $W$  η ενέργεια ενεργοποίησης των ηλεκτρονίων.

Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (4.8 -1). Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό, λόγω της οποίας γίνεται η συλλογή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από τα ηλεκτρόδια υπό μορφή ομάδων. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια.

#### 4.9 Παράδειγμα μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης

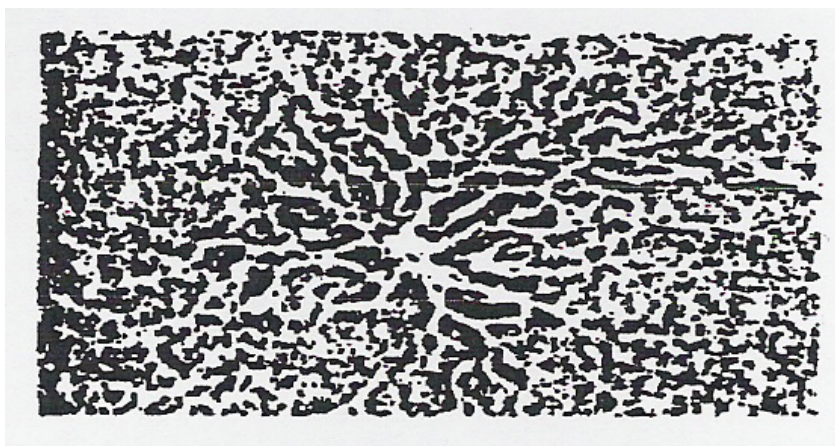
Στο σχήμα 4.9 -1 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα, για τη γήρανση και τη διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου (παλμογράφημα  $\alpha$  : γήρανση του βακελίτη, παλμογράφημα  $\beta$  : διάσπαση του pertinax)



**Σχήμα 4.9 -1 :** Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών.

- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης (  $U_{\kappa}$  στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης,  $\Delta$  δοκίμιο,  $U_m$  τάση στον πυκνωτή μέτρησης  $C_m$ )
- 2) Μετρήσεις με κρουστικές τάσεις της μορφής 10/200  $\mu s$ 
  - (α) γήρανση (τιμή πεδίου 1,11 MV/cm,  $\hat{U}_{\kappa} = 77.5$  kV,  $C_m = 210$  nF υλικό: βακελίτης)
  - (β) διάτρηση (τιμή πεδίου 1,20 MV/cm,  $\hat{U}_{\kappa} = 85,0$  kV,  $C_m = 210$  nF υλικό: pertinax)

. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώνεται ότι, μετά από μια τιμή  $\hat{U}_{\kappa} \sim 45$  kV (όπου  $\hat{U}_{\kappa}$  η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης) εκδηλώνεται κατά τη γήρανση επιφανειακός δένδριτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται, στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής (σχήμα 4.9 -2). Κατά τη διάτρηση δεν εκδηλώνεται επιφανειακός δένδριτης, αλλά ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η εικόνα, που παρουσιάζουν τα δοκίμια μετά τη διάτρηση, είναι μια μικρή τρύπα (μικρότερη από 1mm) πλησίον της ακίδας.



**Σχήμα 4.9-2 :** Αλλαγή της μοριακής δομής στην επιφάνεια του μονωτικού pertinax κατά την εκδήλωση επιφανειακού δένδριτη (μετά από πολλές κρούσεις 10/200  $\mu s$ , μέγιστης τιμής 75 kV.

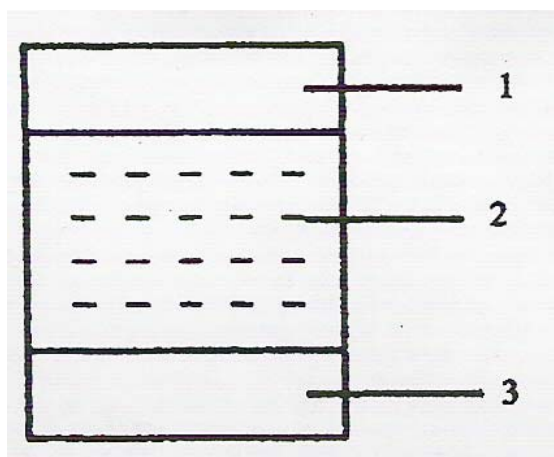
Οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνεύονται από τις δύο θεωρίες, που προαναφέρθηκαν, ως ακολούθως:

#### α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Από το παλμογράφημα της γήρανσης (σχήμα 4.9 -1, α) φαίνονται ότι εκδηλώνονται εσωτερικές και εξωτερικές μερικές εκκενώσεις υπό μορφή αλμάτων δυναμικού (στο μέτωπο και στην ουρά της κρουστικής τάσης αντίστοιχα), τα οποία προκαλούνται, κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.2 -1 (ή του σχήματος 4.2 -2), από τη σταδιακή διάσπαση των πυκνωτών  $C_{φ1}... C_{φn}$ . Ο δενδρίτης μπορεί να ερμηνευτεί από τα παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα ως επέκταση του ίχνους της ακίδας μέχρι τις θέσεις διαταραχής, που διασπώνται. Η διάτρηση φαίνεται ότι συμβαίνει στη θέση διαταραχής, όπου η πεδιακή ένταση έχει τη μέγιστη τιμή της.

#### β) Κβαντομηχανική ερμηνεία

Κατά τη θεωρία αυτή ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από την ενέργεια Fermi του ηλεκτροδίου, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον,  $C_m$ , ανά άλμα δυναμικού. Η τιμή αυτή για το πρώτο άλμα δυναμικού κατά το σχήμα 4.9 -1, είναι περίπου 0,56 eV κατά τη γήρανση και 21,5 eV κατά τη διάτρηση. Από τις τιμές αυτές φαίνεται ότι η γήρανση και η διάτρηση των δοκιμίων σχετίζονται με ακτινοβολίες, που δεν μπορούν να ανιχνευθούν με μακροσκοπικές μεθόδους. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι θέσεις διαταραχής (κατά το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.2 -1 ή του σχήματος 4.2 -2, οι πυκνωτές  $C_{φ1}... C_{φn}$  αντιστοιχούν σε ενεργειακές ζώνες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του υλικού (σχήμα 4.9 -3)



**Σχήμα 4.9-3 :** Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού

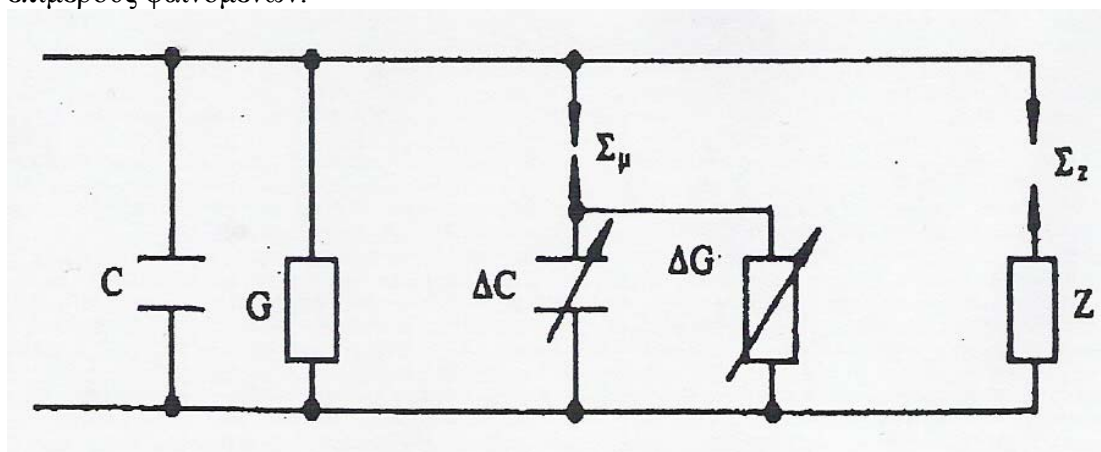
1 : ζώνη αγωγιμότητας

2 : ζώνες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη

3 : ζώνη σθένους

#### 4.10 Ο συνδυασμός μακροσκοπικής κβαντομηχανικής θεωρίας

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση χρειάζεται συνδυασμός των δύο θεωριών, που προαναφέρθηκαν. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο συνδυάζει τις παραπάνω θεωρίες δίνεται στο σχήμα 4.10 -1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Germant-Philipoff (σχήμα 4.5 -1) όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων.



**Σχήμα 4.10-1:** Ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και διάτρηση.

$C$  : ιδανική χωρητικότητα

$G$  : ιδανική αγωγιμότητα

$\Delta C$  : αύξηση της χωρητικότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων

$\Delta G$  : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω των μερικών εκκενώσεων

$Z$  : αρνητική διαφορική αντίσταση

$\Sigma_{\mu}$  : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων

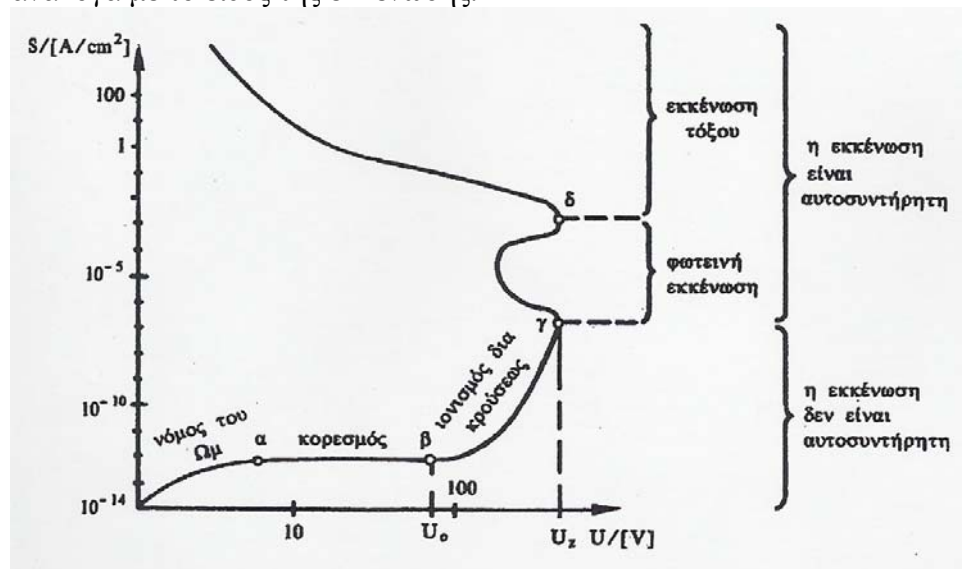
$\Sigma_Z$  : σπινθηριστής εκδήλωσης της  $Z$

Αν υποθέσουμε ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει για κάποια τιμή του πεδίου  $E_{\mu}$ , τότε τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο στερεό μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.10 -1 ως ακολούθως:

- 1) Για  $E < E_{\mu}$  : η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές  $\Sigma_{\mu}$  και  $\Sigma_Z$ ).
- 2) Για  $E > E_{\mu}$  : εκδήλωση μερικών εκκενώσεων (διασπάται ο  $\Sigma_{\mu}$ )
- 3) Για  $E \gg E_{\mu}$  : οι μερικές εκκενώσεις προκαλούν την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή  $E_{\mu}$ . Για τιμές  $> 20$  eV συμβαίνει η διάτρηση.

#### 4.11 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Από μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, τα οποία εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των αερίων μονωτικών, έχει ιδιαίτερη σημασία η χαρακτηριστική "ρεύματος - τάσης", κατά την καταπόνηση με εναλλασσόμενες τάσεις υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (760 Torr, 20°C). Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται προσεγγιστικά στο σχήμα 4.11 -1, για την πυκνότητα ροής (S), ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U). Στην χαρακτηριστική αυτή επισημαίνονται δυο βασικές περιοχές τιμών της ροής S (αυτοσυντηρούμενη και μη αυτοσυντηρούμενη) και διάφορες υποπεριοχές τους, ανάλογα με το είδος της εκκένωσης.



**Σχήμα 4.11-1 :** Χαρακτηριστική "τάσης - πυκνότητας ροής" ενός αερίου υπό κανονικές συνθήκες κατά G. Orberdorffer.

$U_0$  : αρχική τάση

$U_z$  : τάση έναυσης

S : πυκνότητα ροής

Για πολύ μικρές τιμές του εφαρμοζόμενου πεδίου η ροή του ρεύματος ακολουθεί το γνωστό νόμο του Ohm. Έτσι, στο ωμικό τμήμα της χαρακτηριστικής ισχύει για την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων η έννοια της κινητικότητας (b), όπως και στα μέταλλα σχέση 1.5 -2. Με τη διάφορα ότι, ενώ η κινητικότητα στα μέταλλα είναι περίπου  $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ , στον αέρα υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ίση προς  $500 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$  και για τα ελεύθερα αρνητικά ιόντα ίση προς  $1,5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$ .

Για μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, αυξάνει η συμμετοχή των προϋπαρχόντων (αρχικών) ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Φαίνεται όμως, ότι συμβαίνουν αλληλοεξουδετερώσεις μεταξύ των αρχικών φορέων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια περιοχή κορεσμού της πυκνότητας ροής. Οι αλληλοεξουδετερώσεις που γίνονται στη μονάδα του χρόνου ( $dn/dt$ ), είναι ανάλογες προς τη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των ιόντων στη μονάδα του όγκου (n- και n+ αντίστοιχα). Με την εισαγωγή του συντελεστή αλληλεξουδετέρωσης ( $\xi$ ) έχει διατυπωθεί η σχέση:

$$\frac{dn}{dt} = -\xi n^- n^+ \quad (4.11-1)$$

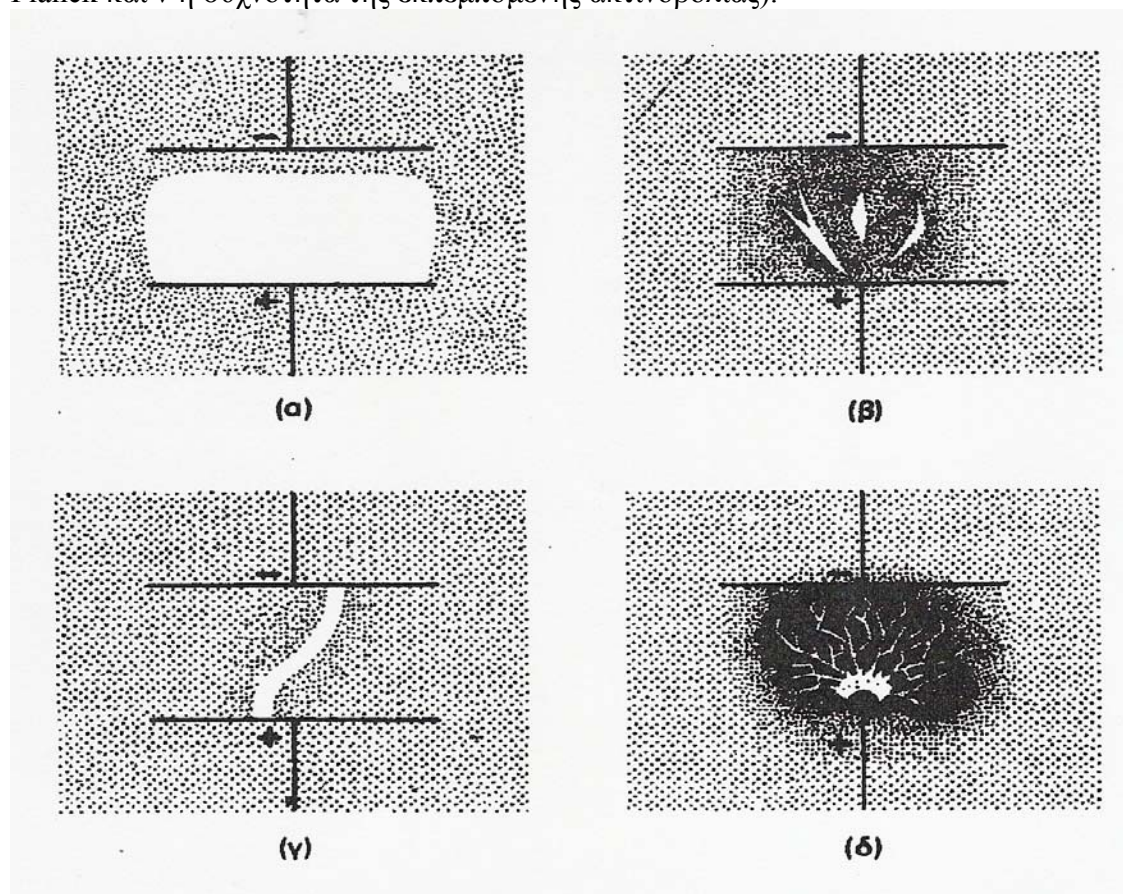


Για τον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι  $\xi = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Στο τμήμα της χαρακτηριστικής "βγ" η απότομη αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων οφείλεται στον ιονισμό με κρούσεις. Η έναρξη του ιονισμού συμβαίνει σε μια τιμή τάσης  $U_0$  που είναι η τάση έναρξης του ιονισμού με κρούσεις (φαινόμενο χιονοστιβάδας). Μέχρι προ του σημείου αυτού ο ιονισμός δεν είναι αυτοσυντηρούμενος. Απαιτείται το εξωτερικά εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο για να υπάρχει μία σταθερή παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ανάλογα με την ενεργό τιμή της πεδιακής έντασης), που καθορίζουν τη ροή του ρεύματος.

Από το σημείο "γ" (σημείο έναυσης και αντίστοιχα τάση έναυσης  $U_z$ ) και μετά, η αύξηση του ρεύματος προκαλεί μείωση της τάσης και λαμβάνει χώρα η διάσπαση, η οποία είναι η φυσική κατάληξη του ιονισμού με κρούσεις (οι αρχικές χιονοστιβάδες ηλεκτρονίων έχουν προκαλέσει δευτερεύουσες και ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων έχει γίνει πολύ μεγάλος). Μία συνεχής αλυσίδα από χιονοστιβάδες δημιουργεί μια αυτοσυντηρούμενη ηλεκτρική εκκένωση (ηλεκτρικό τόξο).

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό προ και κατά τη διάσπαση μπορούν να αναζητηθούν από την ενέργεια των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους, στην άνοδο. Όταν οι παραγόμενοι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς συλλέγονται από τα ετερόνυμα προς αυτούς, ηλεκτρόδια, αποδίδουν το περίσσειμα της ενέργειάς τους (πάνω από τη ζώνη Fermi) με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ( $h\nu$ , όπου  $h$  η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας).



**Σχήμα 4.11-2 :** Διάφορες μορφές ηλεκτρικών εκκενώσεων σε αέρια μονωτικά, ανάλογα με την πίεση του αερίου, τη θερμοκρασία των ηλεκτροδίων,

την ένταση του πεδίου.

(α) Εκκένωση αίγλης

(β) Εκκένωση θυσάνου σε μορφή σπινθήρα

(γ) Εκκένωση ηλεκτρικού τόξου

(δ) Στεμματόμορφη εκκένωση

#### **4.12 Συνθήκες χαμηλής πίεσης και διάσπαση στο κενό**

Σε πιέσεις αερίου  $10^{-4}$  bar, το μέσο μήκος της ελεύθερης διαδρομής των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι της τάξης του ενός μέτρου, με αποτέλεσμα σε ένα διάκενο μερικών χιλιοστών, οσαδήποτε ηλεκτρόνια είναι παρόντα θα διανύουν το διάκενο χωρίς να υποστούν ούτε μία σύγκρουση με κάποιο από τα μόρια του αερίου. Έτσι δεν είναι δυνατόν να εμφανιστεί διάσπαση με τον μηχανισμό της χιονοστιβάδας που προαναφέρθηκε. Αρκετοί διαφορετικοί μηχανισμοί της ηλεκτρικής διάσπασης στο κενό έχουν προταθεί. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί αναφέρονται στην απελευθέρωση κάποιου αερίου ή υδρατμού μέσα από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα η διάσπαση να λαμβάνει χώρα μέσα σε αυτό το συγκεκριμένο αέριο ή υδρατμό. Η ηλεκτρική διάσπαση στο κενό χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές απαιτούμενης έντασης ηλεκτρικού πεδίου Π.χ. 30 kV/mm για ένα διάκενο μήκους 10mm.

Οι τάσεις διάσπασης στο κενό εμφανίζουν έντονα το φαινόμενο συσχέτισης και προϊστορίας του μέσου, με αποτέλεσμα επαναλαμβανόμενες μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε δεδομένο διάκενο να δίνουν σταδιακά αυξανόμενες τιμές για την τάση διάσπασης έως ότου επιτευχθεί μία ανώτατη τιμή. Το υλικό της καθόδου έχει σημαντική επίδραση καθώς τα σκληρά υλικά (όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας) δίνουν τάση διάσπασης τρεις φορές μεγαλύτερη από άλλα μαλακά (όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο).





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

- 5.1 Εργαστηριακός έλεγχος των μονωτικών υλικών
- 5.2 Πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων
- 5.3 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση
- 5.4 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών
- 5.5 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση
- 5.6 Η διάταξη των ηλεκτροδίων

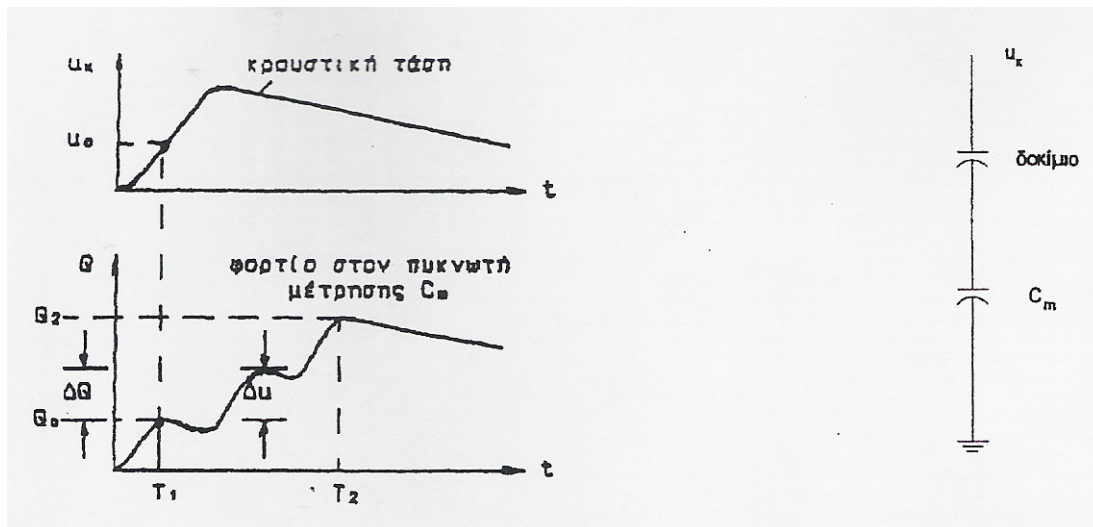
### **5.1 Εργαστηριακός έλεγχος των μονωτικών υλικών**

Η αξιοπιστία και η καλή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται τις περισσότερες φορές, από την σωστή επιλογή των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες ηλεκτρολογικές διατάξεις. Έτσι, η αστοχία της μόνωσης σε έναν μετασχηματιστή μεταφοράς ή διανομής, μπορεί να προκαλέσει πληθώρα προβλημάτων με αλυσιδωτές αντιδράσεις. Η διακοπή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία τσιμεντοβιομηχανία ή σε ένα διυλιστήριο, ακόμα και για λίγες ώρες, έχει μεγάλο οικονομικό αντίκτυπο. Επίσης, η ασφάλεια των εργαζομένων που έρχονται σε επαφή με ηλεκτρολογικές διατάξεις (πίνακες χειρισμών, εναέριες γραμμές κλπ.) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της κατάλληλης μόνωσης. Τέλος, με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ο χρόνος ζωής των μονωτικών υλικών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, και να προγραμματιστεί έγκαιρα η αντικατάστασή τους.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται φανερή η ανάγκη για τον εργαστηριακό έλεγχο των μονωτικών υλικών, τόσο για την αποφυγή δυσάρεστων καταστάσεων όσο και για την βελτίωση των χαρακτηριστικών τους με την χρησιμοποίηση σύγχρονων υλικών για την κατασκευή τους. Η εμπειρία από την πράξη και οι εργαστηριακές μετρήσεις διερεύνησης των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης των μονώσεων αποτελούν τις πηγές πληροφόρησης για την βελτίωση των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών. Οι διαδικασίες, που εφαρμόζονται για τις εργαστηριακές μετρήσεις διερεύνησης των παραπάνω φαινομένων δεν αποτελούν κάποια προδιαγεγραμμένη μεθοδολογία. Προϋποθέτουν όμως, για το αντικείμενο που εξετάζεται, τη γνώση των ερευνών που έχουν γίνει, καθώς και την εμπειρία στο εργαστήριο και τις πρακτικές εφαρμογές.

### **5.2 Πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων**

Για την πειραματική έρευνα των μερικών εκκενώσεων, μέσω παλμογραφημάτων (ή μετρήσεων ... των κυματομορφών σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω αναλογικού - ψηφιακού μετατροπέα), έχουν προταθεί διάφορες έννοιες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2 -1, για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με ανάλογο τρόπο μπορούν να καθοριστούν και άλλα μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση των μονωτικών υλικών με διαφορετικές μορφές τάσης. Στο σχήμα 5.2 -3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



**Σχήμα 5.2-1 :** Παράδειγμα καθορισμού εννοιών για την μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά, υπό κρουστική τάση καταπόνησης.

$T_1$  : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$T_2$  : Χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$Q_0$ : Φορτίο έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$Q_2$  : Φορτίο περαίωσης των μερικών εκκενώσεων

$U_k$ : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

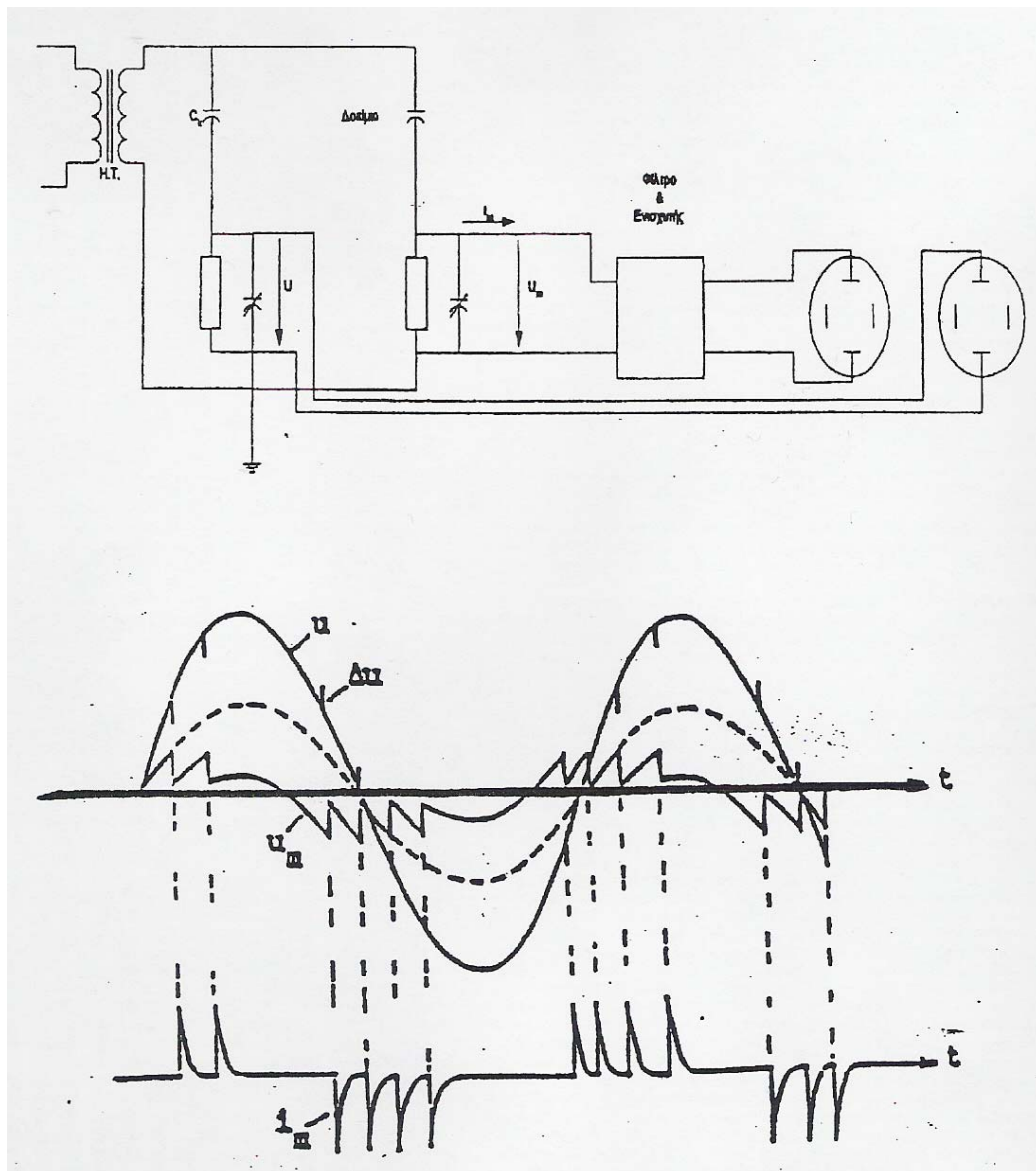
$U_0$  : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή)

$\Delta u$  : Άλμα δυναμικού

$\Delta Q$  : Αύξηση φορτίου

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως: η χαρακτηριστική  $Q = f(\hat{U}_k)$  η χαρακτηριστική  $U_0 = f(\hat{U}_k)$  ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης κλπ. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμίων. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική  $Q = f(\hat{U}_k)$  η οποία φαίνεται να είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 5.2-5), με αποκλίσεις

από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως οι δυνάμεις Coulomb. Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών υλικών με κρουστικές τάσεις της μορφής  $1,2/50 \mu s$  ή  $10/200 \mu s$  παρατηρούνται μηχανικές κακώσεις στο υλικό οι οποίες αποδίδονται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Τέλος, στο σχήμα 5.2-4 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης δείγματος pertinax, πάχους 2 mm, όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90η κρούση, ως προς την 60η. Από ταυτόχρονες παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών, εύκολα διαπιστώνεται, ότι η μείωση των αλμάτων δυναμικού (και επομένως του φορτίου  $Q$  στον πυκνωτή μέτρησης) σχετίζεται με τις μηχανικές κακώσεις στην επιφάνεια του μονωτικού.



Σχήμα 5.2-2 : Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού - χωρητικού" τετραπόλου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης

Ck : Πυκνωτής υψηλής τάσης

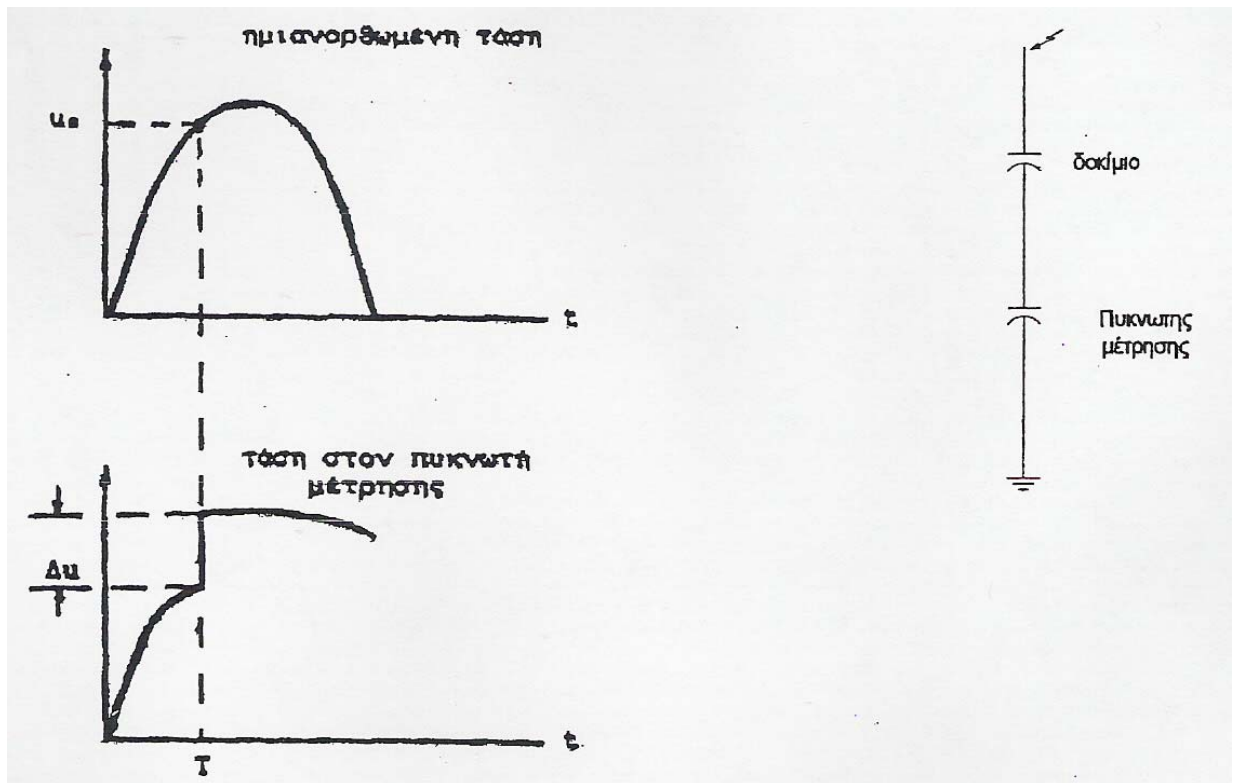
$u$  : Στιγμιαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης

$u_m$  : Στιγμιαία τιμή της τάσης στο ωμικό - χωρητικό τετράπολο μέτρησης των μερικών εκκενώσεων

$u_k$  : Στιγμιαία τιμή της εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης

$I_m$  : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων

$\Delta u$  : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων

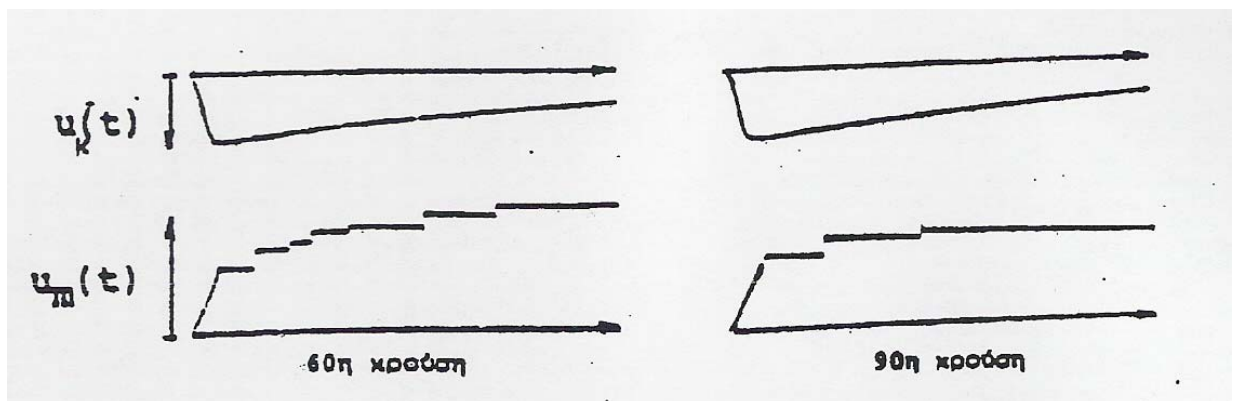


Σχήμα 5.2 -3 : Παράδειγμα καθορισμού εννοιών για την μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά υλικά, υπό ημιανορθωμένη τάση.

$T$  : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων

$u_0$  : Τάση έναρξης

$\Delta u$  : Άλμα δυναμικού



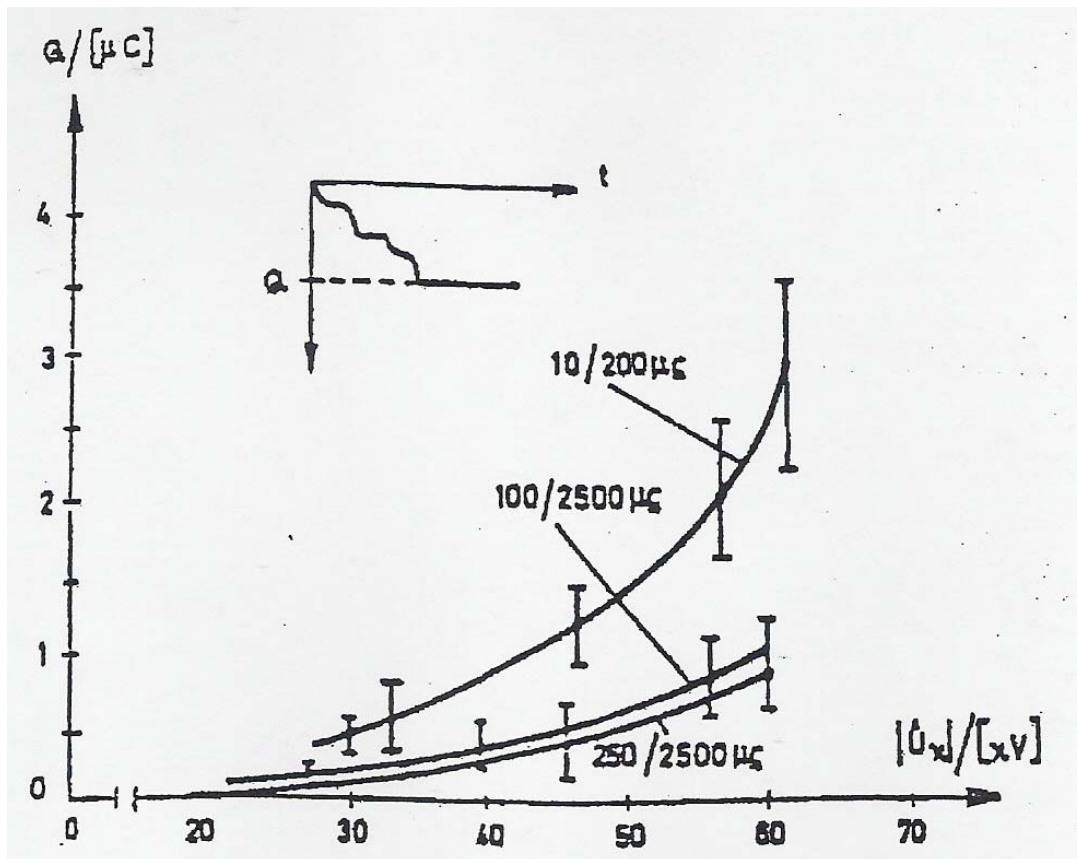
Σχήμα 5.2-4 : Άλματα δυναμικού κατά την 60η και 90η κρούση σε μονωτικό υλικό pertinax πάχους 2mm.

Μορφή τάσης : 1,2/50  $\mu s$ ,  $U_k = 99,7$  kV

Περιβάλλον μέσο : Μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων : Ακίδα - πλάκα

$C_m$  : 210 nF



Σχήμα 5.2 -5 : Χαρακτηριστική  $Q = f(|U_k|)$  για μονωτικό υλικό βακελίτη πάχους

2mm, υπό κρουστική τάση 10/200  $\mu s$ , 100/200  $\mu s$  και 250/2500  $\mu s$ .

Περιβάλλον μέσο : Μονωτικό λάδι

Διάταξη ηλεκτροδίων : Ακίδα – πλάκα

$C_m$  : 1000 nF

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα των ερευνών του είδους αυτού, είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, στο μονωτικό υλικό. Έχει διαπιστωθεί ότι :

**α)** οι εσωτερικές μερικές, εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης, ή γενικότερα στην περιοχή μέγιστης χρονικής μεταβολής της.

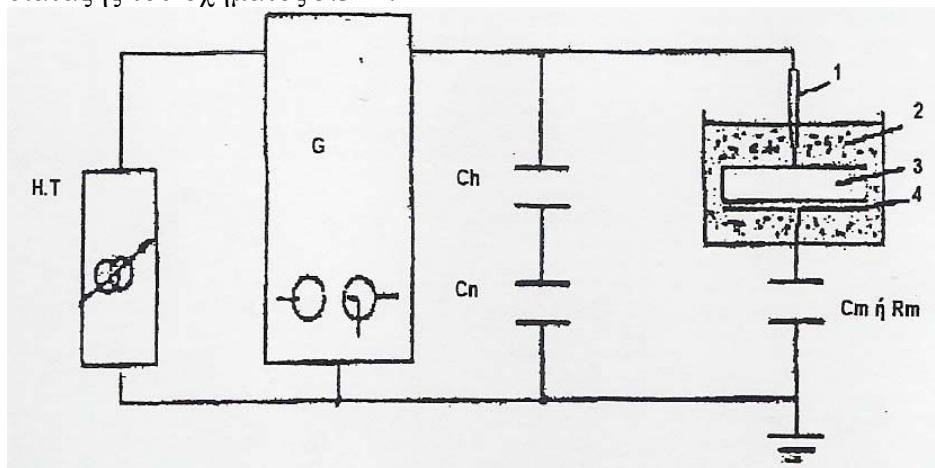
**β)** οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

Τα παραπάνω, στην περίπτωση κρουστικών τάσεων σημαίνουν ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου, ενώ οι εξωτερικές κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.

### 5.3 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση

Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις μονωτικών υλικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5...4,5. Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής 1,2/50  $\mu$ s, 10/200  $\mu$ s, 250/2500  $\mu$ s. Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις.

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις με χρήση της διάταξης του σχήματος 5.3 -1.



**Σχήμα 5.3 -1** Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις.

H.T.	: Μετασχηματιστής υψηλής τάσης
G	: Γεννήτρια κρουστικών τάσεων
$C_H$ & $C_N$	: Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης
1	: Ηλεκτρόδιο ακίδα
2	: Μονωτικό λάδι
3	: Δοκίμιο
4	: Ηλεκτρόδιο πλάκα
$C_m$	: Πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού
$R_m$	: Αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου

Κατά την κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρουν τα ενεργειακά επίπεδα των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων και όχι ο διαχωρισμός των τελευταίων σε εσωτερικές και εξωτερικές. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), πάνω από τη στάθμη Fermi, μπορεί να υπολογιστεί από την ενέργεια στον πυκνωτή μέτρησης  $C_m$  ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση:

$$W = 0,5 q_e \Delta v \quad (5.3 -1)$$

όπου  $q_e$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $\Delta v$  το άλμα δυναμικού.

Η σχέση 5.3 -1 ισχύει για μηδενική τιμή της ωμικής αντίστασης  $R$ , από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης. Για  $R > 0$  θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη το μεταβατικό φαινόμενο με σταθερά χρόνου:



$$\tau = R C_m \quad (5.3 -2)$$

οπότε με βάση τα παραπάνω, η ενέργεια θα είναι :

$$W = \frac{0,5\Delta u}{1 - e^{-\left[\frac{t}{RC_m}\right]}} \quad (5.3 -3)$$

όπου  $\Delta u$  σε volt και.  $t$  ο χρόνος φόρτισης του  $C_m$  κατά τη διάρκεια μίας μερικής εκκένωσης (περίπου 100 ns).

Για μία αντίσταση  $R = 0,5 \, \Omega$  ο συντελεστής διόρθωσης  $k$  :

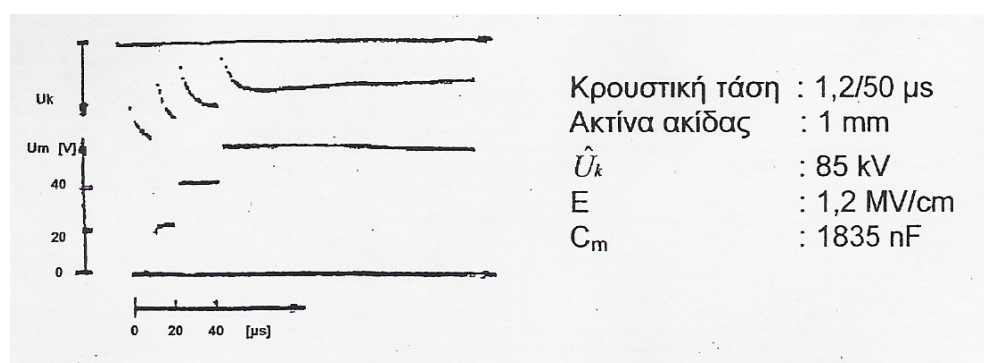
$$k = \frac{1}{1 - e^{-\left[\frac{t}{RC_m}\right]}} \quad (5.3 -4)$$

δίνεται στον Πίνακα 5.3 -1 ι για χωρικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις.

**Πίνακα 5.3 -1 :** Ο συντελεστής διόρθωσης  $k$  ανάλογα με τον πυκνωτή μέτρησης,  $C_m$

$C_m$ [nF]	10	20	210	1000	1835
συντελεστής διόρθωσης $k$	1	1	1,62	5,51	9,6

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, υπολογίζεται η ενέργεια  $W$ , των ελεύθερων ηλεκτρονίων, κατά το πρώτο άλμα δυναμικού όπως φαίνεται στο παλμογράφημα του σχήματος 5.3 -2. .



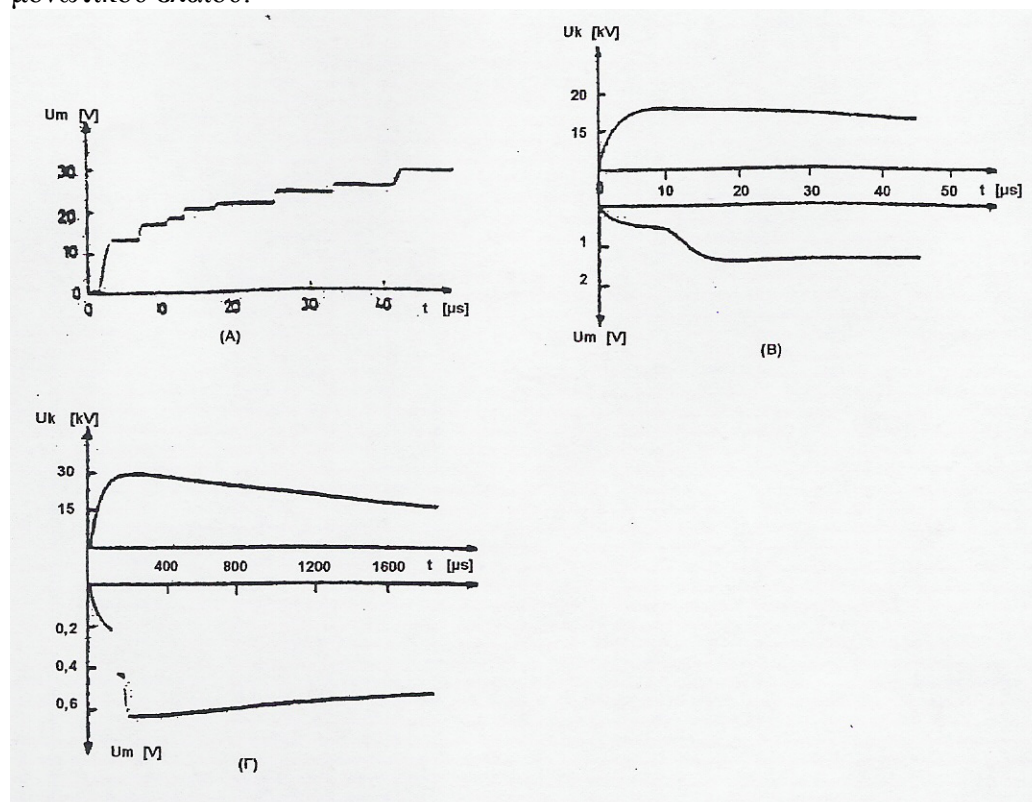
**Σχήμα 5.3-2 :** Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου..

Η ενέργεια  $W$  υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105 eV, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η διάτρηση των στερεών μονωτικών υλικών σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



#### 5.4 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών

Στο σχήμα 5.4 -1 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών μονωτικών υλικών, με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου.



Σχήμα 5.4 -1 : Παλμογραφήματα στερεών μονωτικών κατά την τεχνητή γήρανση.

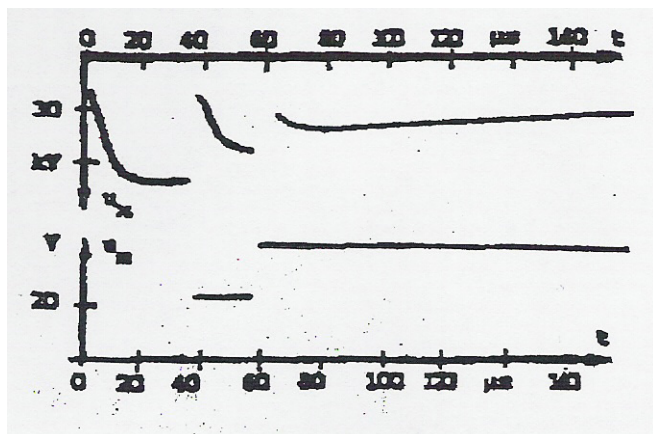
	(Α)	(Β)	(Γ)
Κρουστική τάση	1,2/50 $\mu\text{s}$	10/200 $\mu\text{s}$	250/2500 $\mu\text{s}$
$\hat{U}_k$ [kV]	70	26,6	70
E [MV/cm]	0,80	0,38	0,80
$C_m$ [nF]	1835	210	1835

Με βάση την σχέση 5.3 -3 και τον πίνακα 5.3 -1, υπολογίζουμε την ενέργεια W, των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Έτσι έχουμε 10.50, 1.6 και 0.16 eV για τα αντίστοιχα (Α), (Β) και (Γ) παλμογραφήματα του σχήματος 5.4 -1. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από υπεριώδεις ως και υπέρυθρες ακτίνες.

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται κατά την πραγματοποίηση πειραμάτων γήρανσης και διάτρησης, στα στερεά μονωτικά υλικά, εξαρτάται σημαντικά από τον συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης των ηλεκτροδίων. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται το εύρος της παραπάνω ακτινοβολίας. Όταν η ακίδα έχει Π.χ. ακτίνα καμπυλότητας 0,3 mm (αντί για 1 mm) τότε, όπως έχει διαπιστωθεί και πειραματικά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.

### 5.5 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

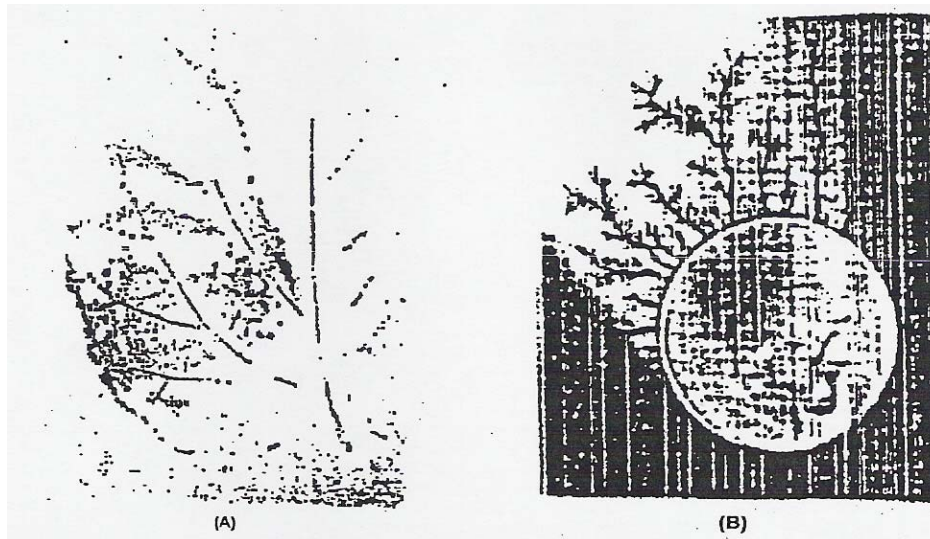
Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου' ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι η ο μηχανισμός είναι ο ίδιος με αυτόν της γήρανσης και της διάτρησης. Στο σχήμα 5.5 -1 φαίνεται το παλμογράφημα από την επιφανειακή διάσπαση στερεού μονωτικού σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων όπως στο σχήμα 5.3 -1. Από το παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης και τη σχέση 5.3 -3 υπολογίζεται η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων για το πρώτο και τελευταίο άλμα δυναμικού. Η ενέργεια είναι αντίστοιχα 122 eV και 96,5 eV. Επομένως, η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται, όπως και η διάτρηση, με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



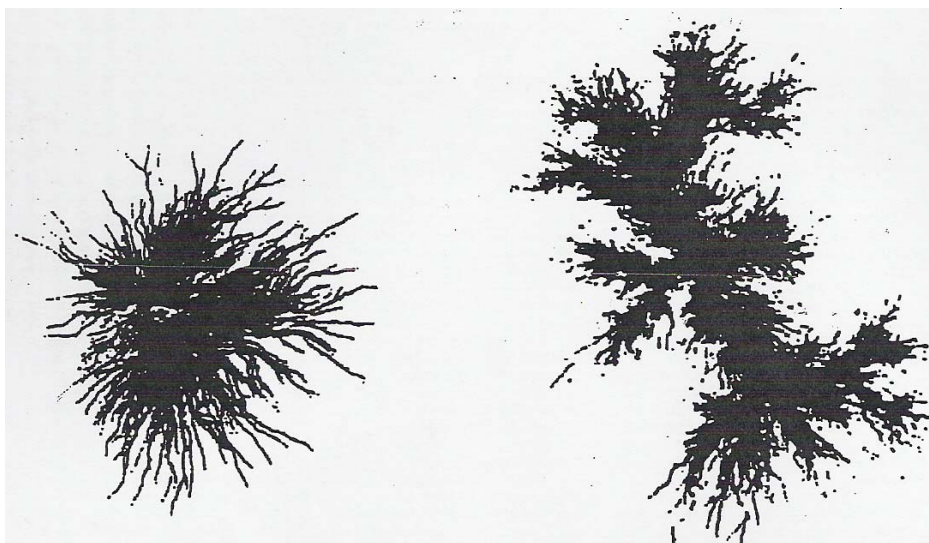
Σχήμα 5.5-1 : Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax πάχους 2 mm και διαμέτρου 150 mm, υπό κρουστική τάση 10/200  $\mu$ s.

Αφού η διάσπαση και η διάτρηση συνοδεύονται από την εκπομπή μαλακών ακτίνων X, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα, όπως ακριβώς συμβαίνει με τις λυχνίες στα ακτινολογικά μηχανήματα.

Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και μπορούν να απεικονιστούν αντικείμενα και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 5.5 -2 (Α) και (Β) δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες. Επίσης στο σχήμα 5.5 -3 δίνονται οι φωτογραφίες δενδρίτη κατά την επιφανειακή διάσπαση.



**Σχήμα 5.5-2 :** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση  $1,2/50 \mu s$ .  
 (A) Φύλλο δέντρου  
 (B) Μεταλλικό κέρμα



**Σχήμα 5.5-3 :** Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση στερεού μονωτικού στο αέρα υπό κρουστική τάση  $1,2/50 \mu s$ .  
 (A) : Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση.  
 (B) : Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

## 5.6 Η Διάταξη των ηλεκτροδίων

Η διάταξη των ηλεκτροδίων παίζει καθοριστικό ρόλο σε μια εργαστηριακή δοκιμή, διότι καθορίζει την μορφή του αναπτυσσόμενου πεδίου. Μία συχνά χρησιμοποιούμενη διάταξη, σε πολλές δοκιμές και ελέγχους μονωτικών υλικών, είναι ένα πυκνωτής με ηλεκτρόδια ακίδα - πλάκα και διηλεκτρικό το υπό εξέταση μονωτικό. Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος στην περίπτωση αυτή είναι η ακτίνα καμπυλότητας, αφού με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η μορφή και η ένταση του πεδίου. Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας τόσο αυξάνει η μέγιστη τιμή του πεδίου. Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός της πεδιακής έντασης στην ακίδα μπορεί να γίνει από τη σχέση:

$$E = \frac{2U}{\left[ r * \ln\left(\frac{4d}{r}\right) \right]} \quad (5.6 -1)$$

όπου d το πάχος του δοκιμίου σε mm, r η ακτίνα καμπυλότητας και u η τάση που εφαρμόζεται κάθε φορά.



**Σχήμα 5.6 -1 :** Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα - πλάκα.

d : απόσταση ακίδας - πλάκας.

R : ακτίνα καμπυλότητας ακίδας.

Η παραπάνω διάταξη των ηλεκτροδίων ενδείκνυται για ερευνητικούς σκοπούς περισσότερο από κάθε άλλη, γιατί δίνει τη δυνατότητα έρευνας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης στη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών. Ανάλογα με τη φύση του προβλήματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλες διατάξεις των ηλεκτροδίων όπως: ακίδα -ακίδα, πλάκα -πλάκα. Οι ακριβείς διαστάσεις της διάταξης ακίδας - πλάκας, καθώς και το υλικό κατασκευής τους, καθορίζονται από διεθνείς κανονισμούς ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- 6.1 Τυπολόγιο
- 6.2 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 20^\circ\text{C}$ 
  - Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας
  - Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας
- 6.3 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 40^\circ\text{C}$ 
  - Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας
  - Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας
- 6.4 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 80^\circ\text{C}$ 
  - Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας
  - Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας
- 6.5 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 20^\circ\text{C}$ 
  - Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας
  - Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας
- 6.6 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 40^\circ\text{C}$ 
  - Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας
  - Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας
- 6.7 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 80^\circ\text{C}$ 
  - Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας
  - Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας
- 6.8 Σχεδιαγράμματα
- 6.9 Συμπεράσματα και σχόλια

## 6.1 Τυπολόγιο

Με τη βοήθεια της εργαστηριακής διάταξης λαμβάνομαι τιμές για την κρουστική τάση  $U_k$  σε kV, τα φορτία  $Q_1$  και  $Q_2$  σε  $\mu C$  ( οπότε και υπολογίζουμε το φορτίο  $\Delta Q$  που οφείλεται στις μερικές εκκενώσεις). Στη συνέχεια, με τη βοήθεια των παρακάτω μαθηματικών σχέσεων υπολογίζουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ , τη συχνότητα  $f$ , το μήκος κύματος  $\lambda$ , την ταχύτητα  $V$ , την κινητικότητα  $b$ , την ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  και την πυκνότητα ροής  $J$  :

$$\Delta Q = C_m * \Delta U_m \Rightarrow \Delta U_m = \frac{\Delta Q}{C_m} \quad (6.1-1)$$

$$\Delta W = 1/2(\Delta U_m * \kappa) = (1/2) \frac{\Delta Q}{C_m} * \kappa \text{ σε eV} \quad (6.1-2)$$

$$\Delta W = h * f = h * \frac{c}{\lambda} \quad (6.1-3)$$

Από (6.1-2) και (6.1-3) έχουμε για την συχνότητα  $f$  και το μήκος κύματος  $\lambda$ :

$$f = \frac{1}{2} \frac{\Delta Q}{C_m} * \kappa * (1/h) \quad (6.1-4)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = 2 * c * \frac{C_m}{\Delta Q} * h * \kappa \quad (6.1-5)$$

$$E = \frac{2 * U_k}{R * \ln\left(\frac{4d}{R}\right)} \quad \text{σε MV/cm} \quad (6.1-6)$$

$$U = Q/C \quad (6.1-7)$$

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta W}{m_0}} \quad (6.1-8)$$

$$b = \frac{V}{E} \quad (6.1-9)$$

$$\sigma = \Delta Q * b \quad (6.1-10)$$

$$J = \sigma * E \quad (6.1-11)$$

$$N = \frac{\Delta Q}{q_e} \quad (6.1-12)$$

$$\Delta C = \frac{\Delta Q}{U_k} \quad (6.1-13)$$

Στις παραπάνω σχέσεις εμφανίζονται οι εξής σταθερές:

- Σταθερά Plank :  $h = 6.626075 * 10^{-34}$  Joule sec
- Μάζα ηρεμίας:  $m_0 = 9.1 * 10^{-31}$  kg
- Ταχύτητα φωτός:  $c = 2.99792458 * 10^8$  m/sec
- Συντελεστής διόρθωσης:  $\kappa$
- Πυκνωτής μετρήσεων:  $C_m$
- Πάχος δοκιμίου  $d$  σε mm
- Ακτίνα καμπυλότητας ακίδας :  $R = 0.9$  mm
- $1\text{eV} = 1.602177 * 10^{-19}$  Joule

## 6.2 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 1 \text{ mm}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$

### Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

$U_k$ (KV)	$E$ (MV/cm)	$C_m$ (nF)	$\kappa$	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$\Delta U$ (V)
10,10	0,15	1000	5,51	0,015	-	-	0,02	-	-
10,10	0,15	1000	5,51	0,002	-	-	0,00	-	-
13,40	0,20	1000	5,51	0,019	0,028	0,0083	0,02	0,03	0,01
13,40	0,20	1000	5,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,80	0,25	1000	5,51	0,025	0,059	0,034	0,03	0,06	0,03
16,80	0,25	1000	5,51	0,002	0,006	0,006	0,00	0,01	0,01
20,10	0,30	1000	5,51	0,024	0,096	0,072	0,02	0,10	0,07
20,10	0,30	1000	5,51	0,003	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
23,40	0,35	1000	5,51	0,054	0,33	0,29	0,05	0,33	0,29
23,40	0,35	1000	5,51	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08
26,70	0,40	1000	5,51	0,067	0,74	0,67	0,07	0,74	0,67
26,70	0,40	1000	5,51	0,00	0,06	0,07	0,00	0,06	0,07
30,20	0,45	1000	5,51	0,067	1,03	0,96	0,07	1,03	0,96
30,20	0,45	1000	5,51	0,00	0,12	0,12	0,00	0,12	0,12
33,50	0,50	1000	5,51	0,067	1,51	1,44	0,07	1,51	1,44
33,50	0,50	1000	5,51	0,00	0,17	0,17	0,00	0,17	0,17
36,90	0,55	1000	5,51	0,067	1,99	1,93	0,07	1,99	1,93
36,90	0,55	1000	5,51	0,00	0,26	0,26	0,00	0,26	0,26
40,20	0,60	1000	5,51	0,13	3,14	3,00	0,13	3,14	3,00
40,20	0,60	1000	5,51	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50
43,60	0,65	1000	5,51	0,00	4,10	4,10	0,00	4,10	4,10
43,60	0,65	1000	5,51	0,00	0,41	0,41	0,00	0,41	0,41



$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ (10 <sup>6</sup> m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m/s)	$f$ (10 <sup>15</sup> /sec)	$b$ (m <sup>2</sup> /V*sec)	$\sigma$ (*10 <sup>-6</sup> )	$J$ (A/m <sup>2</sup> )	$N$ (*10 <sup>13</sup> )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,02	54,403	0,090	0,006	0,004	0,0000	0,001	0,005	0,001
0,01	225,771	0,044	0,001	0,002	0,0000	0,000	0,001	0,000
0,09	13,281	0,182	0,023	0,007	0,0002	0,006	0,021	0,002
0,02	75,257	0,076	0,004	0,003	0,0000	0,000	0,004	0,000
0,20	6,271	0,264	0,048	0,009	0,0006	0,019	0,045	0,004
0,03	45,154	0,098	0,007	0,003	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,80	1,557	0,530	0,193	0,015	0,0044	0,154	0,181	0,012
0,22	5,644	0,279	0,053	0,008	0,0006	0,022	0,050	0,003
1,85	0,674	0,806	0,445	0,020	0,0136	0,540	0,419	0,025
0,19	6,451	0,261	0,046	0,007	0,0005	0,018	0,044	0,003
2,64	0,470	0,965	0,637	0,021	0,0206	0,926	0,600	0,032
0,33	3,763	0,341	0,080	0,008	0,0009	0,041	0,075	0,004
3,97	0,314	1,182	0,956	0,024	0,0341	1,702	0,900	0,043
0,47	2,656	0,406	0,113	0,008	0,0014	0,069	0,106	0,005
5,32	0,234	1,368	1,281	0,025	0,0480	2,641	1,206	0,052
0,72	1,737	0,502	0,173	0,009	0,0024	0,131	0,163	0,007
8,27	0,151	1,706	1,992	0,028	0,0854	5,118	1,875	0,075
1,38	0,903	0,696	0,332	0,012	0,0058	0,348	0,313	0,012
11,30	0,110	1,994	2,722	0,031	0,1258	8,176	2,563	0,094
1,13	1,101	0,631	0,272	0,010	0,0040	0,259	0,256	0,009

### Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

Uκ (KV)	E (MV/cm)	Cm (nF)	κ	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔQ (μC)	U1 (V)	U2 (V)	ΔU (V)
10,10	0,15	1000	5,51	0,015	-	-	0,02	-	-
10,10	0,15	1000	5,51	0,002	-	-	0,00	-	-
13,40	0,20	1000	5,51	0,019	0,028	0,0083	0,02	0,03	0,01
13,40	0,20	1000	5,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,80	0,25	1000	5,51	0,025	0,059	0,034	0,03	0,06	0,03
16,80	0,25	1000	5,51	0,002	0,006	0,006	0,00	0,01	0,01
20,10	0,30	1000	5,51	0,024	0,096	0,072	0,02	0,10	0,07
20,10	0,30	1000	5,51	0,003	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
23,40	0,35	1000	5,51	0,054	0,33	0,29	0,05	0,33	0,29
23,40	0,35	1000	5,51	0,00	0,08	0,08	0,00	0,08	0,08
26,70	0,40	1000	5,51	0,067	0,74	0,67	0,07	0,74	0,67
26,70	0,40	1000	5,51	0,00	0,06	0,07	0,00	0,06	0,07
30,20	0,45	1000	5,51	0,067	1,03	0,96	0,07	1,03	0,96
30,20	0,45	1000	5,51	0,00	0,12	0,12	0,00	0,12	0,12
33,50	0,50	1000	5,51	0,067	1,51	1,44	0,07	1,51	1,44
33,50	0,50	1000	5,51	0,00	0,17	0,17	0,00	0,17	0,17
36,90	0,55	1000	5,51	0,067	1,99	1,93	0,07	1,99	1,93
36,90	0,55	1000	5,51	0,00	0,26	0,26	0,00	0,26	0,26
40,20	0,60	1000	5,51	0,13	3,14	3,00	0,13	3,14	3,00
40,20	0,60	1000	5,51	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50
43,60	0,65	1000	5,51	0,00	4,10	4,10	0,00	4,10	4,10
43,60	0,65	1000	5,51	0,00	0,41	0,41	0,00	0,41	0,41

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ (10 <sup>6</sup> m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m/s)	$f$ (10 <sup>15</sup> /sec)	$b$ (m <sup>2</sup> /V*sec)	$\sigma$ (*10 <sup>-6</sup> )	$J$ (A/m <sup>2</sup> )	$N$ (*10 <sup>13</sup> )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,02	54,403	0,090	0,006	0,004	0,0000	0,001	0,005	0,001
0,01	225,771	0,044	0,001	0,002	0,0000	0,000	0,001	0,000
0,09	13,281	0,182	0,023	0,007	0,0002	0,006	0,021	0,002
0,02	75,257	0,076	0,004	0,003	0,0000	0,000	0,004	0,000
0,20	6,271	0,264	0,048	0,009	0,0006	0,019	0,045	0,004
0,03	45,154	0,098	0,007	0,003	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,80	1,557	0,530	0,193	0,015	0,0044	0,154	0,181	0,012
0,22	5,644	0,279	0,053	0,008	0,0006	0,022	0,050	0,003
1,85	0,674	0,806	0,445	0,020	0,0136	0,540	0,419	0,025
0,19	6,451	0,261	0,046	0,007	0,0005	0,018	0,044	0,003
2,64	0,470	0,965	0,637	0,021	0,0206	0,926	0,600	0,032
0,33	3,763	0,341	0,080	0,008	0,0009	0,041	0,075	0,004
3,97	0,314	1,182	0,956	0,024	0,0341	1,702	0,900	0,043
0,47	2,656	0,406	0,113	0,008	0,0014	0,069	0,106	0,005
5,32	0,234	1,368	1,281	0,025	0,0480	2,641	1,206	0,052
0,72	1,737	0,502	0,173	0,009	0,0024	0,131	0,163	0,007
8,27	0,151	1,706	1,992	0,028	0,0854	5,118	1,875	0,075
1,38	0,903	0,696	0,332	0,012	0,0058	0,348	0,313	0,012
11,30	0,110	1,994	2,722	0,031	0,1258	8,176	2,563	0,094
1,13	1,101	0,631	0,272	0,010	0,0040	0,259	0,256	0,009

### 6.3 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 1 \text{ mm}$ $\theta = 40^\circ\text{C}$

#### Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

$U_k$ (KV)	$E$ (MV/cm)	$C_m$ (nF)	$\kappa$	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$\Delta U$ (V)
10,12	0,15	1000	5,51	0,013	-	-	0,01	-	-
10,12	0,15	1000	5,51	0,0004	-	-	0,00	-	-
13,38	0,20	1000	5,51	0,018	0,024	0,006	0,02	0,02	0,01
13,38	0,20	1000	5,51	0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,85	0,25	1000	5,51	0,021	0,044	0,024	0,02	0,04	0,02
16,85	0,25	1000	5,51	0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,34	0,30	1000	5,51	0,021	0,085	0,063	0,02	0,09	0,06
20,34	0,30	1000	5,51	0,002	0,009	0,009	0,00	0,01	0,01
23,17	0,35	1000	5,51	0,025	0,188	0,163	0,03	0,19	0,16
23,17	0,35	1000	5,51	0,005	0,017	0,01	0,01	0,02	0,01
27,40	0,41	1000	5,51	0,028	0,235	0,207	0,03	0,24	0,21
27,40	0,41	1000	5,51	0,002	0,007	0,007	0,00	0,01	0,01
30,55	0,46	1000	5,51	0,026	0,383	0,356	0,03	0,38	0,36
30,55	0,46	1000	5,51	0,001	0,021	0,022	0,00	0,02	0,02
34,20	0,51	1000	5,51	0,044	0,6	0,556	0,04	0,60	0,56
34,20	0,51	1000	5,51	0,013	0,025	0,03	0,01	0,03	0,03
37,40	0,56	1000	5,51	0,03	0,836	0,806	0,03	0,84	0,81
37,40	0,56	1000	5,51	0,002	0,068	0,066	0,00	0,07	0,07
40,68	0,61	1000	5,51	0,041	1,03	1,00	0,04	1,03	1,00
40,68	0,61	1000	5,51	0,021	0,091	0,1	0,02	0,09	0,10
44,46	0,66	1000	5,51	0,051	1,14	1,075	0,05	1,14	1,08
44,46	0,66	1000	5,51	0,029	0,093	0,09	0,03	0,09	0,09

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ ( $10^6 m$ )	$V$ ( $10^6 m/s$ )	$f$ ( $10^{15}/sec$ )	$b$ ( $m^2/V \cdot sec$ )	$\sigma$ ( $\cdot 10^{-6}$ )	$J$ ( $A/m^2$ )	$N$ ( $\cdot 10^{13}$ )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,02	75,257	0,076	0,004	0,004	0,0000	0,000	0,004	0,000
0,01	150,514	0,054	0,002	0,003	0,0000	0,000	0,002	0,000
0,07	18,814	0,153	0,016	0,006	0,0001	0,004	0,015	0,001
0,01	112,886	0,062	0,003	0,002	0,0000	0,000	0,003	0,000
0,17	7,167	0,247	0,042	0,008	0,0005	0,016	0,039	0,003
0,02	50,171	0,093	0,006	0,003	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,45	2,770	0,398	0,108	0,012	0,0019	0,065	0,102	0,007
0,03	45,154	0,098	0,007	0,003	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,57	2,181	0,448	0,137	0,011	0,0023	0,093	0,129	0,008
0,02	64,506	0,082	0,005	0,002	0,0000	0,001	0,004	0,000
0,98	1,268	0,588	0,236	0,013	0,0046	0,209	0,223	0,012
0,06	20,525	0,146	0,015	0,003	0,0001	0,003	0,014	0,001
1,53	0,812	0,734	0,369	0,014	0,0080	0,408	0,348	0,016
0,08	15,051	0,171	0,020	0,003	0,0001	0,005	0,019	0,001
2,22	0,560	0,884	0,535	0,016	0,0128	0,713	0,504	0,022
0,18	6,842	0,253	0,044	0,005	0,0003	0,017	0,041	0,002
2,75	0,453	0,983	0,662	0,016	0,0162	0,980	0,623	0,025
0,28	4,515	0,311	0,066	0,005	0,0005	0,031	0,063	0,002
2,96	0,420	1,021	0,714	0,015	0,0166	1,098	0,672	0,024
0,25	5,017	0,295	0,060	0,004	0,0004	0,027	0,056	0,002

### Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

Uκ (KV)	E (MV/cm)	Cm (nF)	κ	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔQ (μC)	U1 (V)	U2 (V)	ΔU (V)
-10,35	-0,15	1000	5,51	0,015			0,02	0,00	0,00
-10,35	-0,15	1000	5,51	0,000			0,00	0,00	0,00
-13,82	-0,21	1000	5,51	0,019			0,02	0,00	0,00
-13,82	-0,21	1000	5,51	0,000			0,00	0,00	0,00
-17,45	-0,26	1000	5,51	0,027	0,033	0,006	0,03	0,03	0,01
-17,45	-0,26	1000	5,51	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-20,40	-0,30	1000	5,51	0,034	0,067	0,039	0,03	0,07	0,04
-20,40	-0,30	1000	5,51	0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-23,97	-0,36	1000	5,51	0,033	0,11	0,077	0,03	0,11	0,08
-23,97	-0,36	1000	5,51	0,005	0,013	0,009	0,01	0,01	0,01
-27,96	-0,42	1000	5,51	0,031	0,156	0,127	0,03	0,16	0,13
-27,96	-0,42	1000	5,51	0,004	0,018	0,02	0,00	0,02	0,02
-31,23	-0,47	1000	5,51	0,024	0,302	0,277	0,02	0,30	0,28
-31,23	-0,47	1000	5,51	0,002	0,038	0,036	0,00	0,04	0,04
-34,50	-0,51	1000	5,51	0,069	0,472	0,402	0,07	0,47	0,40
-34,50	-0,51	1000	5,51	0,005	0,085	0,081	0,01	0,09	0,08
-37,69	-0,56	1000	5,51	0,121	0,695	0,574	0,12	0,70	0,57
-37,69	-0,56	1000	5,51	0,014	0,058	0,054	0,01	0,06	0,05
-40,86	-0,61	1000	5,51	0,198	0,943	0,745	0,20	0,94	0,75
-40,86	-0,61	1000	5,51	0,063	0,093	0,15	0,06	0,09	0,15
-44,85	-0,67	1000	5,51	0,229	1,309	1,085	0,23	1,31	1,09
-44,85	-0,67	1000	5,51	0,082	0,17	0,12	0,08	0,17	0,12

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ (10 <sup>9</sup> m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m/s)	$f$ (10 <sup>15</sup> /sec)	$b$ (m <sup>2</sup> /V*sec)	$\sigma$ (*10 <sup>-6</sup> )	$J$ (A/m <sup>2</sup> )	$N$ (*10 <sup>13</sup> )	$\Delta C$ (nF)
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,02	19,150	0,076	0,004	-0,003	0,0000	0,000	0,004	0,000
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,11	7,511	0,194	0,026	-0,006	-0,0002	0,008	0,024	-0,002
0,01	23,454	0,062	0,003	-0,002	0,0000	0,000	0,003	0,000
0,21	5,346	0,273	0,051	-0,008	-0,0006	0,021	0,048	-0,003
0,02	15,636	0,093	0,006	-0,003	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,35	4,162	0,351	0,084	-0,008	-0,0011	0,045	0,079	-0,005
0,06	10,489	0,139	0,013	-0,003	-0,0001	0,003	0,013	-0,001
0,76	2,818	0,518	0,184	-0,011	-0,0031	0,144	0,173	-0,009
0,10	7,818	0,187	0,024	-0,004	-0,0001	0,007	0,023	-0,001
1,11	2,340	0,624	0,267	-0,012	-0,0049	0,251	0,251	-0,012
0,22	5,212	0,280	0,054	-0,005	-0,0004	0,023	0,051	-0,002
1,58	1,958	0,746	0,381	-0,013	-0,0076	0,428	0,359	-0,015
0,15	6,383	0,229	0,036	-0,004	-0,0002	0,012	0,034	-0,001
2,05	1,719	0,850	0,495	-0,014	-0,0104	0,633	0,466	-0,018
0,41	3,830	0,381	0,100	-0,006	-0,0009	0,057	0,094	-0,004
2,99	1,424	1,026	0,720	-0,015	-0,0167	1,113	0,678	-0,024
0,33	4,282	0,341	0,080	-0,005	-0,0006	0,041	0,075	-0,003

#### 6.4 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 1 \text{ mm}$ $\theta = 80^\circ\text{C}$

##### Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

$U_k$ (KV)	$E$ (MV/cm)	$C_m$ (nF)	$\kappa$	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$\Delta U$ (V)
10,02	0,15	1000	5,51	0,064	0,074	0,017	0,06	0,07	0,02
10,02	0,15	1000	5,51	0,006	-	-	0,01	-	-
13,40	0,20	1000	5,51	0,049	0,182	0,16	0,05	0,18	0,16
13,40	0,20	1000	5,51	0,006	0,017	0,012	0,01	0,02	0,01
16,95	0,25	1000	5,51	0,059	0,319	0,26	0,06	0,32	0,26
16,95	0,25	1000	5,51	0,013	0,018	0,022	0,01	0,02	0,02
20,16	0,30	1000	5,51	0,056	0,583	0,526	0,06	0,58	0,53
20,16	0,30	1000	5,51	0,002	0,013	0,014	0,00	0,01	0,01
23,41	0,35	1000	5,51	0,068	1,032	0,964	0,07	1,03	0,96
23,41	0,35	1000	5,51	0,016	0,11	0,098	0,02	0,11	0,10
26,80	0,40	1000	5,51	0,068	1,605	1,536	0,07	1,61	1,54
26,80	0,40	1000	5,51	0,01	0,061	0,058	0,01	0,06	0,06
30,50	0,45	<b>ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</b>							
30,50	0,45								

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ ( $10^6\text{m}$ )	$V$ ( $10^6\text{m/s}$ )	$f$ ( $10^{15}/\text{sec}$ )	$b$ ( $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ )	$\sigma$ ( $\cdot 10^{-6}$ )	$J$ ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	$N$ ( $\cdot 10^{13}$ )	$\Delta C$ (nF)
0,05	26,561	0,128	0,011	0,009	0,0001	0,002	0,011	0,002
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,44	2,822	0,394	0,106	0,020	0,0032	0,063	0,100	0,012
0,03	37,629	0,108	0,008	0,005	0,0001	0,001	0,008	0,001
0,72	1,737	0,502	0,173	0,020	0,0052	0,131	0,163	0,015
0,06	20,525	0,146	0,015	0,006	0,0001	0,003	0,014	0,001
1,45	0,858	0,714	0,349	0,024	0,0125	0,376	0,329	0,026
0,04	32,253	0,117	0,009	0,004	0,0001	0,002	0,009	0,001
2,66	0,468	0,967	0,640	0,028	0,0267	0,932	0,603	0,041
0,27	4,608	0,308	0,065	0,009	0,0009	0,030	0,061	0,004
4,23	0,294	1,221	1,020	0,031	0,0469	1,875	0,960	0,057
0,16	7,785	0,237	0,039	0,006	0,0003	0,014	0,036	0,002
<b>ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</b>								



### Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

Uκ (KV)	E (MV/cm)	Cm (nF)	κ	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔQ (μC)	U1 (V)	U2 (V)	ΔU (V)
-10,50	-0,16	1000	5,51	0,059	-	-	0,06	-	-
-10,50	-0,16	1000	5,51	0,001	-	-	0,00	-	-
-13,78	-0,21	1000	5,51	0,175	-	-	0,18	-	-
-13,78	-0,21	1000	5,51	0,004	-	-	0,00	-	-
-17,17	-0,26	1000	5,51	0,1968	0,163	0,029	0,20	0,16	0,03
-17,17	-0,26	1000	5,51	0,07	0,01	0,008	0,07	0,01	0,01
-21,24	-0,32	1000	5,51	0,126	0,356	0,222	0,13	0,36	0,22
-21,24	-0,32	1000	5,51	0,01	0,05	0,04	0,01	0,05	0,04
-24,46	-0,36	1000	5,51	0,132	0,931	0,80	0,13	0,93	0,80
-24,46	-0,36	1000	5,51	0,016	0,20	0,20	0,02	0,20	0,20
-27,90	-0,42	<b>ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</b>							
-27,90	-0,42								

ΔW (eV)	λ (10 <sup>6</sup> m)	V (10 <sup>6</sup> m/s)	f (10 <sup>15</sup> /sec)	b (m <sup>2</sup> /V*sec)	σ (*10 <sup>-6</sup> )	J (A/m <sup>2</sup> )	N (*10 <sup>13</sup> )	ΔC (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,08	15,570	0,168	0,019	-0,007	-0,0002	0,005	0,018	-0,002
0,02	56,443	0,088	0,005	-0,003	0,0000	0,001	0,005	0,000
0,61	2,034	0,464	0,147	-0,015	-0,0033	0,103	0,139	-0,010
0,11	11,289	0,197	0,027	-0,006	-0,0002	0,008	0,025	-0,002
2,20	0,565	0,880	0,531	-0,024	-0,0193	0,703	0,499	-0,033
0,55	2,258	0,440	0,133	-0,012	-0,0024	0,088	0,125	-0,008
<b>ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ</b>								

## 6.5 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$ $\theta = 20^\circ\text{C}$

### Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

$U_k$ (KV)	$E$ (MV/cm)	$C_m$ (nF)	$\kappa$	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$\Delta U$ (V)
13,80	0,14	1000	5,51	0,062	-	-	0,062	-	-
13,80	0,14	1000	5,51	0,005	-	-	0,005	-	-
17,30	0,18	1000	5,51	0,077	-	-	0,077	-	-
17,30	0,18	1000	5,51	0,004	-	-	0,004	-	-
20,80	0,21	1000	5,51	0,082	0,13	0,044	0,082	0,130	0,044
20,80	0,21	1000	5,51	0,009	0,01	0,010	0,009	0,010	0,010
24,10	0,25	1000	5,51	0,074	0,12	0,051	0,074	0,120	0,051
24,10	0,25	1000	5,51	0,010	0,02	0,020	0,010	0,020	0,020
27,70	0,28	1000	5,51	0,081	0,18	0,100	0,081	0,180	0,100
27,70	0,28	1000	5,51	0,000	0,05	0,050	0,000	0,050	0,050
31,10	0,32	1000	5,51	0,067	0,34	0,270	0,067	0,340	0,270
31,10	0,32	1000	5,51	0,000	0,06	0,060	0,000	0,060	0,060
34,50	0,35	1000	5,51	0,067	0,39	0,320	0,067	0,390	0,320
34,50	0,35	1000	5,51	0,000	0,09	0,090	0,000	0,090	0,090
37,80	0,38	1000	5,51	0,067	0,64	0,570	0,067	0,640	0,570
37,80	0,38	1000	5,51	0,000	0,14	0,140	0,000	0,140	0,140
41,40	0,42	1000	5,51	0,100	0,78	0,680	0,100	0,780	0,680
41,40	0,42	1000	5,51	0,000	0,15	0,150	0,000	0,150	0,150
44,60	0,45	1000	5,51	0,067	0,75	0,680	0,067	0,750	0,680
44,60	0,45	1000	5,51	0,000	0,17	0,180	0,000	0,170	0,180

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ (10 <sup>6</sup> m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m/s)	$f$ (10 <sup>15</sup> /sec)	$b$ (m <sup>2</sup> /V*sec)	$\sigma$ (*10 <sup>-6</sup> )	$J$ (A/m <sup>2</sup> )	$N$ (*10 <sup>13</sup> )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,121	10,262	0,207	0,029	0,010	0,0004	0,009	0,028	0,002
0,028	45,154	0,098	0,007	0,005	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,141	8,854	0,222	0,034	0,009	0,0005	0,011	0,032	0,002
0,055	22,577	0,139	0,013	0,006	0,0001	0,003	0,013	0,001
0,276	4,515	0,311	0,066	0,011	0,0011	0,031	0,063	0,004
0,138	9,031	0,220	0,033	0,008	0,0004	0,011	0,031	0,002
0,744	1,672	0,512	0,179	0,016	0,0044	0,138	0,169	0,009
0,165	7,526	0,241	0,040	0,008	0,0005	0,014	0,038	0,002
0,882	1,411	0,557	0,212	0,016	0,0051	0,178	0,200	0,009
0,248	5,017	0,295	0,060	0,008	0,0008	0,027	0,056	0,003
1,570	0,792	0,744	0,378	0,019	0,0110	0,424	0,356	0,015
0,386	3,225	0,369	0,093	0,010	0,0013	0,052	0,088	0,004
1,873	0,664	0,812	0,451	0,019	0,0131	0,552	0,425	0,016
0,413	3,010	0,381	0,100	0,009	0,0014	0,057	0,094	0,004
1,873	0,664	0,812	0,451	0,018	0,0122	0,552	0,425	0,015
0,496	2,509	0,418	0,120	0,009	0,0017	0,075	0,113	0,004

Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

U <sub>κ</sub> (KV)	E (MV/cm)	C <sub>m</sub> (nF)	κ	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔQ (μC)	U1 (V)	U2 (V)	ΔU (V)
-14,00	-0,14	1000	5,51	0,100	-	-	0,100	-	-
-14,00	-0,14	1000	5,51	0,003	-	-	0,003	-	-
-17,40	-0,18	1000	5,51	0,071	-	-	0,071	-	-
-17,40	-0,18	1000	5,51	0,004	-	-	0,004	-	-
-21,20	-0,22	1000	5,51	0,085	0,100	0,016	0,085	0,100	0,016
-21,20	-0,22	1000	5,51	0,004	0,004	0,002	0,004	0,004	0,002
-24,60	-0,25	1000	5,51	0,089	0,150	0,058	0,089	0,150	0,058
-24,60	-0,25	1000	5,51	0,008	0,010	0,010	0,008	0,010	0,010
-28,30	-0,29	1000	5,51	0,094	0,160	0,069	0,094	0,160	0,069
-28,30	-0,29	1000	5,51	0,000	0,030	0,034	0,000	0,030	0,034
-31,80	-0,32	1000	5,51	0,081	0,240	0,160	0,081	0,240	0,160
-31,80	-0,32	1000	5,51	0,000	0,050	0,052	0,000	0,050	0,052
-35,10	-0,36	1000	5,51	0,087	0,340	0,260	0,087	0,340	0,260
-35,10	-0,36	1000	5,51	0,060	0,080	0,080	0,060	0,080	0,080
-38,60	-0,39	1000	5,51	0,067	0,420	0,350	0,067	0,420	0,350
-38,60	-0,39	1000	5,51	0,000	0,130	0,130	0,000	0,130	0,130
-42,40	-0,43	1000	5,51	0,067	0,880	0,810	0,067	0,880	0,810
-42,40	-0,43	1000	5,51	0,000	0,430	0,440	0,000	0,430	0,440
-44,80	-0,46	1000	5,51	0,067	0,790	0,720	0,067	0,790	0,720
-44,80	-0,46	1000	5,51	0,000	0,320	0,360	0,000	0,320	0,360

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ ( $10^6 m$ )	$V$ ( $10^6 m/s$ )	$f$ ( $10^{15}/sec$ )	$b$ ( $m^2/V \cdot sec$ )	$\sigma$ ( $\cdot 10^{-6}$ )	$J$ ( $A/m^2$ )	$N$ ( $\cdot 10^{13}$ )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,044	28,221	0,125	0,011	-0,006	-0,0001	0,002	0,010	-0,001
0,006	225,771	0,044	0,001	-0,002	0,0000	0,000	0,001	0,000
0,160	7,785	0,237	0,039	-0,009	-0,0005	0,014	0,036	-0,002
0,028	45,154	0,098	0,007	-0,004	0,0000	0,001	0,006	0,000
0,190	6,544	0,259	0,046	-0,009	-0,0006	0,018	0,043	-0,002
0,094	13,281	0,182	0,023	-0,006	-0,0002	0,006	0,021	-0,001
0,441	2,822	0,394	0,106	-0,012	-0,0019	0,063	0,100	-0,005
0,143	8,684	0,225	0,035	-0,007	-0,0004	0,012	0,033	-0,002
0,716	1,737	0,502	0,173	-0,014	-0,0037	0,131	0,163	-0,007
0,220	5,644	0,279	0,053	-0,008	-0,0006	0,022	0,050	-0,002
0,964	1,290	0,583	0,232	-0,015	-0,0052	0,204	0,219	-0,009
0,358	3,473	0,355	0,086	-0,009	-0,0012	0,046	0,081	-0,003
2,232	0,557	0,886	0,538	-0,021	-0,0166	0,718	0,506	-0,019
1,212	1,026	0,653	0,292	-0,015	-0,0067	0,287	0,275	-0,010
1,984	0,627	0,836	0,478	-0,018	-0,0132	0,602	0,450	-0,016
0,992	1,254	0,591	0,239	-0,013	-0,0047	0,213	0,225	-0,008

## 6.6 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$ $\theta=40^\circ\text{C}$

### Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

$U_k$ (KV)	$E$ (MV/cm)	$C_m$ (nF)	$\kappa$	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$\Delta U$ (V)
10,20	0,10	1000	5,51	0,042	-	-	0,042	-	-
10,20	0,10	1000	5,51	0,003	-	-	0,003	-	-
13,88	0,14	1000	5,51	0,044	0,061	0,007	0,044	0,061	0,007
13,88	0,14	1000	5,51	0,002	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
17,45	0,18	1000	5,51	0,076	0,114	0,040	0,076	0,114	0,040
17,45	0,18	1000	5,51	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20,91	0,21	1000	5,51	0,094	0,114	0,068	0,094	0,114	0,068
20,91	0,21	1000	5,51	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24,15	0,25	1000	5,51	0,088	0,239	0,151	0,088	0,239	0,151
24,15	0,25	1000	5,51	0,009	0,024	0,020	0,009	0,024	0,020
27,92	0,28	1000	5,51	0,080	0,304	0,224	0,080	0,304	0,224
27,92	0,28	1000	5,51	0,008	0,100	0,010	0,008	0,100	0,010
31,50	0,32	1000	5,51	0,072	0,491	0,418	0,072	0,491	0,418
31,50	0,32	1000	5,51	0,010	0,040	0,050	0,010	0,040	0,050
34,75	0,35	1000	5,51	0,075	0,585	0,516	0,075	0,585	0,516
34,75	0,35	1000	5,51	0,006	0,020	0,036	0,006	0,020	0,036
39,05	0,40	1000	5,51	0,076	0,870	0,794	0,076	0,870	0,794
39,05	0,40	1000	5,51	0,018	0,091	0,098	0,018	0,091	0,098
41,70	0,42	1000	5,51	0,067	1,207	1,194	0,067	1,207	1,194
41,70	0,42	1000	5,51	0,000	0,120	0,120	0,000	0,120	0,120
46,02	0,47	1000	5,51	0,078	1,390	1,310	0,078	1,390	1,310
46,02	0,47	1000	5,51	0,005	0,081	0,075	0,005	0,081	0,075

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ (10 <sup>6</sup> m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m/s)	$f$ (10 <sup>15</sup> /sec)	$b$ (m <sup>2</sup> /V*sec)	$\sigma$ (*10 <sup>-6</sup> )	$J$ (A/m <sup>2</sup> )	$N$ (*10 <sup>13</sup> )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,019	64,506	0,082	0,005	0,006	0,0000	0,001	0,004	0,001
0,003	451,543	0,031	0,001	0,002	0,0000	0,000	0,001	0,000
0,110	11,289	0,197	0,027	0,011	0,0004	0,008	0,025	0,002
0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,187	6,640	0,257	0,045	0,012	0,0008	0,017	0,043	0,003
0,000	-	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,416	2,990	0,383	0,100	0,016	0,0024	0,058	0,094	0,006
0,055	22,577	0,139	0,013	0,006	0,0001	0,003	0,013	0,001
0,617	2,016	0,466	0,149	0,016	0,0037	0,104	0,140	0,008
0,028	45,154	0,098	0,007	0,003	0,0000	0,001	0,006	0,000
1,152	1,080	0,637	0,278	0,020	0,0083	0,266	0,261	0,013
0,138	9,031	0,220	0,033	0,007	0,0003	0,011	0,031	0,002
1,422	0,875	0,707	0,343	0,020	0,0103	0,365	0,323	0,015
0,099	12,543	0,187	0,024	0,005	0,0002	0,007	0,023	0,001
2,187	0,569	0,878	0,527	0,022	0,0175	0,697	0,496	0,020
0,270	4,608	0,308	0,065	0,008	0,0008	0,030	0,061	0,003
3,289	0,378	1,076	0,793	0,025	0,0303	1,285	0,746	0,029
0,331	3,763	0,341	0,080	0,008	0,0010	0,041	0,075	0,003
3,609	0,345	1,127	0,870	0,024	0,0315	1,477	0,819	0,028
0,207	6,021	0,270	0,050	0,006	0,0004	0,020	0,047	0,002

### Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

U <sub>k</sub> (KV)	E (MV/cm)	C <sub>m</sub> (nF)	κ	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔQ (μC)	U1 (V)	U2 (V)	ΔU (V)
0,00	0,00	1000	5,51	-	-	-	-	-	-
0,00	0,00	1000	5,51	-	-	-	-	-	-
-14,18	-0,14	1000	5,51	0,055	-	-	0,055	-	-
-14,18	-0,14	1000	5,51	0,014	-	-	0,014	-	-
-17,62	-0,18	1000	5,51	0,081	-	-	0,081	-	-
-17,62	-0,18	1000	5,51	0,003	-	-	0,003	-	-
-21,00	-0,21	1000	5,51	0,102	-	-	0,102	-	-
-21,00	-0,21	1000	5,51	0,005	-	-	0,005	-	-
-26,25	-0,27	1000	5,51	0,114	-	-	0,114	-	-
-26,25	-0,27	1000	5,51	0,004	-	-	0,004	-	-
-28,20	-0,29	1000	5,51	0,099	0,256	0,156	0,099	0,256	0,156
-28,20	-0,29	1000	5,51	0,008	0,049	0,044	0,008	0,049	0,044
-31,90	-0,32	1000	5,51	0,102	0,410	0,307	0,102	0,410	0,307
-31,90	-0,32	1000	5,51	0,006	0,055	0,050	0,006	0,055	0,050
-35,35	-0,36	1000	5,51	0,097	0,642	0,545	0,097	0,642	0,545
-35,35	-0,36	1000	5,51	0,020	0,055	0,059	0,020	0,055	0,059
-38,50	-0,39	1000	5,51	0,126	0,944	0,818	0,126	0,944	0,818
-38,50	-0,39	1000	5,51	0,015	0,130	0,120	0,015	0,130	0,120
-40,80	-0,42	1000	5,51	0,098	1,336	1,337	0,098	1,336	1,337
-40,80	-0,42	1000	5,51	0,019	0,150	0,160	0,019	0,150	0,160
-45,50	-0,46	1000	5,51	0,148	1,552	1,404	0,148	1,552	1,404
-45,50	-0,46	1000	5,51	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000



$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ ( $10^{-6}\text{m}$ )	$V$ ( $10^6\text{m/s}$ )	$f$ ( $10^{15}/\text{sec}$ )	$b$ ( $\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ )	$\sigma$ ( $\cdot 10^{-6}$ )	$J$ ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	$N$ ( $\cdot 10^{13}$ )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,430	2,895	0,389	0,104	-0,014	-0,002	0,061	0,098	-0,006
0,121	10,262	0,207	0,029	-0,007	0,000	0,009	0,028	-0,002
0,846	1,471	0,546	0,204	-0,017	-0,005	0,168	0,192	-0,010
0,138	9,031	0,220	0,033	-0,007	0,000	0,011	0,031	-0,002
1,501	0,829	0,727	0,362	-0,020	-0,011	0,396	0,341	-0,015
0,163	7,653	0,239	0,039	-0,007	0,000	0,014	0,037	-0,002
2,254	0,552	0,891	0,543	-0,023	-0,019	0,729	0,511	-0,021
0,331	3,763	0,341	0,080	-0,009	-0,001	0,041	0,075	-0,003
3,683	0,338	1,139	0,888	-0,027	-0,037	1,523	0,836	-0,033
0,441	2,822	0,394	0,106	-0,009	-0,002	0,063	0,100	-0,004
3,868	0,322	1,167	0,932	-0,025	-0,035	1,638	0,878	-0,031
0,000	#ΔIAIP/0!	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

## 6.7 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Μετρήσεων για Δείγμα Πάχους $d = 2 \text{ mm}$ $\theta=80^\circ\text{C}$

### Κρουστική Τάση Θετικής Πολικότητας

$U_k$ (KV)	$E$ (MV/cm)	$C_m$ (nF)	$\kappa$	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$\Delta Q$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$\Delta U$ (V)
10,35	0,11	1000	5,51	0,017	-	-	0,017	-	-
10,35	0,11	1000	5,51	0,001	-	-	0,001	-	-
14,10	0,14	1000	5,51	0,020	0,040	0,023	0,020	0,040	0,023
14,10	0,14	1000	5,51	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
17,45	0,18	1000	5,51	0,018	0,069	0,052	0,018	0,069	0,052
17,45	0,18	1000	5,51	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003
21,00	0,21	1000	5,51	0,014	0,104	0,089	0,014	0,104	0,089
21,00	0,21	1000	5,51	0,001	0,004	0,003	0,001	0,004	0,003
23,83	0,24	1000	5,51	0,031	0,293	0,261	0,031	0,293	0,261
23,83	0,24	1000	5,51	0,069	0,012	0,008	0,069	0,012	0,008
27,40	0,28	1000	5,51	0,066	0,702	0,635	0,066	0,702	0,635
27,40	0,28	1000	5,51	0,022	0,029	0,039	0,022	0,029	0,039
31,05	0,32	1000	5,51	0,059	1,046	0,987	0,059	1,046	0,987
31,05	0,32	1000	5,51	0,008	0,076	0,073	0,008	0,076	0,073
34,50	0,35	1000	5,51	0,070	1,450	1,380	0,070	1,450	1,380
34,50	0,35	1000	5,51	0,018	0,052	0,064	0,018	0,052	0,064
37,78	0,38	1000	5,51	0,231	1,700	1,468	0,231	1,700	1,468
37,78	0,38	1000	5,51	0,110	0,081	0,082	0,110	0,081	0,082
41,64	0,42	1000	5,51	0,116	2,433	2,327	0,116	2,433	2,327
41,64	0,42	1000	5,51	0,010	0,080	0,094	0,010	0,080	0,094
44,72	0,45	1000	5,51	0,094	3,280	3,186	0,094	3,280	3,186
44,72	0,45	1000	5,51	0,010	0,081	0,089	0,010	0,081	0,089

$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ ( $10^6 m$ )	$V$ ( $10^6 m/s$ )	$f$ ( $10^{15}/sec$ )	$b$ ( $m^2/V \cdot sec$ )	$\sigma$ ( $\cdot 10^{-6}$ )	$J$ ( $A/m^2$ )	$N$ ( $\cdot 10^{13}$ )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,063	19,632	0,149	0,015	0,010	0,0002	0,003	0,014	0,002
0,003	451,543	0,031	0,001	0,002	0,0000	0,000	0,001	0,000
0,143	8,684	0,225	0,035	0,013	0,0007	0,012	0,033	0,003
0,008	150,514	0,054	0,002	0,003	0,0000	0,000	0,002	0,000
0,245	5,074	0,294	0,059	0,014	0,0012	0,026	0,056	0,004
0,008	150,514	0,054	0,002	0,003	0,0000	0,000	0,002	0,000
0,719	1,730	0,503	0,173	0,021	0,0054	0,131	0,163	0,011
0,022	56,443	0,088	0,005	0,004	0,0000	0,001	0,005	0,000
1,749	0,711	0,785	0,422	0,028	0,0179	0,498	0,397	0,023
0,107	11,578	0,194	0,026	0,007	0,0003	0,008	0,024	0,001
2,719	0,457	0,978	0,655	0,031	0,0306	0,966	0,617	0,032
0,201	6,186	0,266	0,048	0,008	0,0006	0,019	0,046	0,002
3,802	0,327	1,157	0,916	0,033	0,0455	1,597	0,863	0,040
0,176	7,055	0,249	0,042	0,007	0,0005	0,016	0,040	0,002
4,044	0,308	1,193	0,975	0,031	0,0456	1,752	0,918	0,039
0,226	5,507	0,282	0,054	0,007	0,0006	0,023	0,051	0,002
6,411	0,194	1,502	1,545	0,035	0,0825	3,496	1,454	0,056
0,259	4,804	0,302	0,062	0,007	0,0007	0,028	0,059	0,002
8,777	0,142	1,758	2,115	0,039	0,1231	5,601	1,991	0,071
0,245	5,074	0,294	0,059	0,006	0,0006	0,026	0,056	0,002

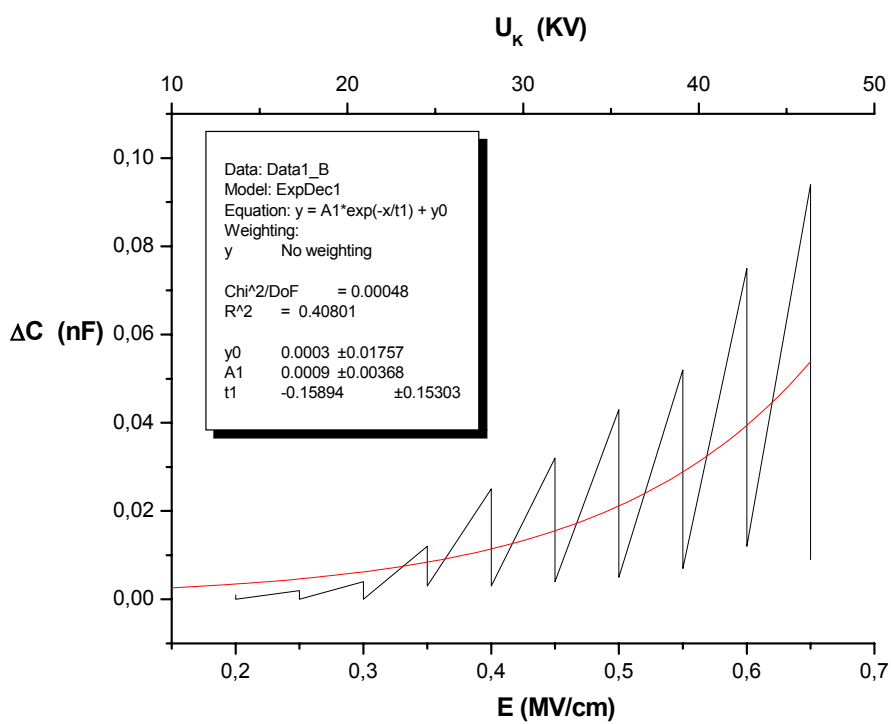
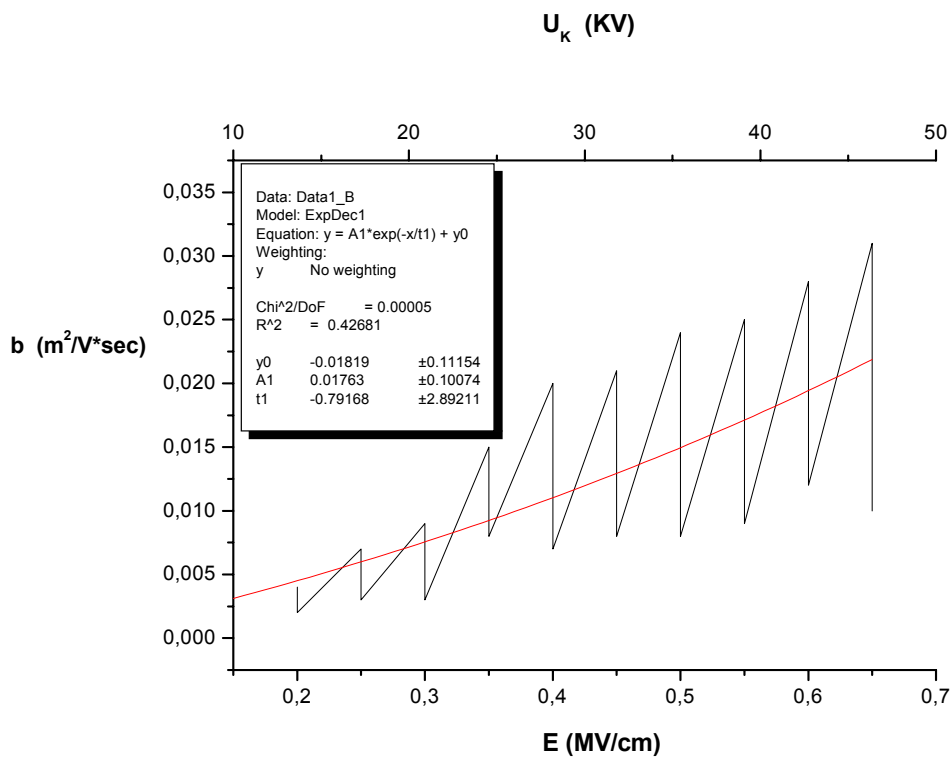
Κρουστική Τάση Αρνητικής Πολικότητας

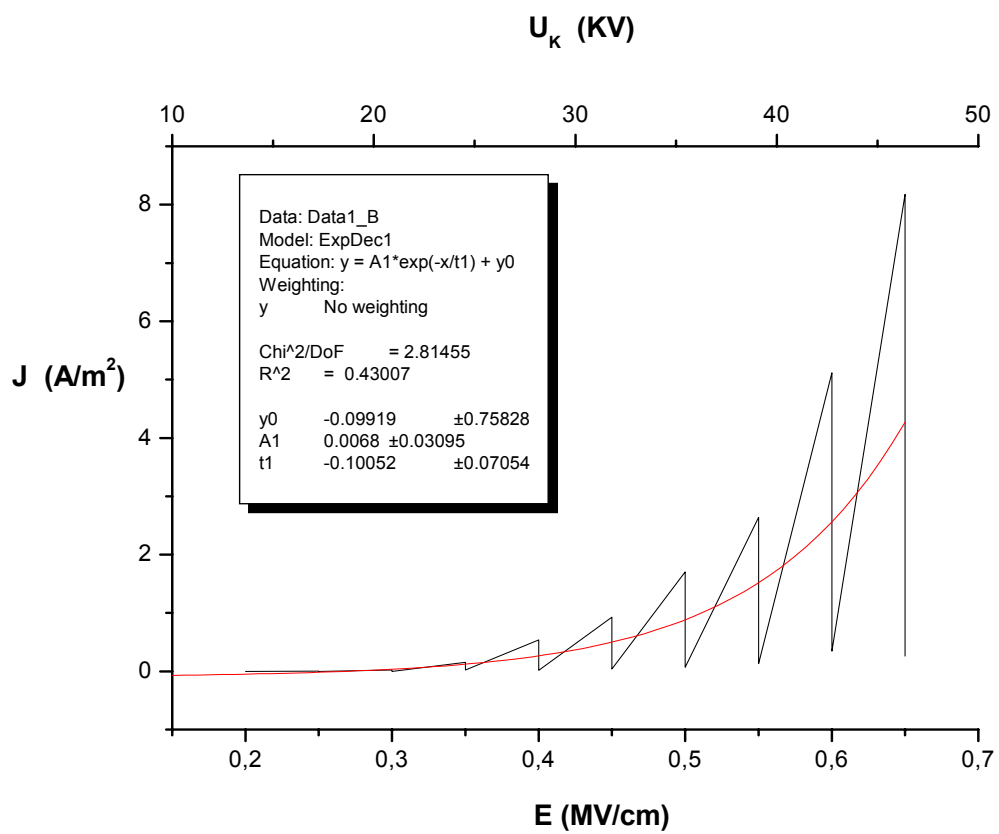
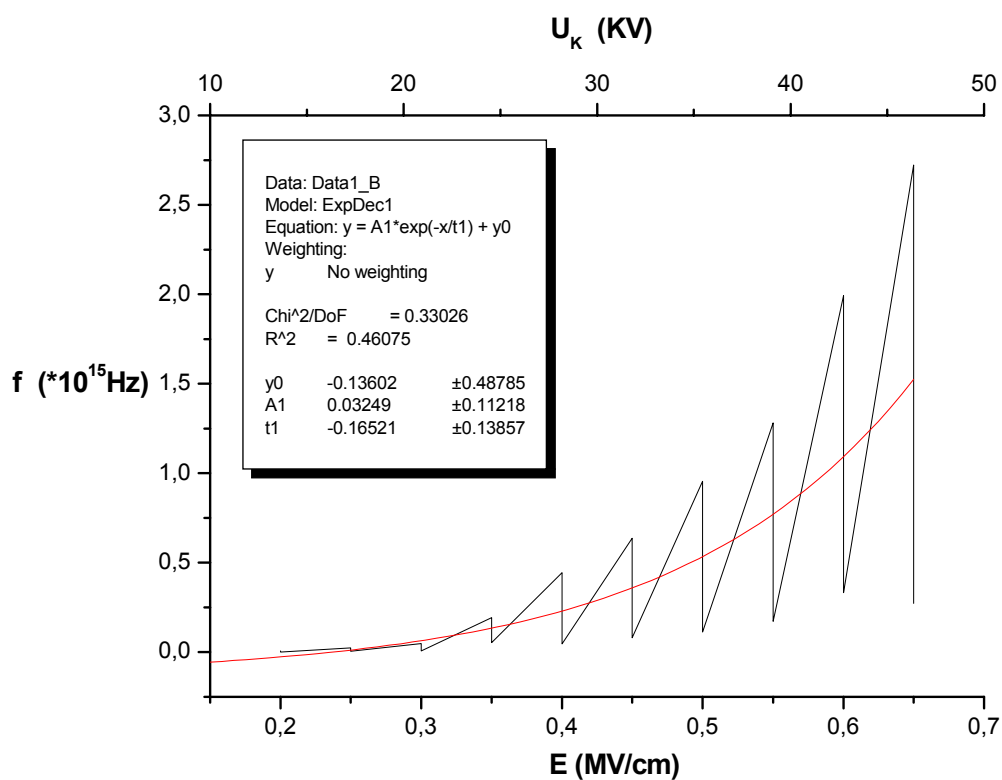
U <sub>κ</sub> (KV)	E (MV/cm)	C <sub>m</sub> (nF)	κ	Q1 (μC)	Q2 (μC)	ΔQ (μC)	U1 (V)	U2 (V)	ΔU (V)
-10,47	-0,11	1000	5,51	-	-	-	-	-	-
-10,47	-0,11	1000	5,51	0,001	-	-	0,001	-	-
-13,60	-0,14	1000	5,51	0,073	-	-	0,073	-	-
-13,60	-0,14	1000	5,51	0,001	-	-	0,001	-	-
-17,22	-0,18	1000	5,51	0,092	0,107	0,017	0,092	0,107	0,017
-17,22	-0,18	1000	5,51	0,007	0,009	0,010	0,007	0,009	0,010
-21,03	-0,21	1000	5,51	0,098	0,163	0,064	0,098	0,163	0,064
-21,03	-0,21	1000	5,51	0,003	0,019	0,020	0,003	0,019	0,020
-24,11	-0,25	1000	5,51	0,088	0,317	0,228	0,088	0,317	0,228
-24,11	-0,25	1000	5,51	0,004	0,010	0,013	0,004	0,010	0,013
-27,88	-0,28	1000	5,51	0,102	0,525	0,422	0,102	0,525	0,422
-27,88	-0,28	1000	5,51	0,014	0,039	0,037	0,014	0,039	0,037
-29,74	-0,30	1000	5,51	0,128	0,796	0,668	0,128	0,796	0,668
-29,74	-0,30	1000	5,51	0,025	0,045	0,055	0,025	0,045	0,055
-34,95	-0,36	1000	5,51	0,103	1,107	1,001	0,103	1,107	1,001
-34,95	-0,36	1000	5,51	0,021	0,054	0,059	0,021	0,054	0,059
-38,94	-0,40	1000	5,51	0,109	1,504	1,395	0,109	1,504	1,395
-38,94	-0,40	1000	5,51	0,030	0,050	0,044	0,030	0,050	0,044
-41,82	-0,43	1000	5,51	0,148	1,835	1,687	0,148	1,835	1,687
-41,82	-0,43	1000	5,51	0,036	0,110	0,140	0,036	0,110	0,140
-45,43	-0,46	1000	5,51	0,145	2,835	2,689	0,145	2,835	2,689
-45,43	-0,46	1000	5,51	0,035	0,170	0,190	0,035	0,170	0,190

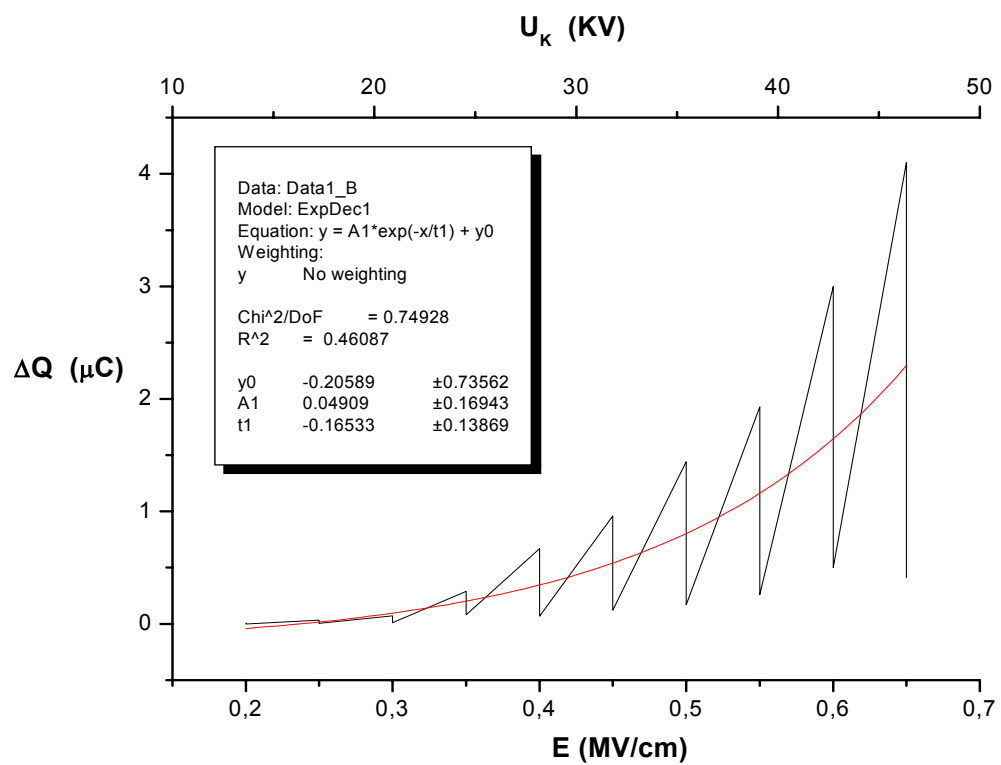
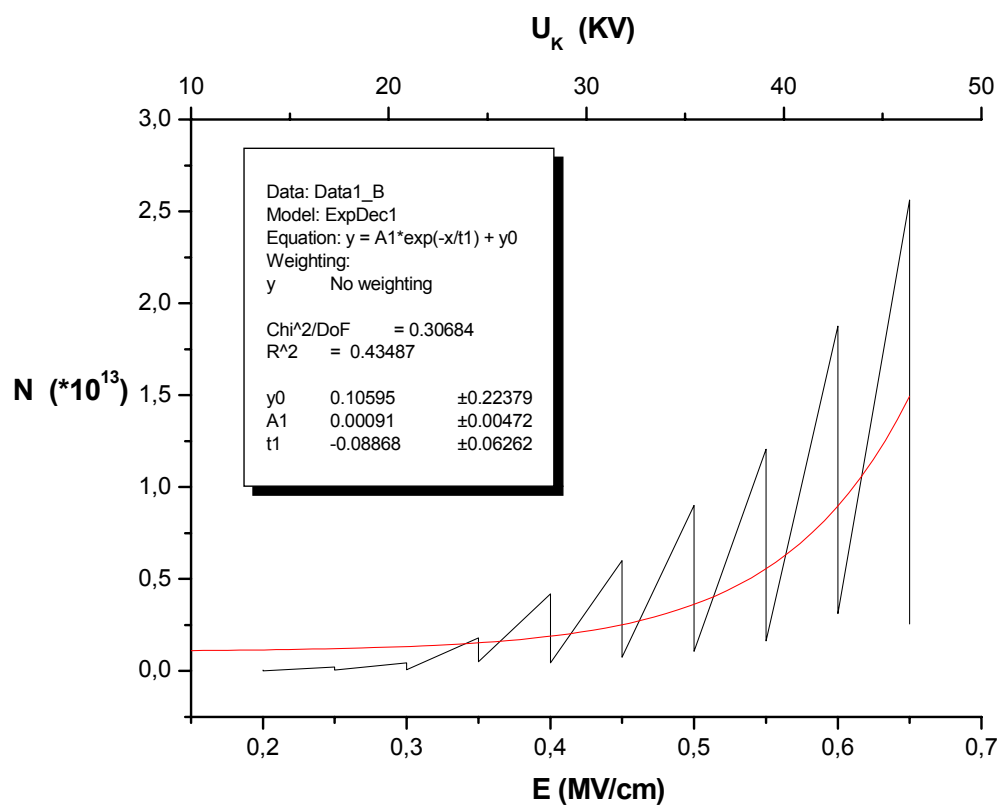
$\Delta W$ (eV)	$\lambda$ (10 <sup>6</sup> m)	$V$ (10 <sup>6</sup> m/s)	$f$ (10 <sup>15</sup> /sec)	$b$ (m <sup>2</sup> /V*sec)	$\sigma$ (*10 <sup>-6</sup> )	$J$ (A/m <sup>2</sup> )	$N$ (*10 <sup>13</sup> )	$\Delta C$ (nF)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,047	26,561	0,128	0,011	-0,007	-0,0001	0,002	0,011	-0,001
0,028	45,154	0,098	0,007	-0,006	-0,0001	0,001	0,006	-0,001
0,176	7,055	0,249	0,042	-0,012	-0,0007	0,016	0,040	-0,003
0,055	22,577	0,139	0,013	-0,007	-0,0001	0,003	0,013	-0,001
0,628	1,980	0,470	0,151	-0,019	-0,0044	0,107	0,143	-0,009
0,036	34,734	0,112	0,009	-0,005	-0,0001	0,001	0,008	-0,001
1,163	1,070	0,640	0,280	-0,023	-0,0095	0,270	0,264	-0,015
0,102	12,204	0,189	0,025	-0,007	-0,0002	0,007	0,023	-0,001
1,840	0,676	0,805	0,444	-0,027	-0,0178	0,538	0,418	-0,022
0,152	8,210	0,231	0,037	-0,008	-0,0004	0,013	0,034	-0,002
2,758	0,451	0,985	0,665	-0,028	-0,0277	0,986	0,626	-0,029
0,163	7,653	0,239	0,039	-0,007	-0,0004	0,014	0,037	-0,002
3,843	0,324	1,163	0,926	-0,029	-0,0410	1,623	0,872	-0,036
0,121	10,262	0,207	0,029	-0,005	-0,0002	0,009	0,028	-0,001
4,648	0,268	1,279	1,120	-0,030	-0,0507	2,158	1,054	-0,040
0,386	3,225	0,369	0,093	-0,009	-0,0012	0,052	0,088	-0,003
7,408	0,168	1,615	1,785	-0,035	-0,0940	4,343	1,681	-0,059
0,523	2,377	0,429	0,126	-0,009	-0,0018	0,082	0,119	-0,004

## 6.8 Γραφικές παραστάσεις

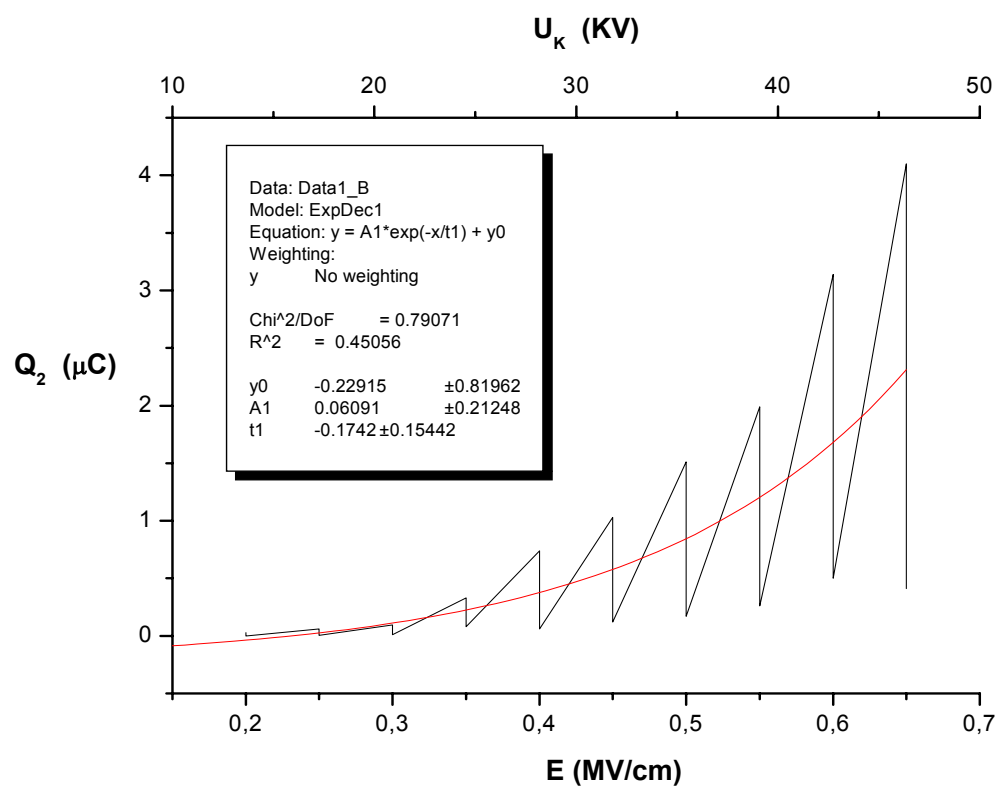
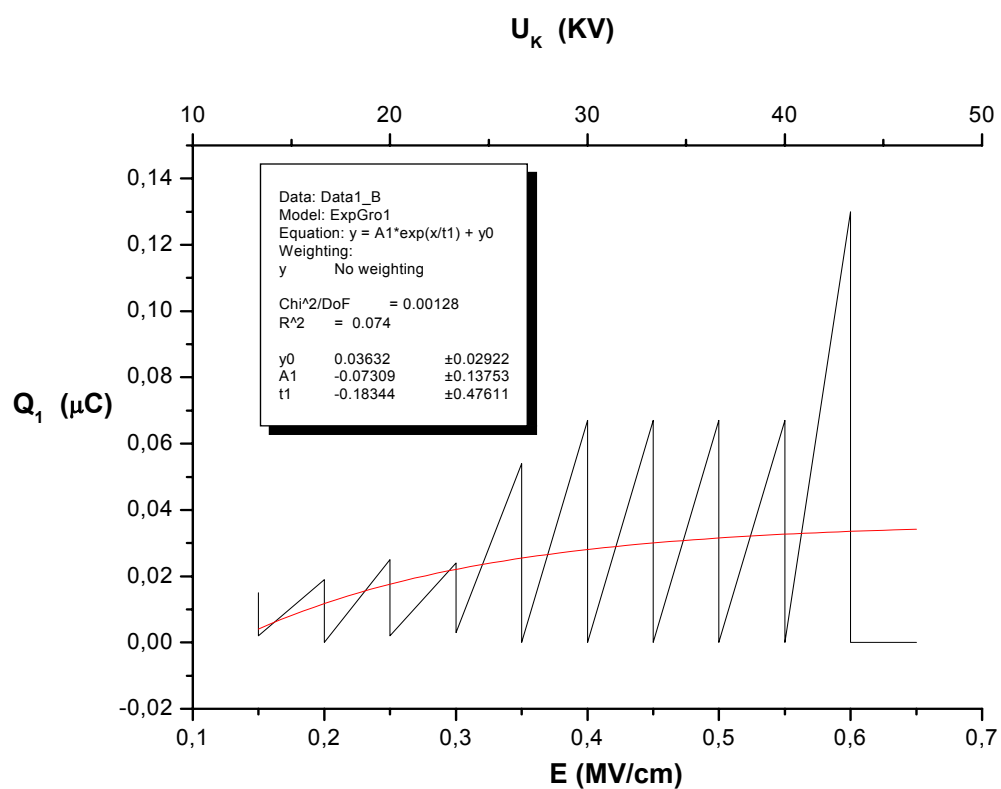
Θετική πολικότητα  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 20^\circ\text{C}$

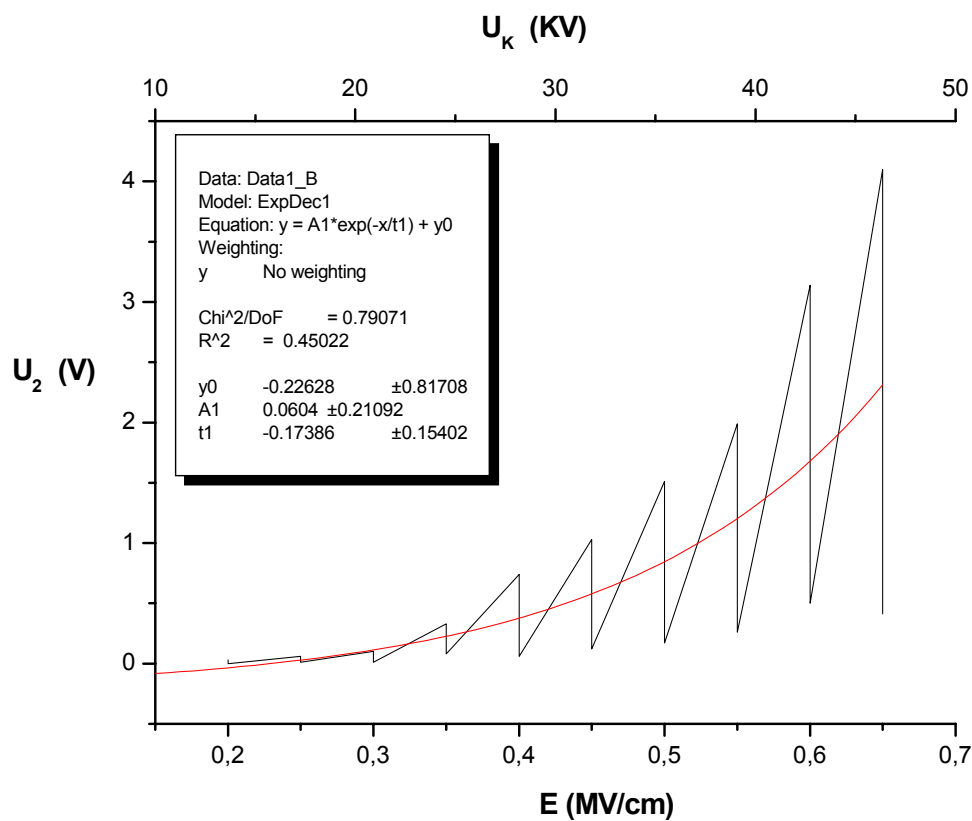
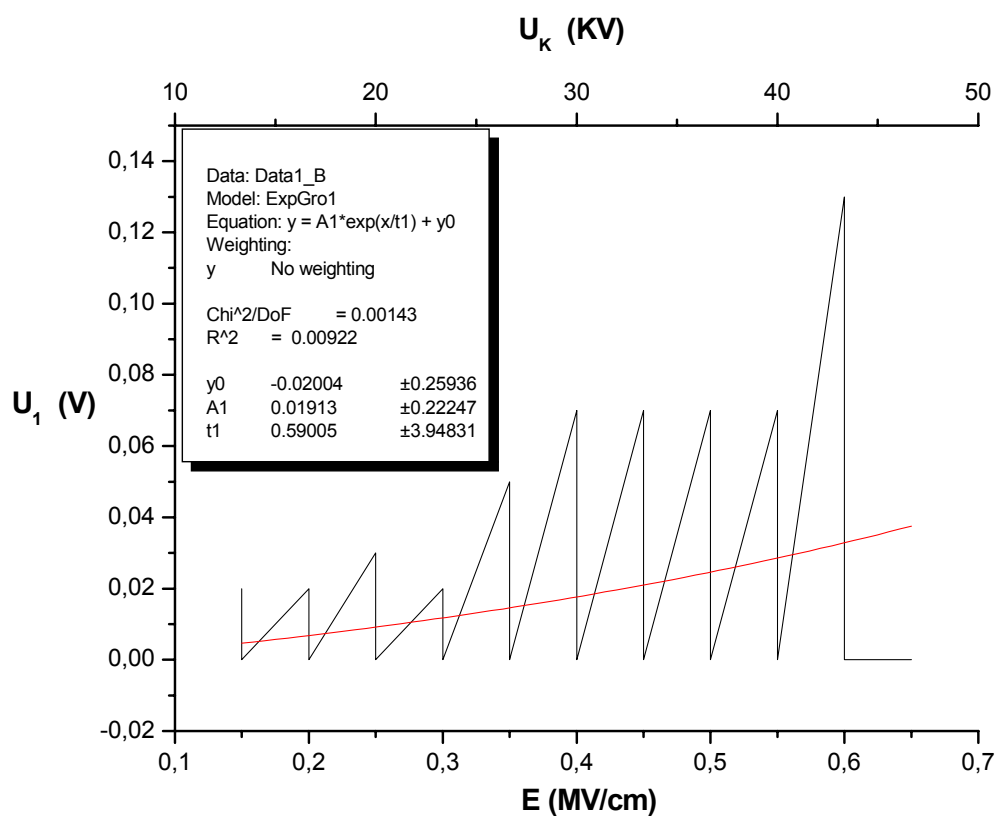


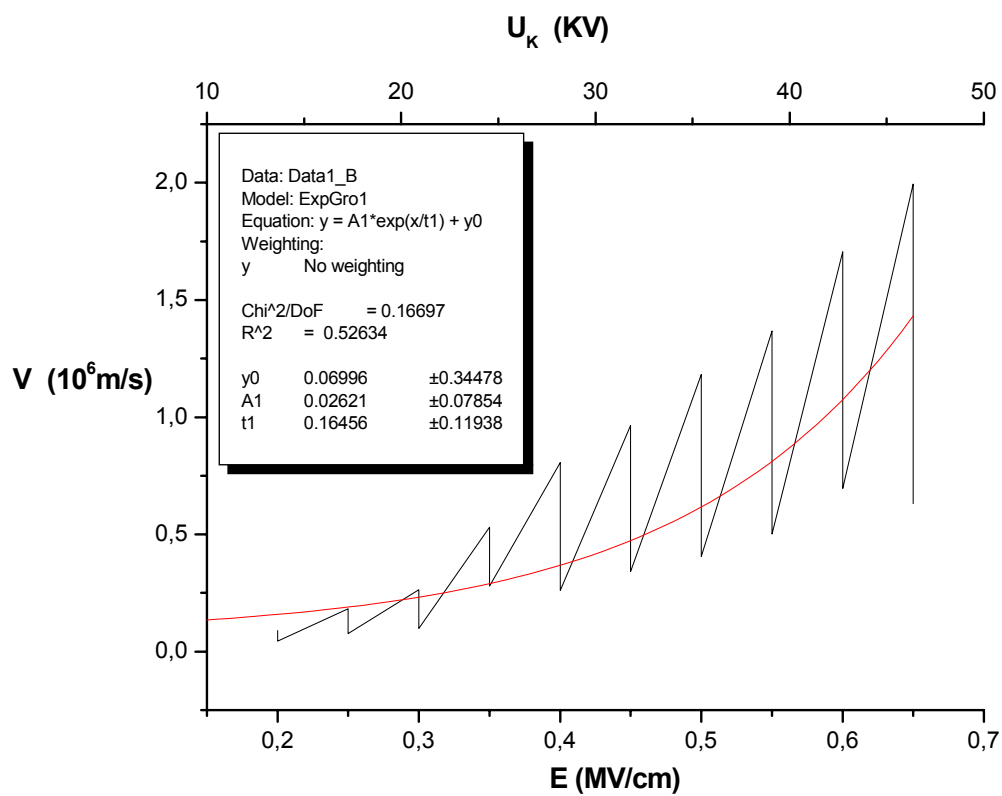
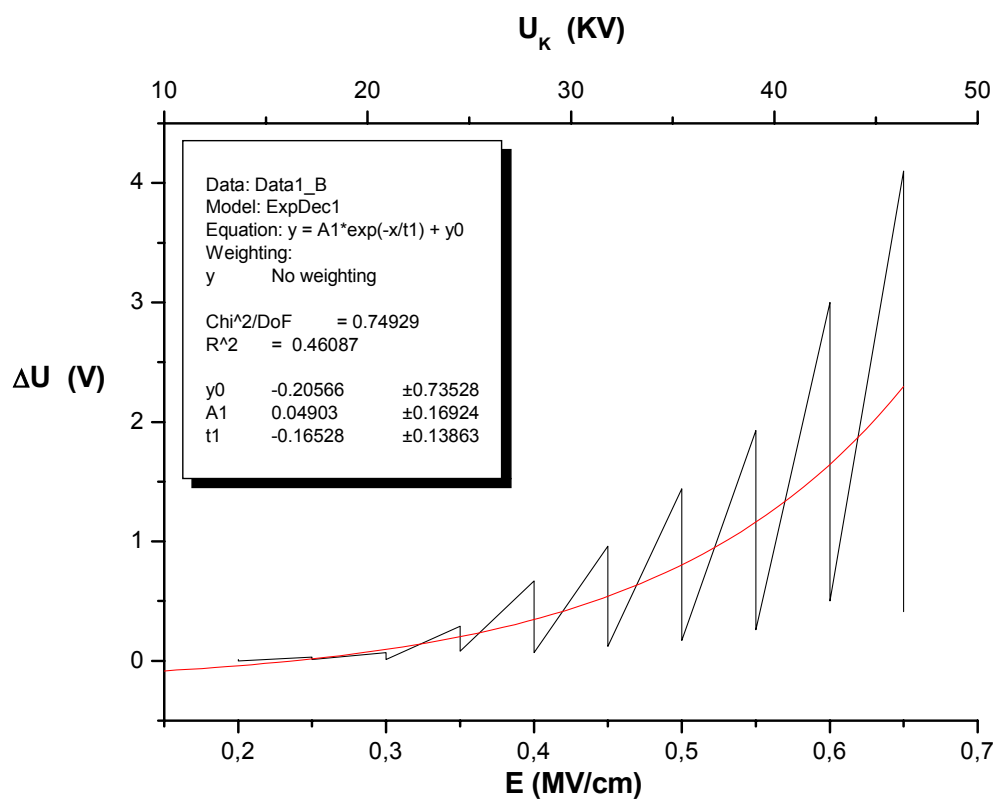


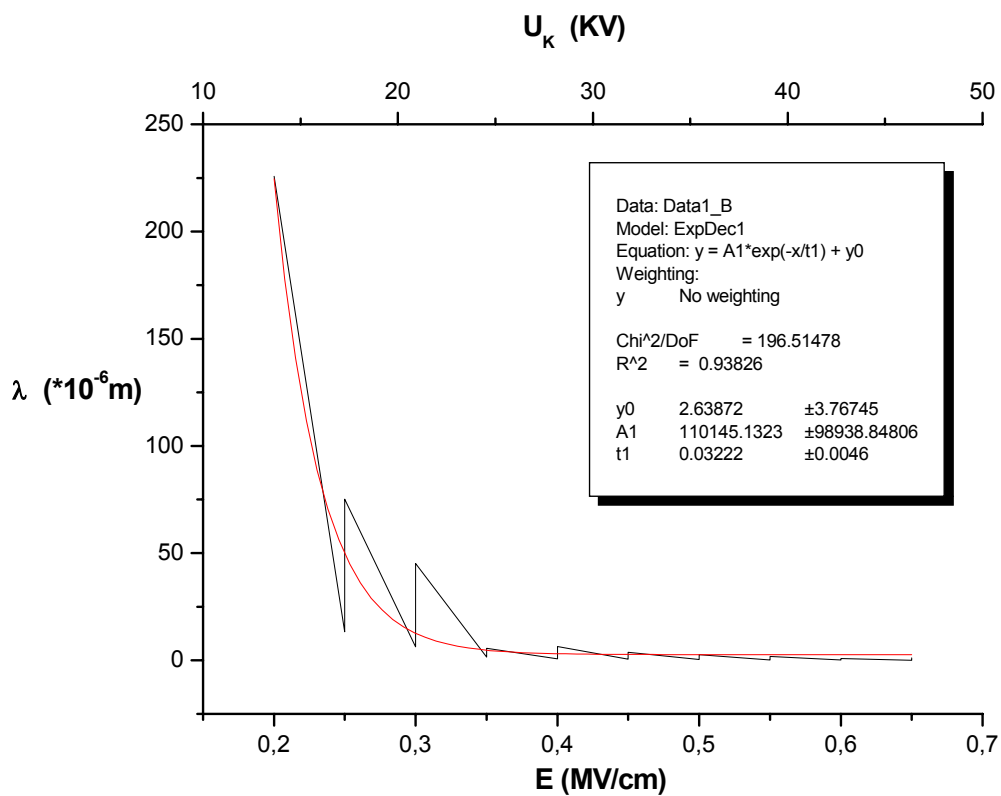
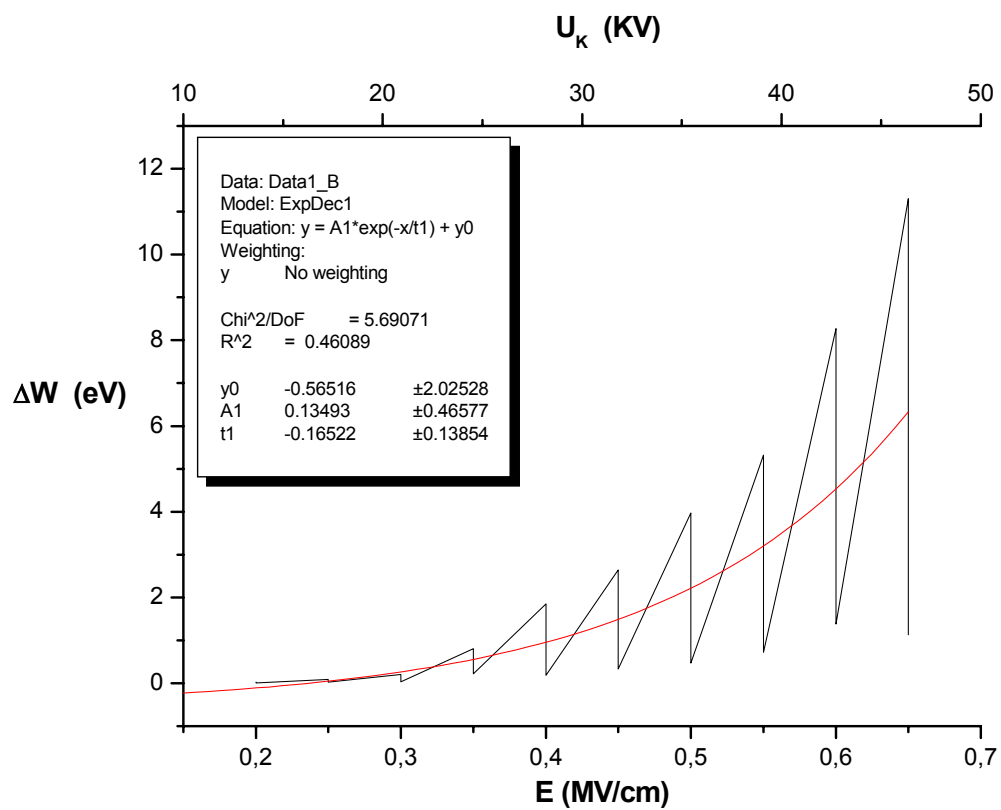


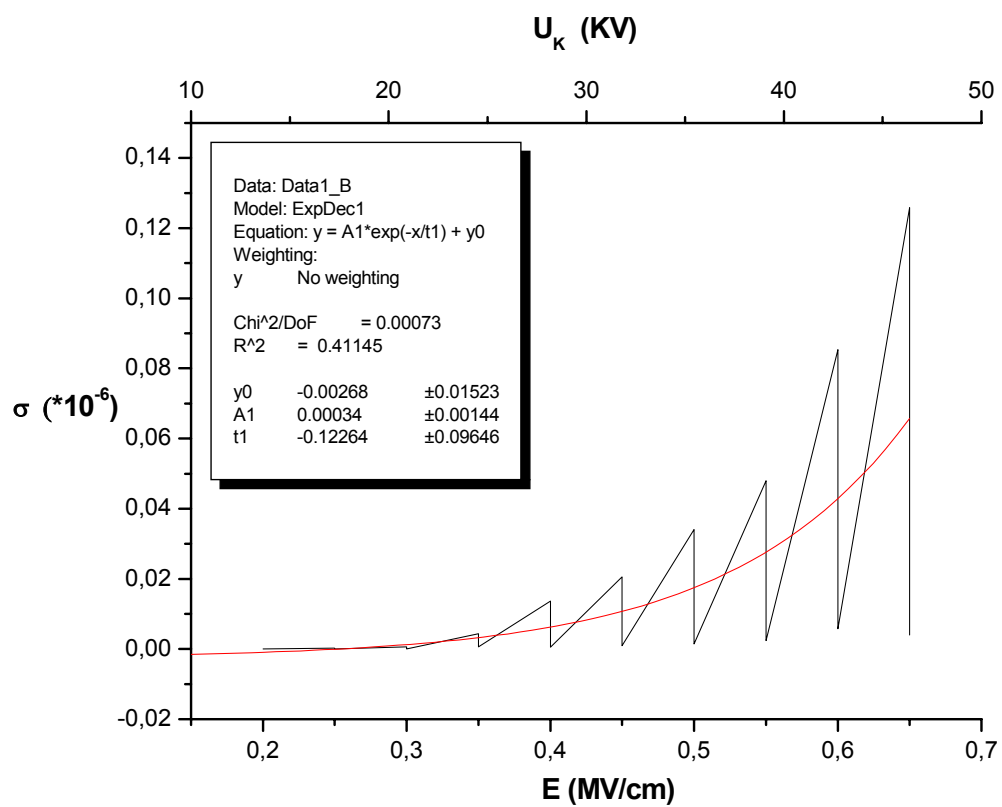




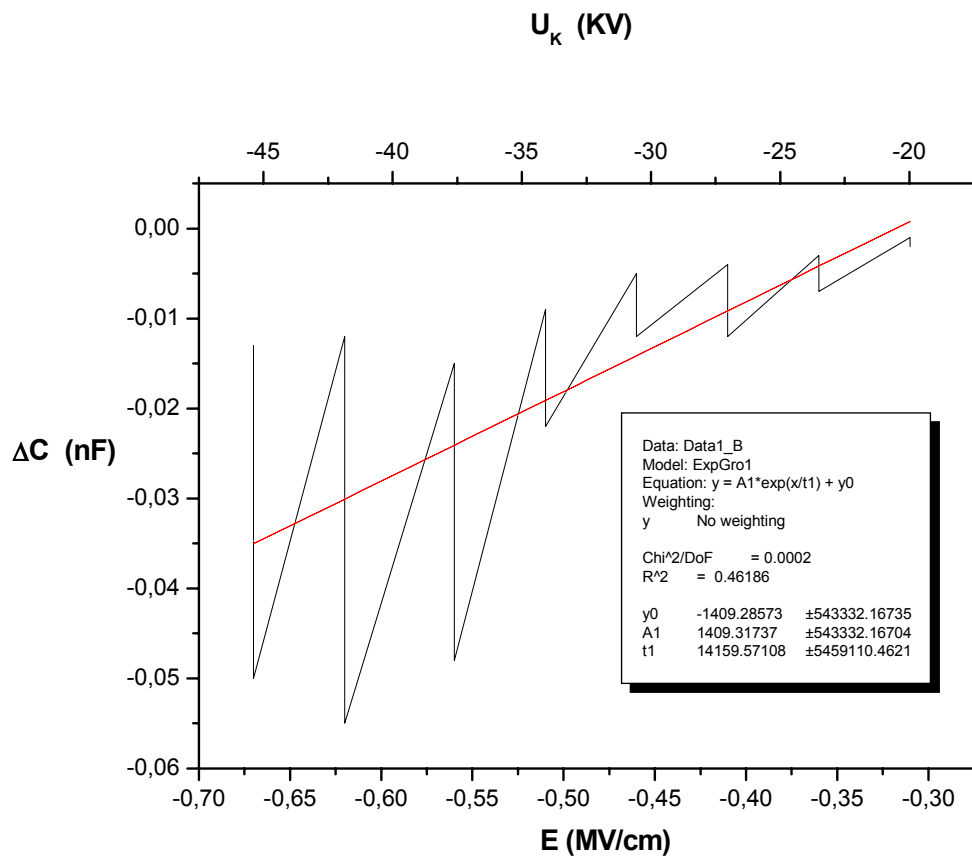
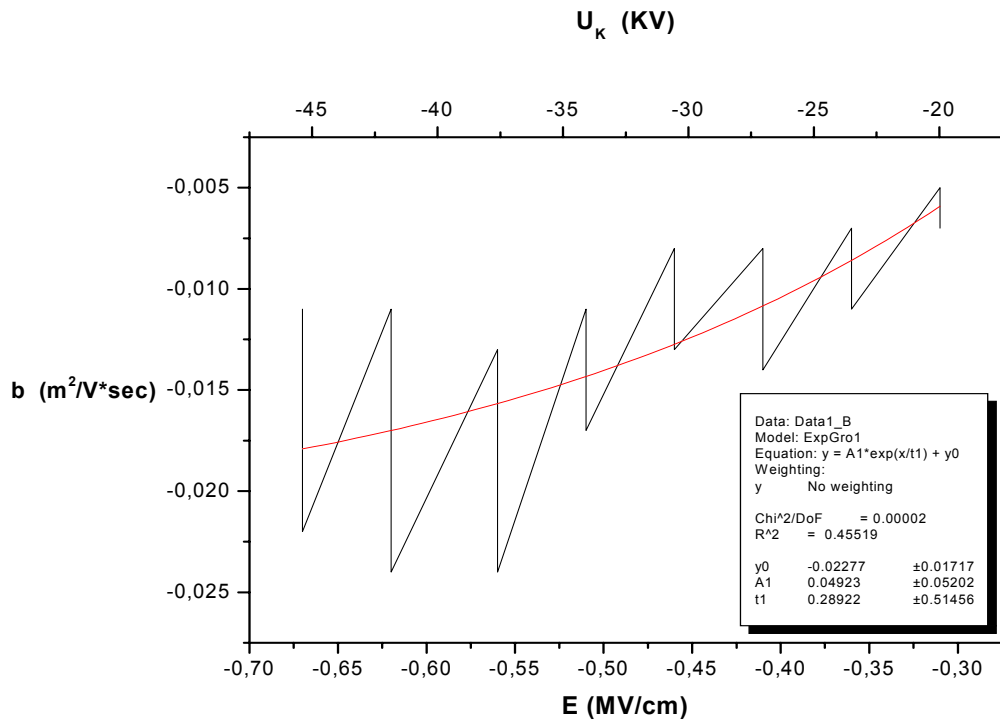


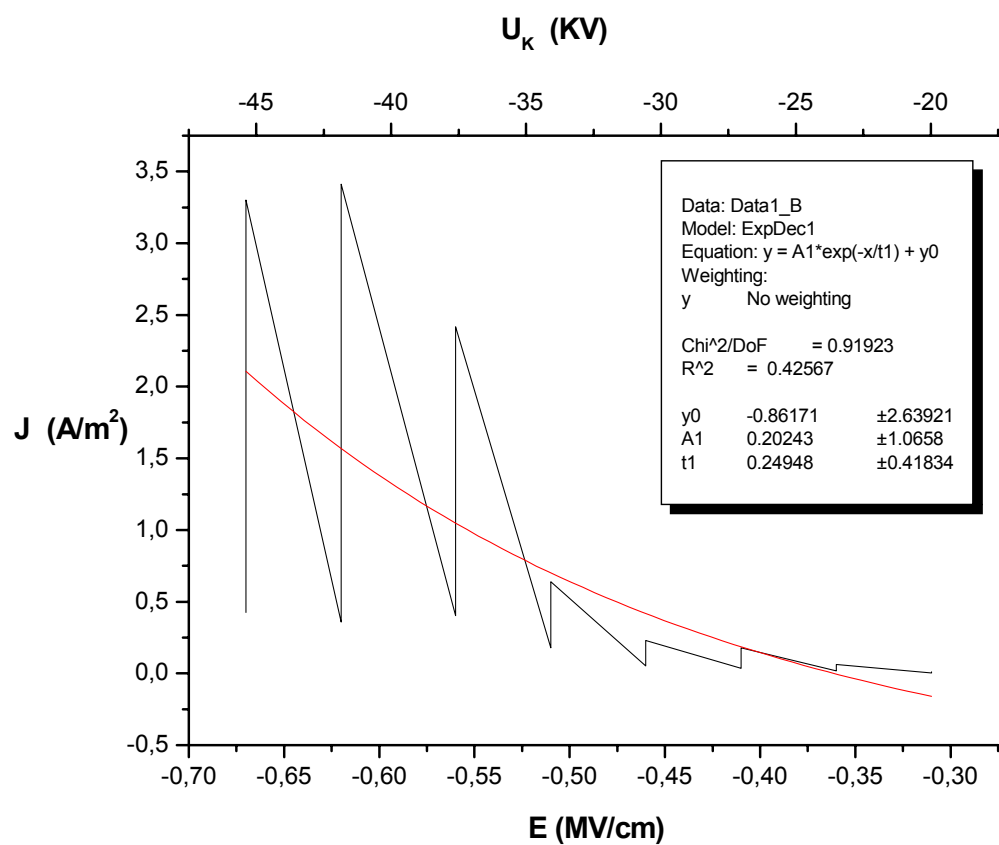
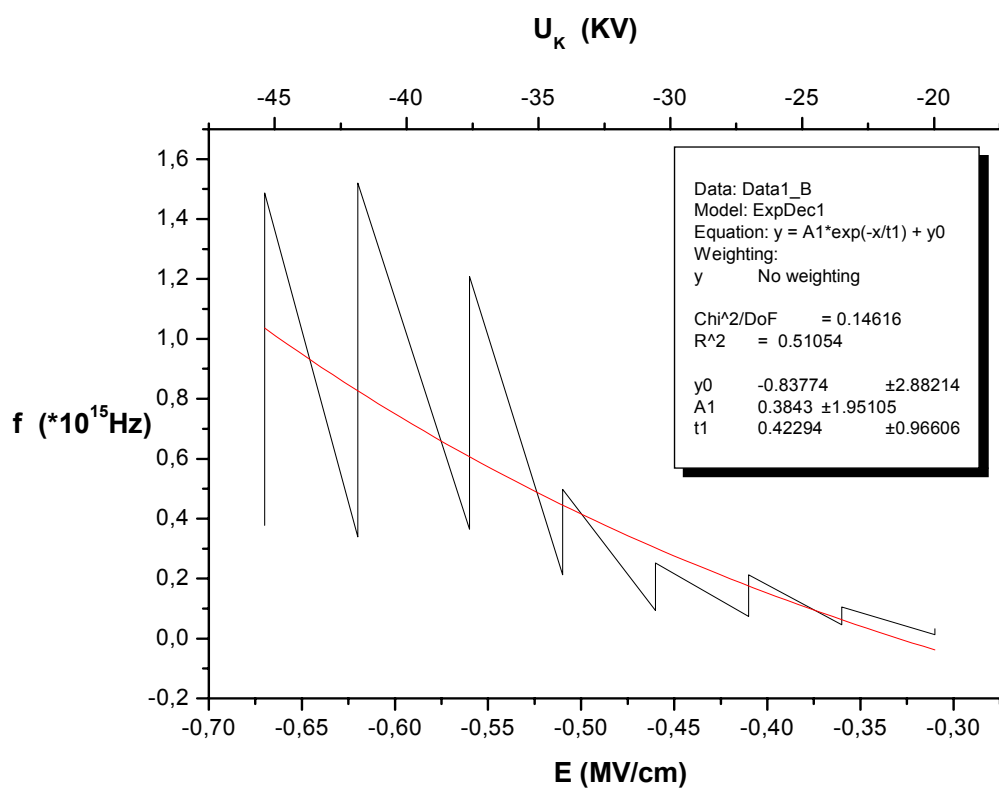


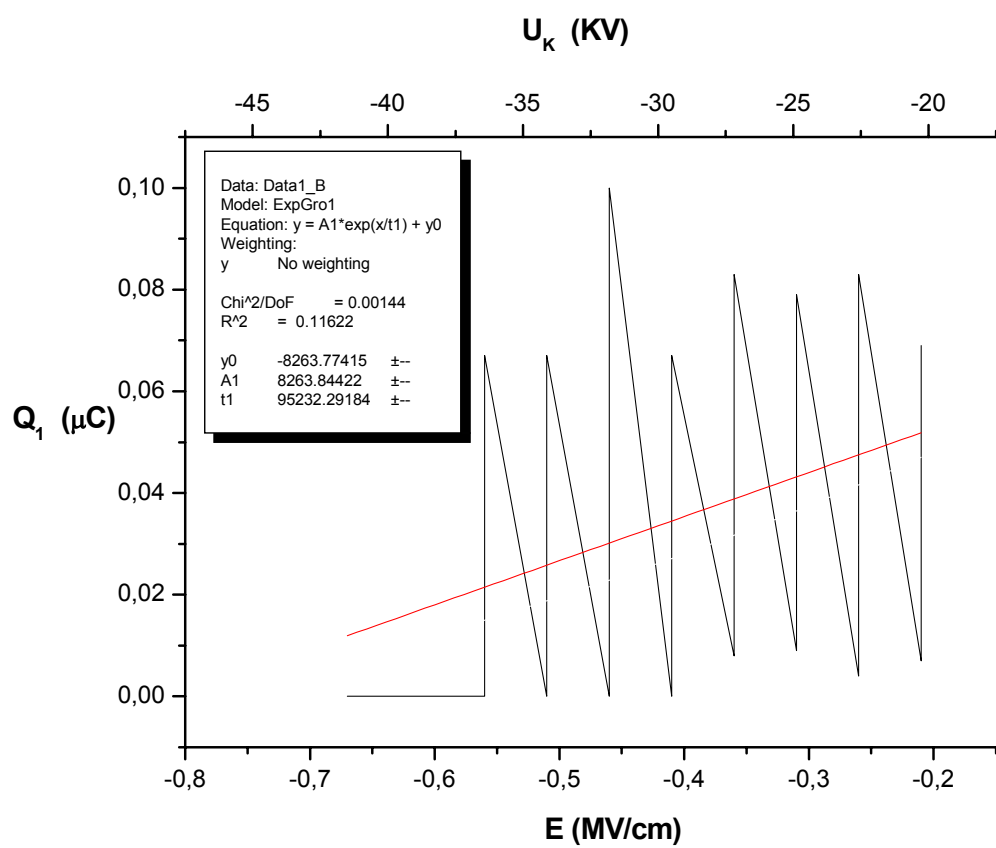
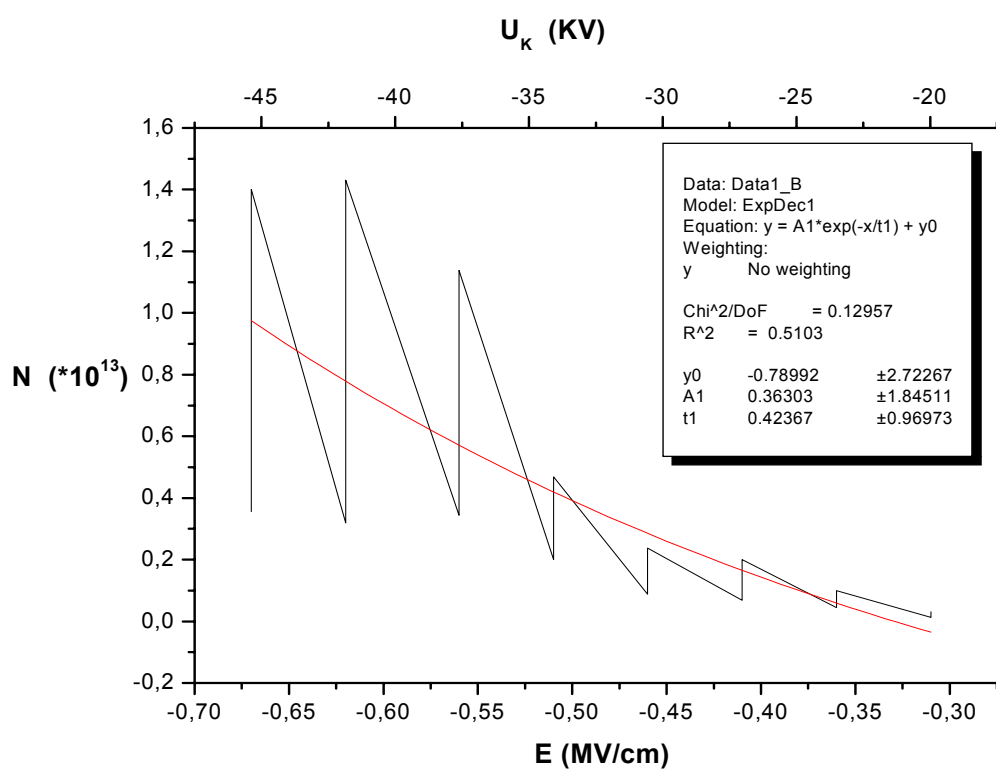




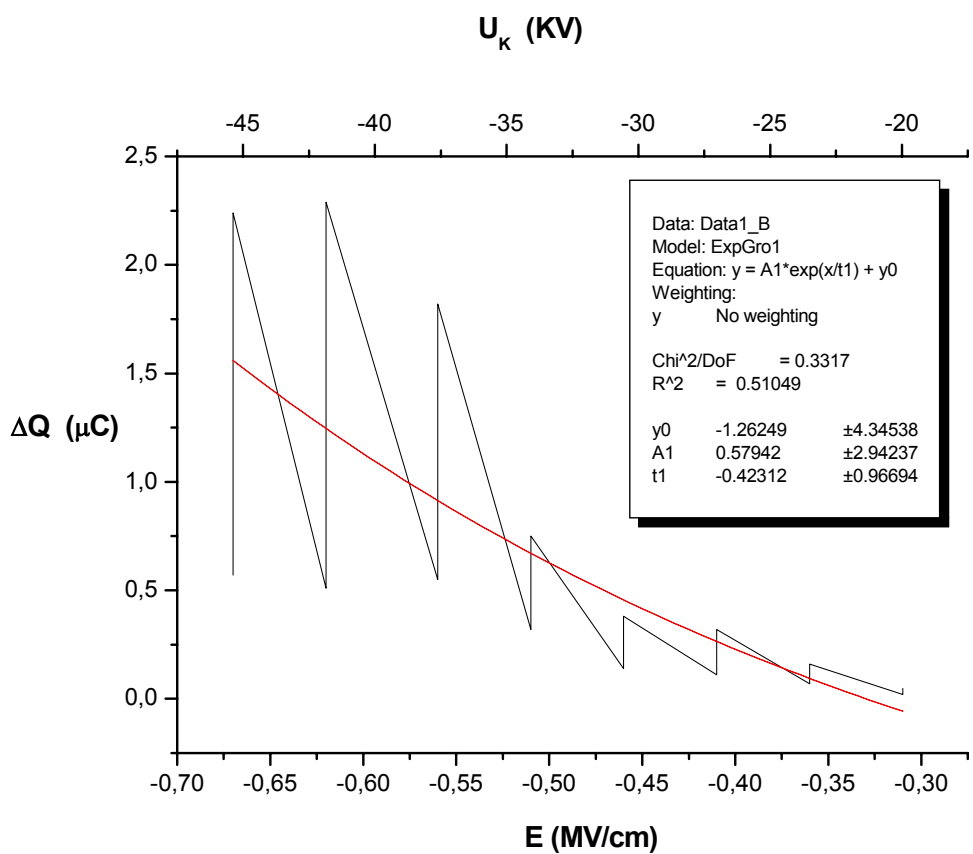
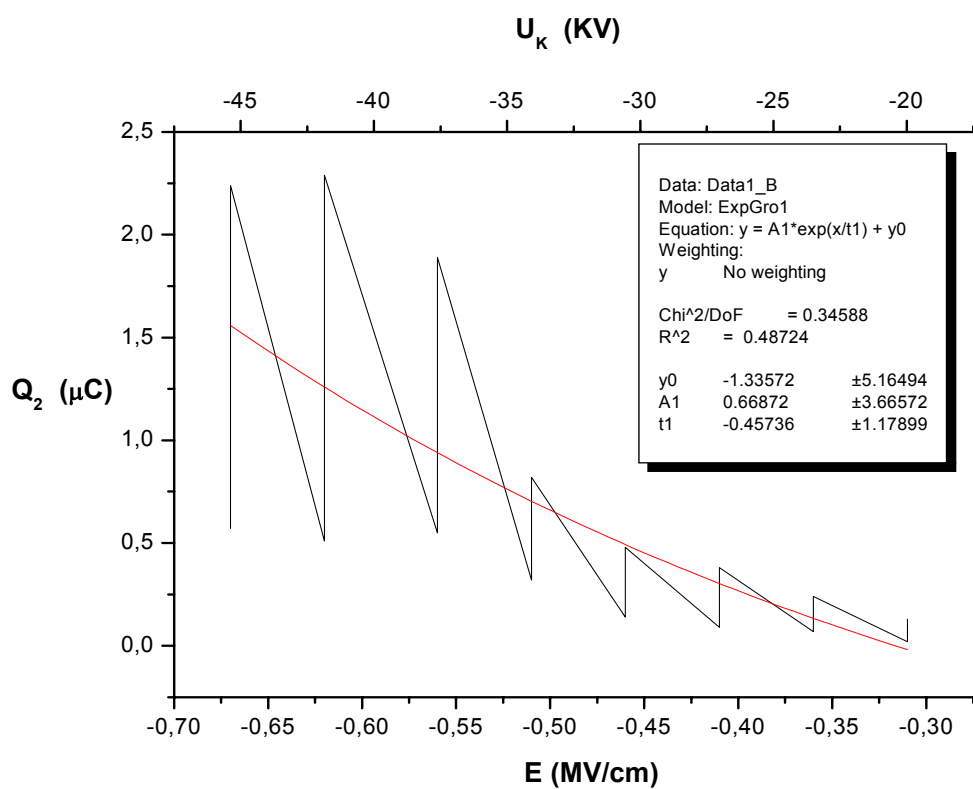
Αρνητική πολικότητα  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 20^\circ\text{C}$

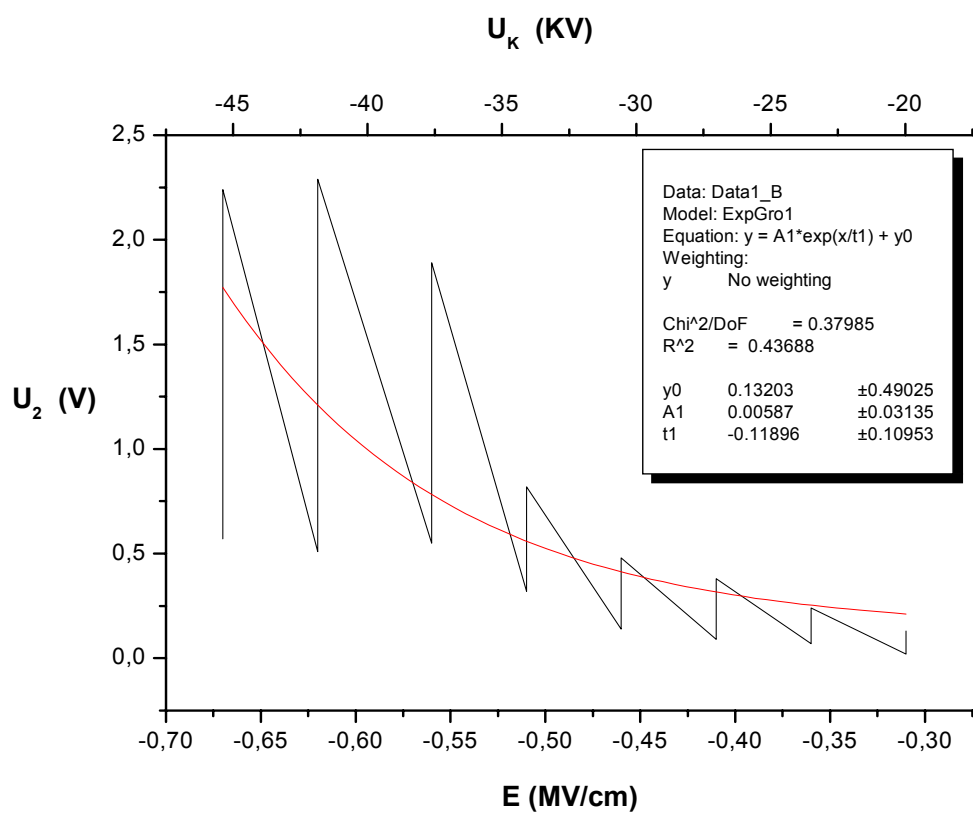
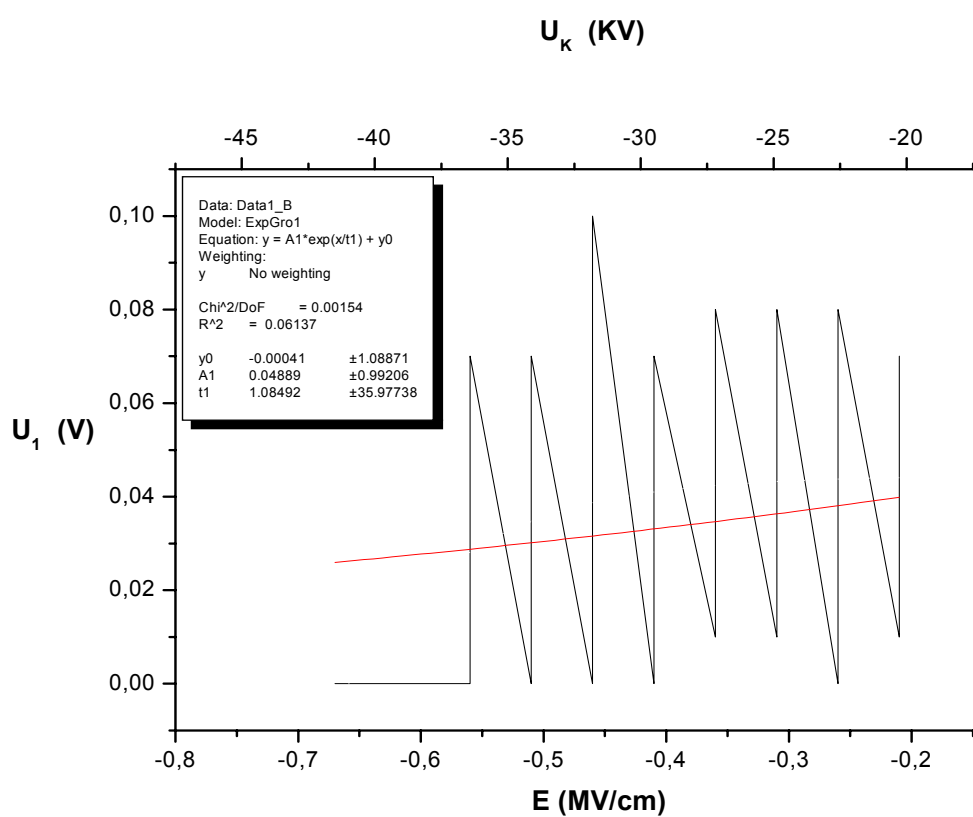


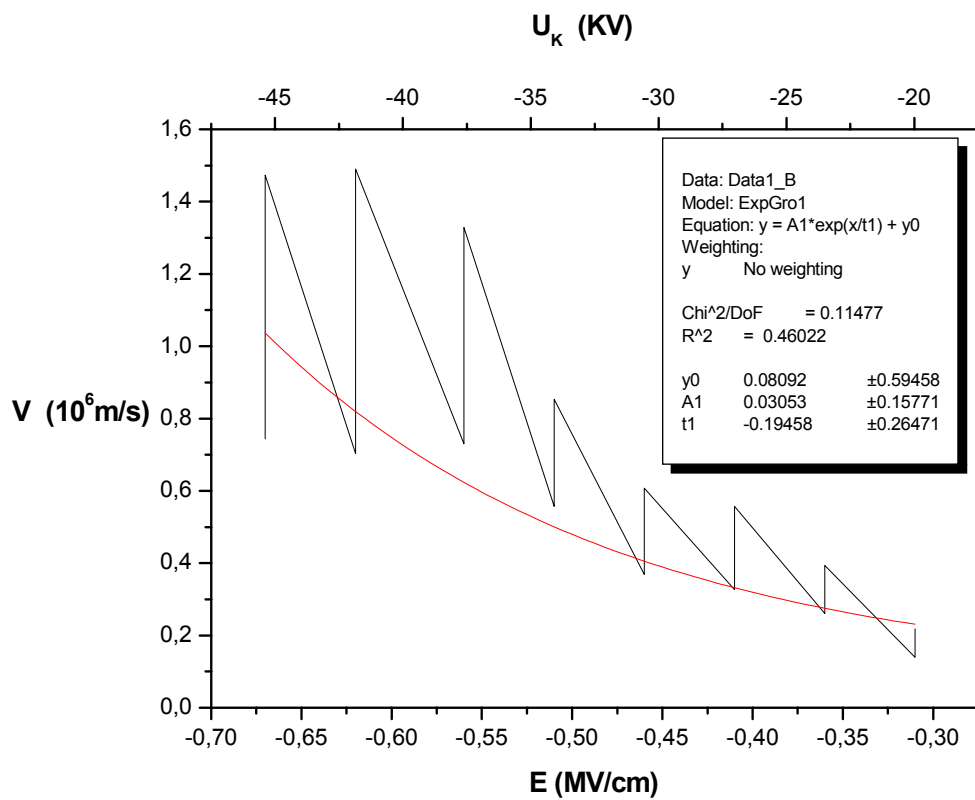
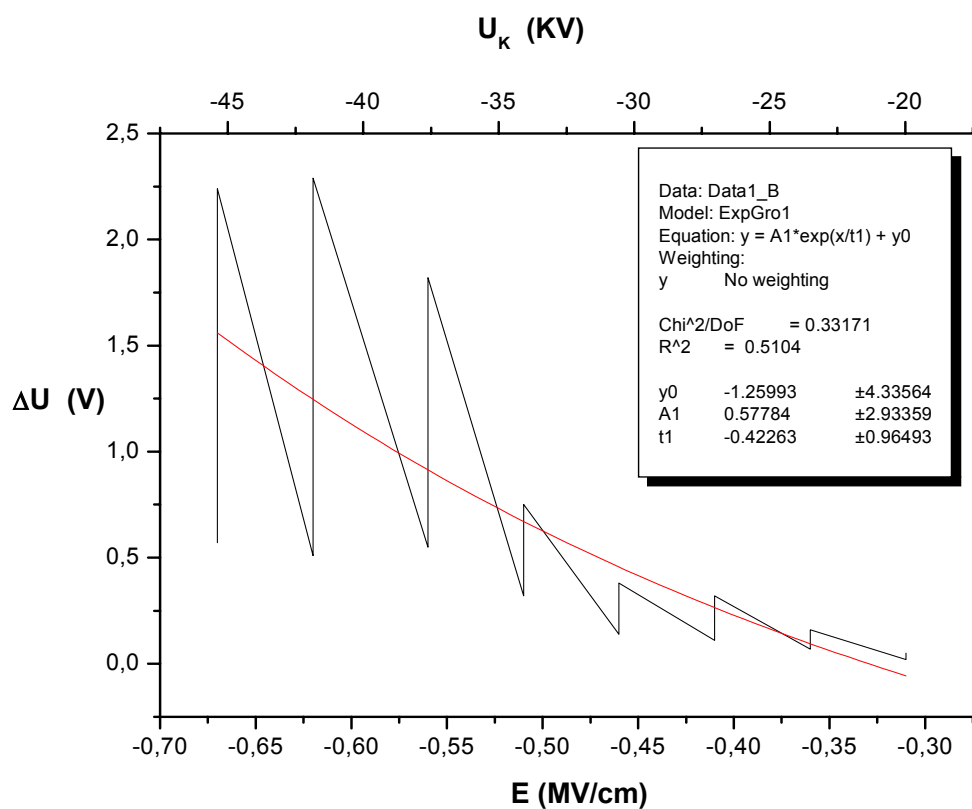


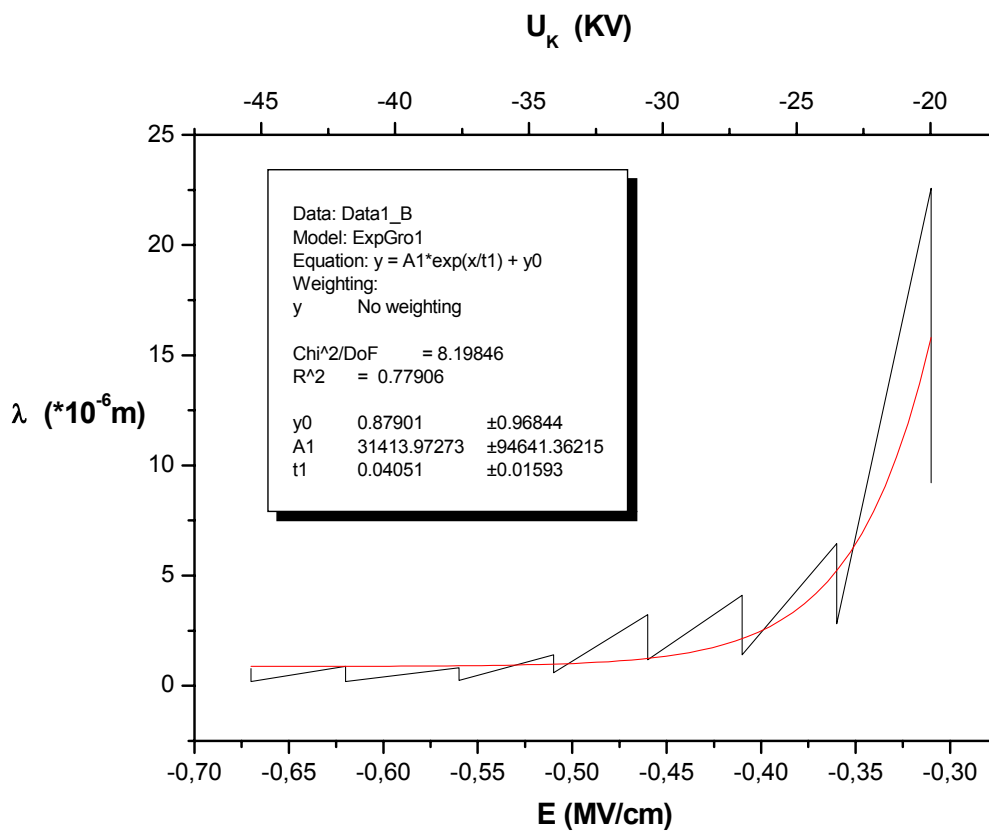
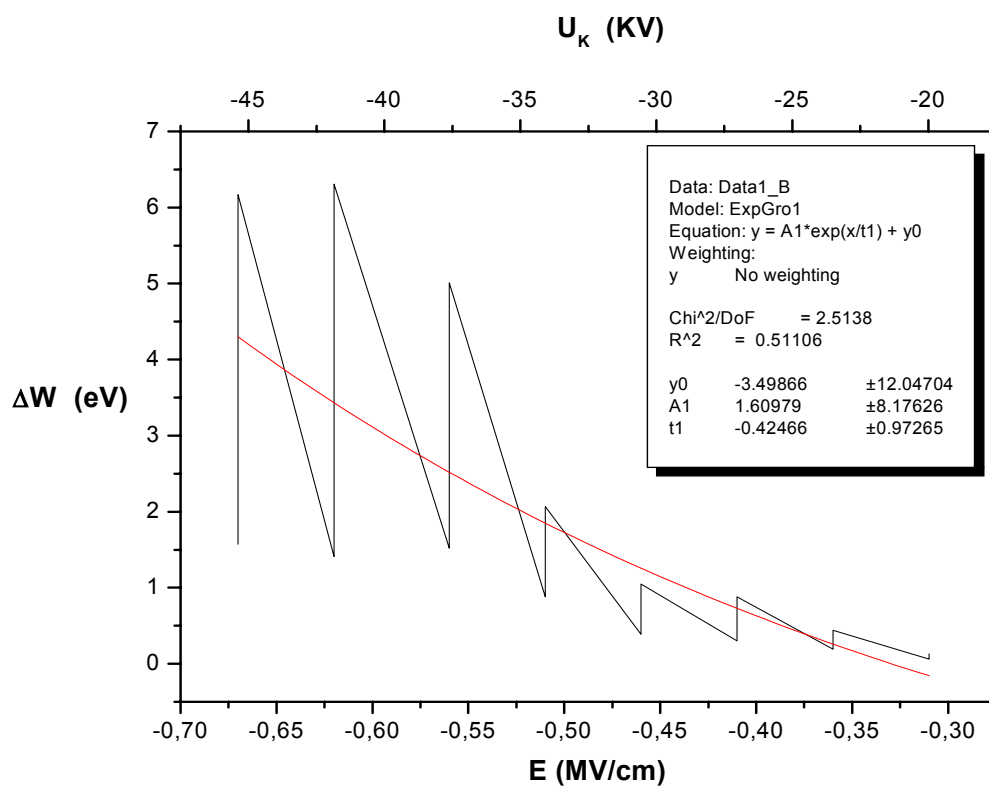


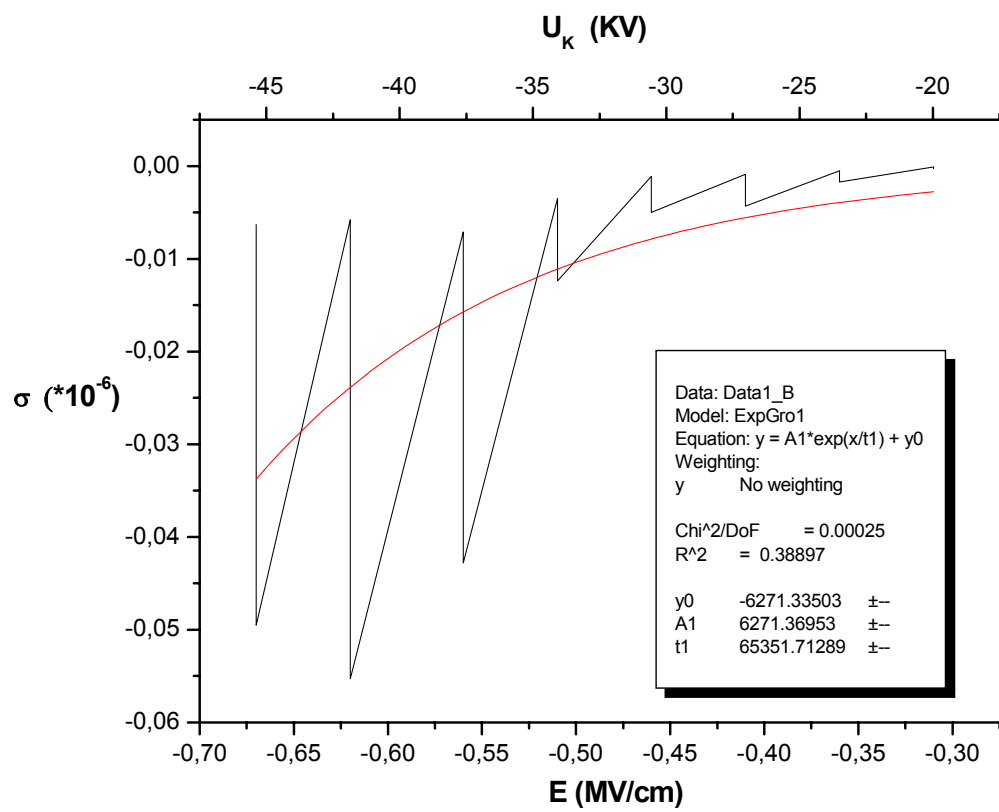




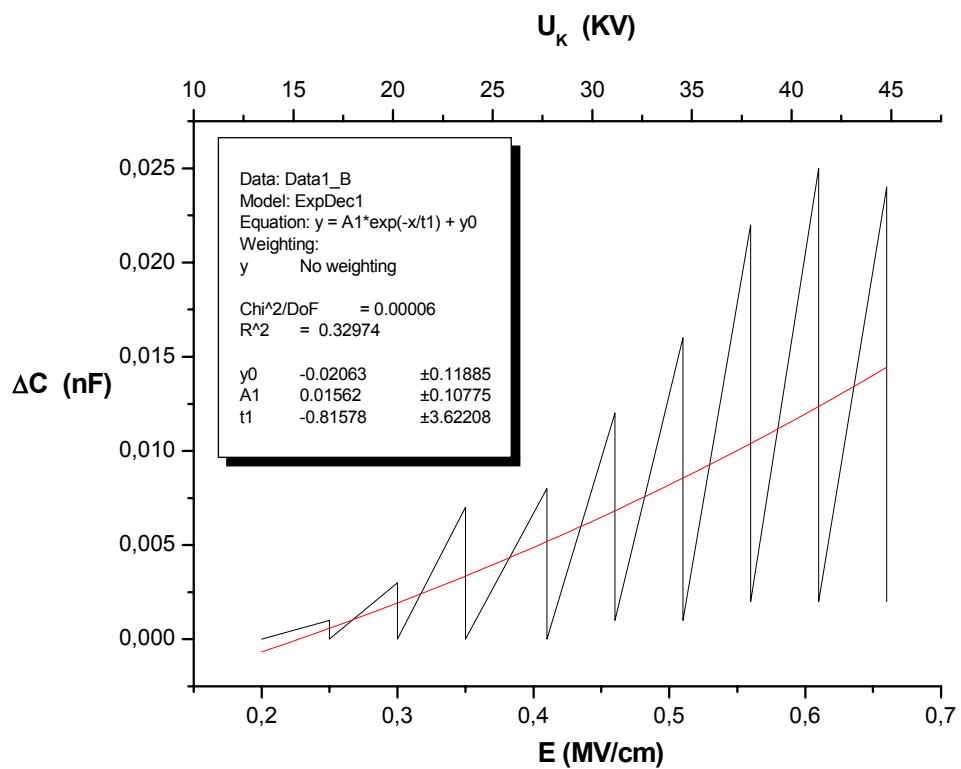
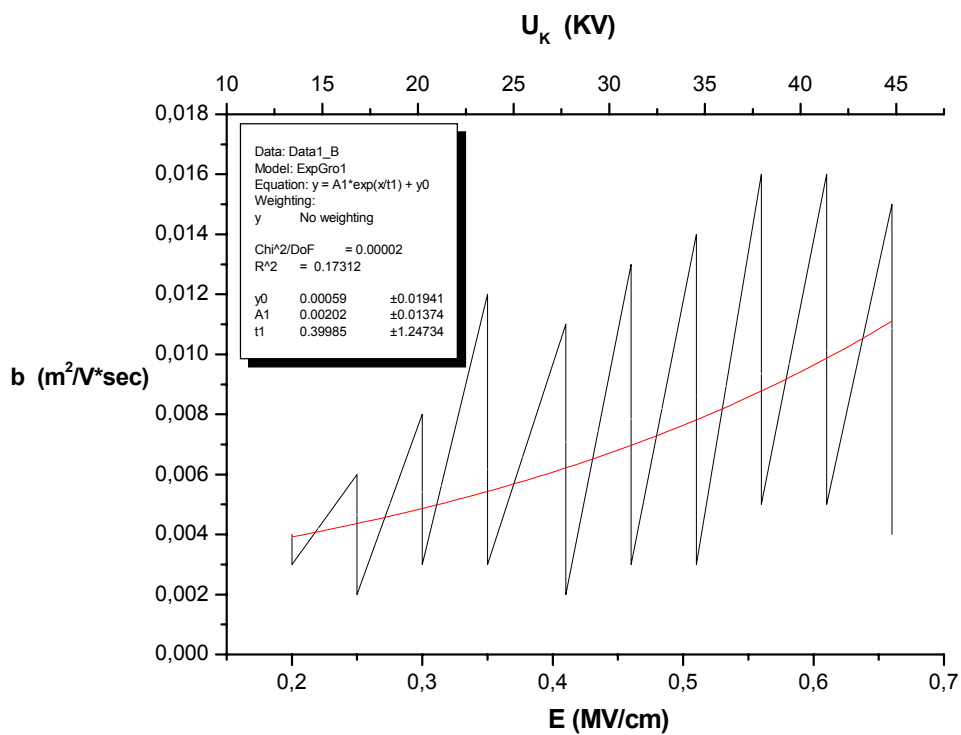


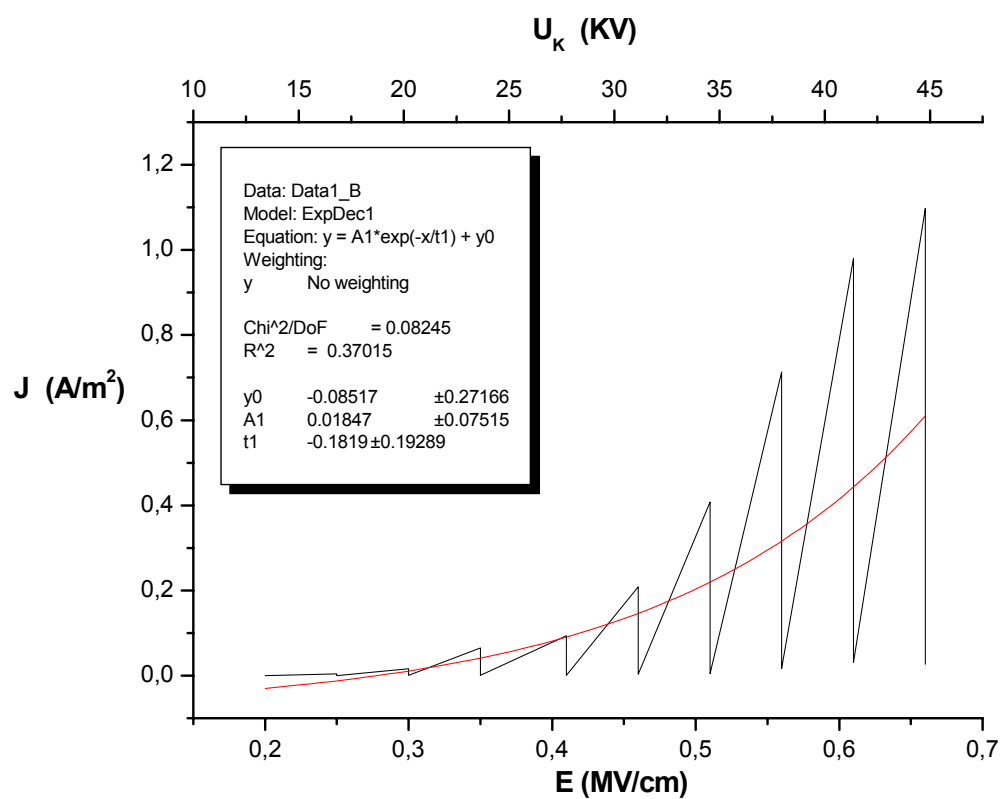
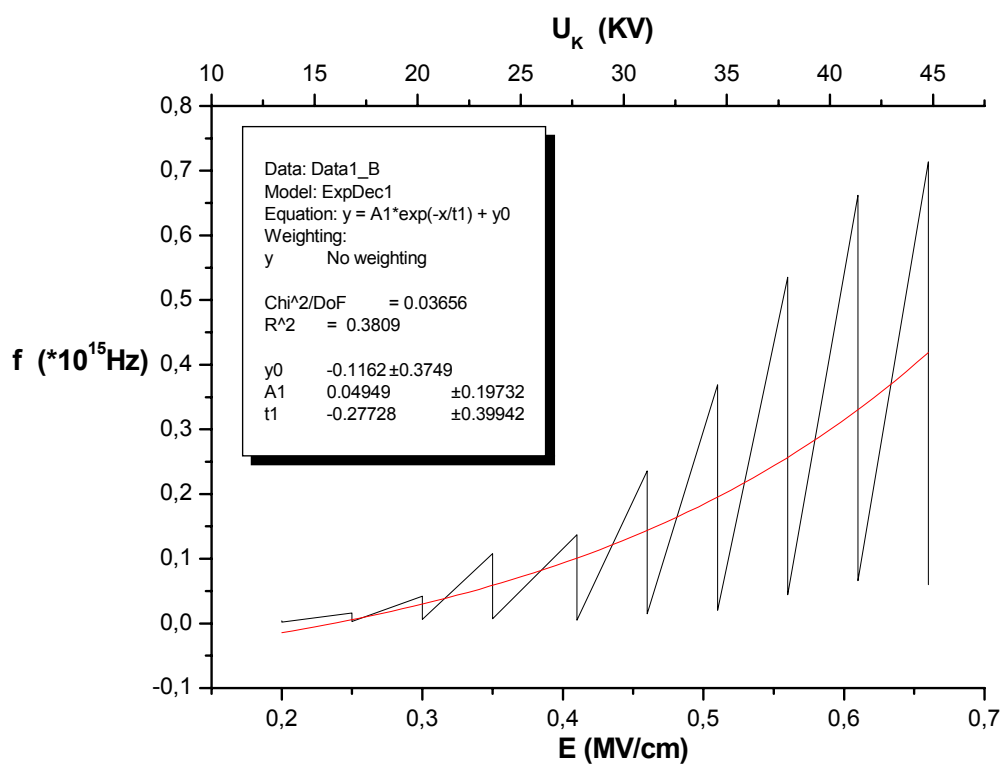


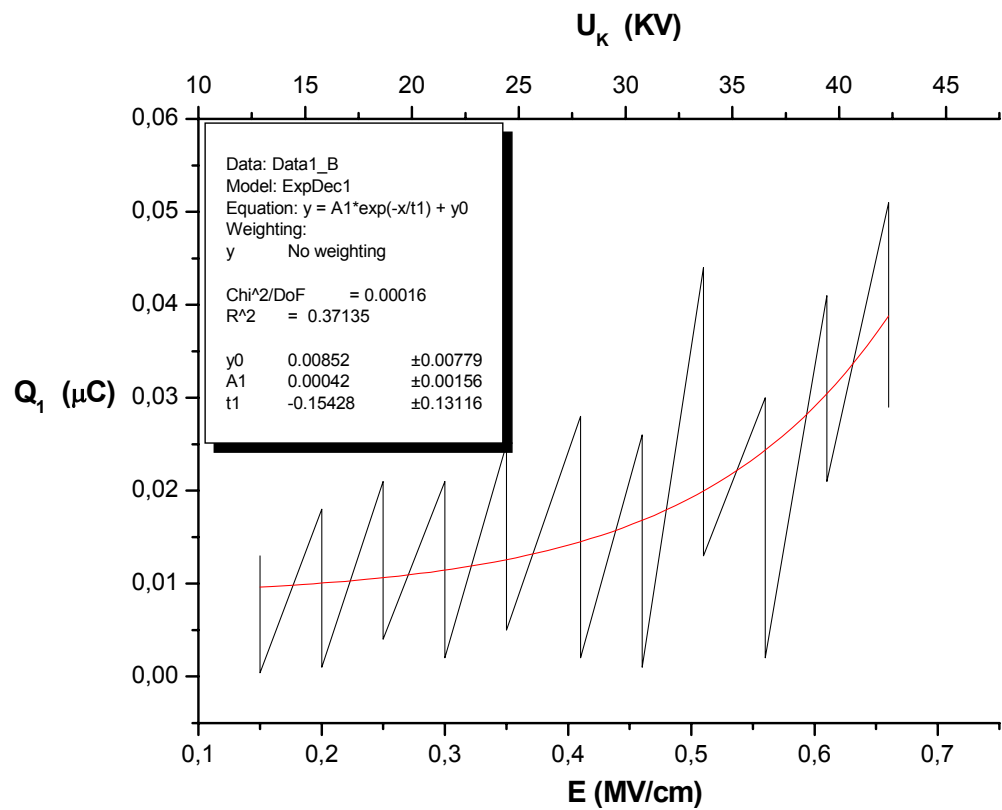
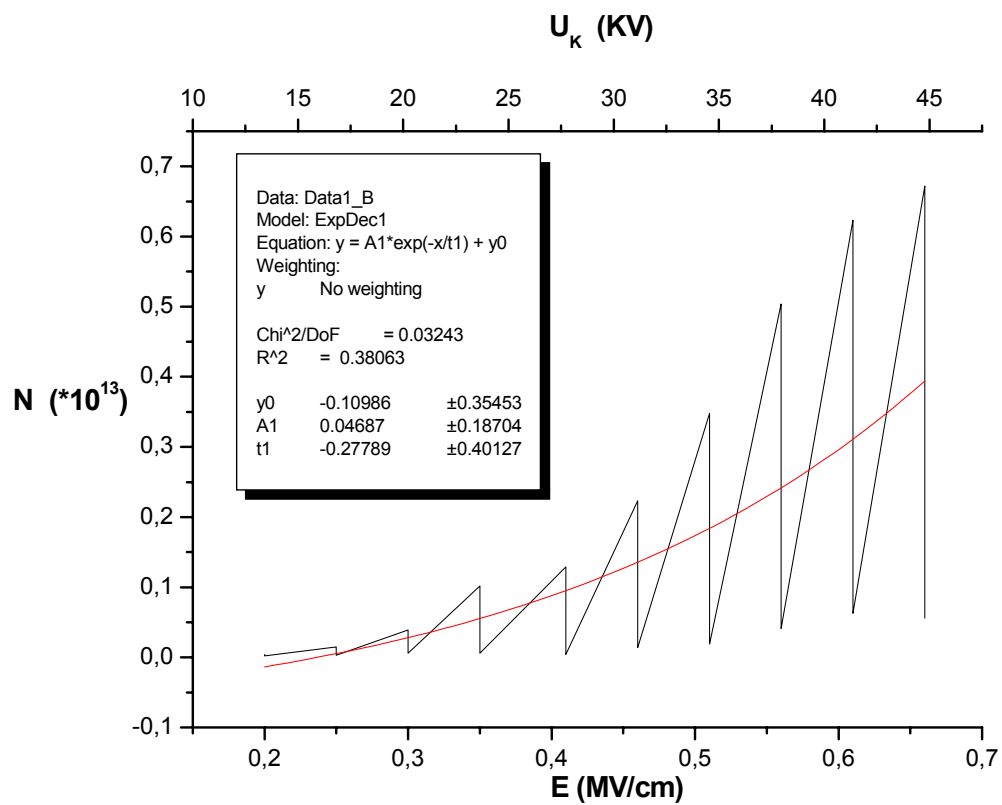




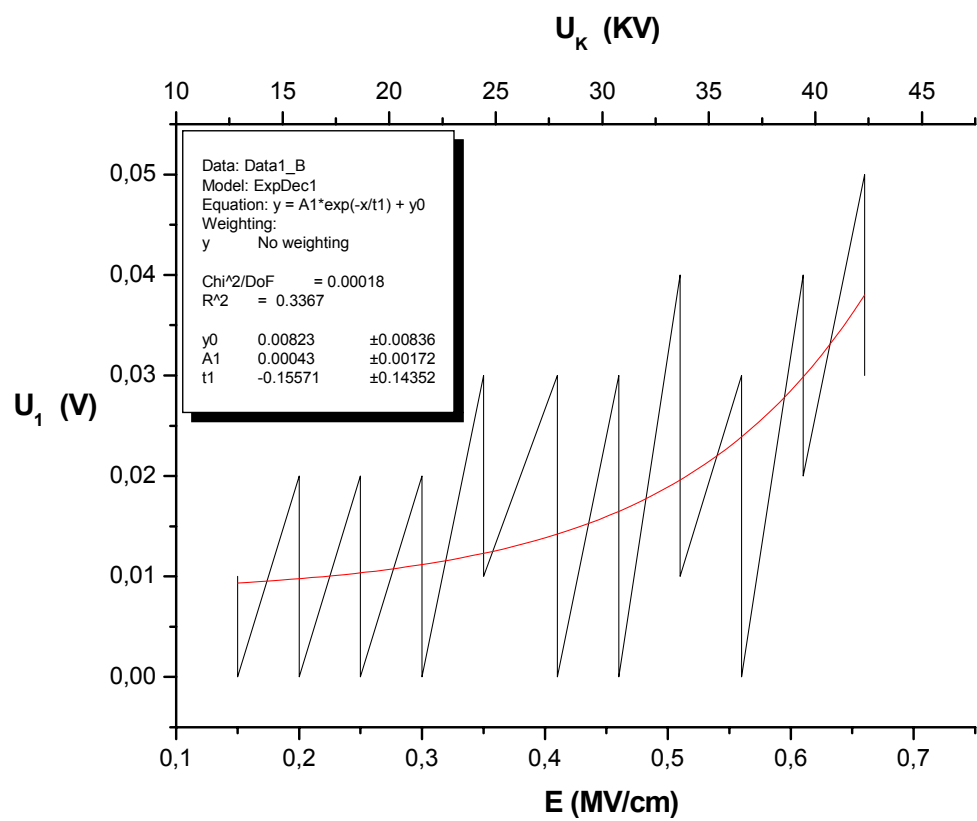
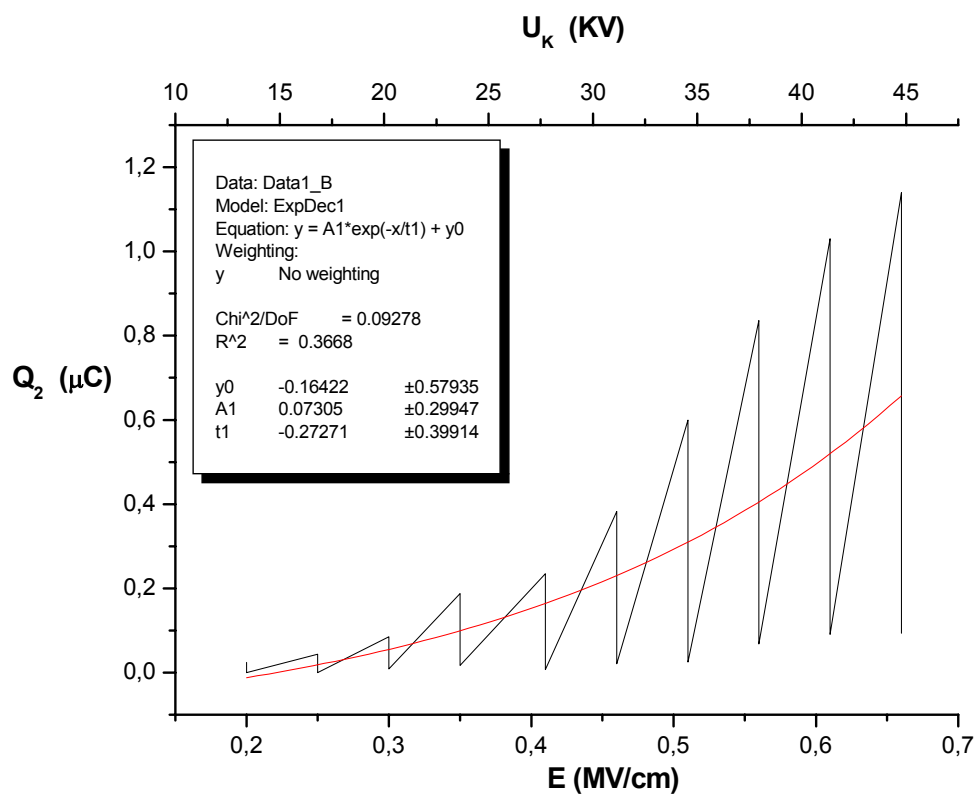
Θετική πολικότητα  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 40^\circ\text{C}$

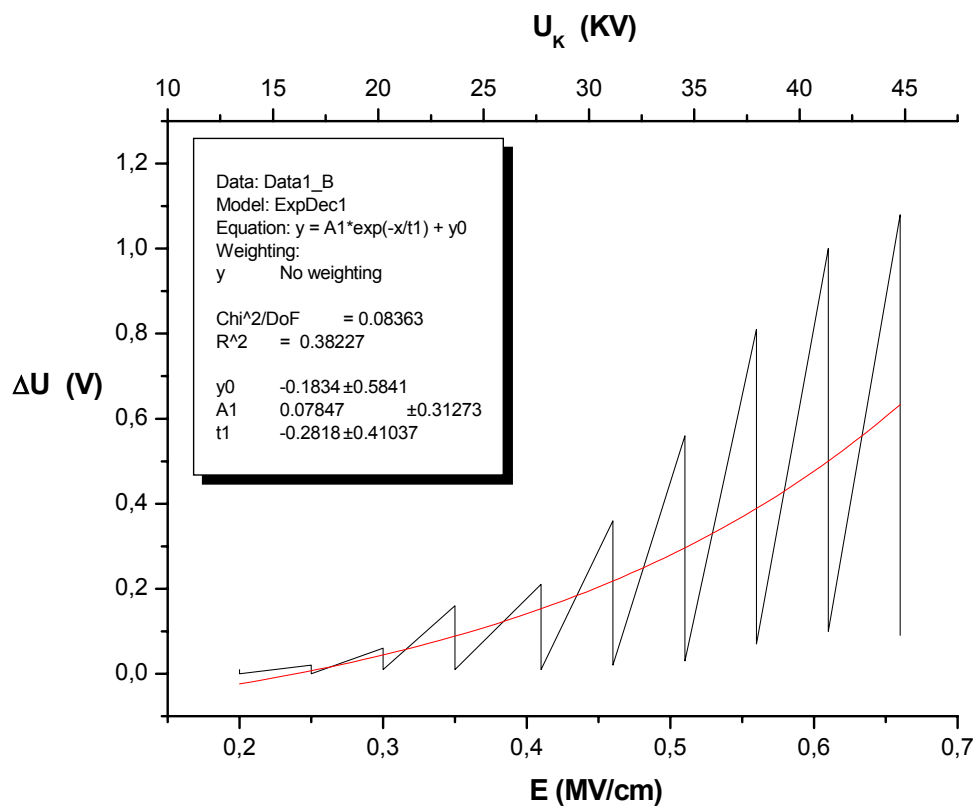
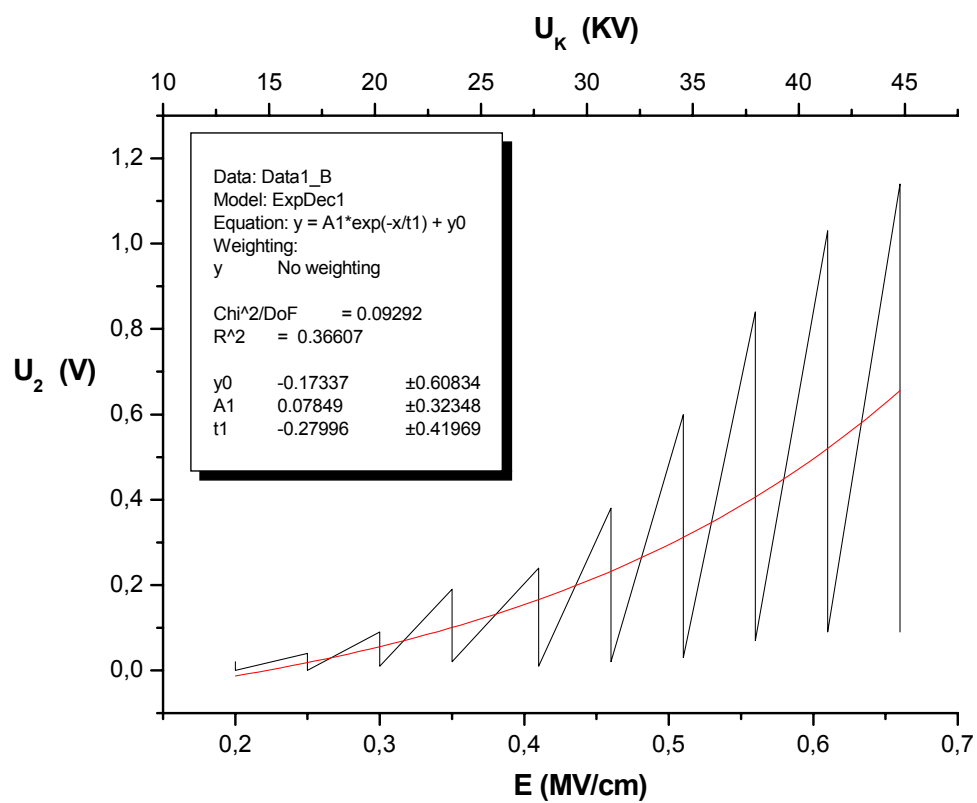


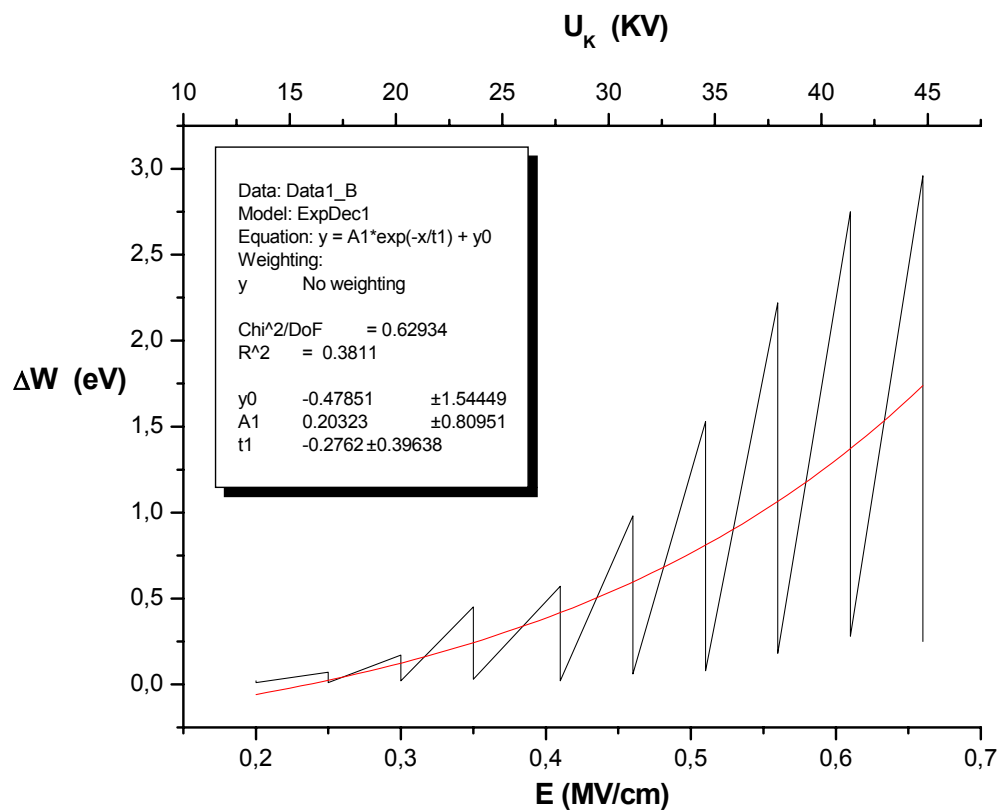
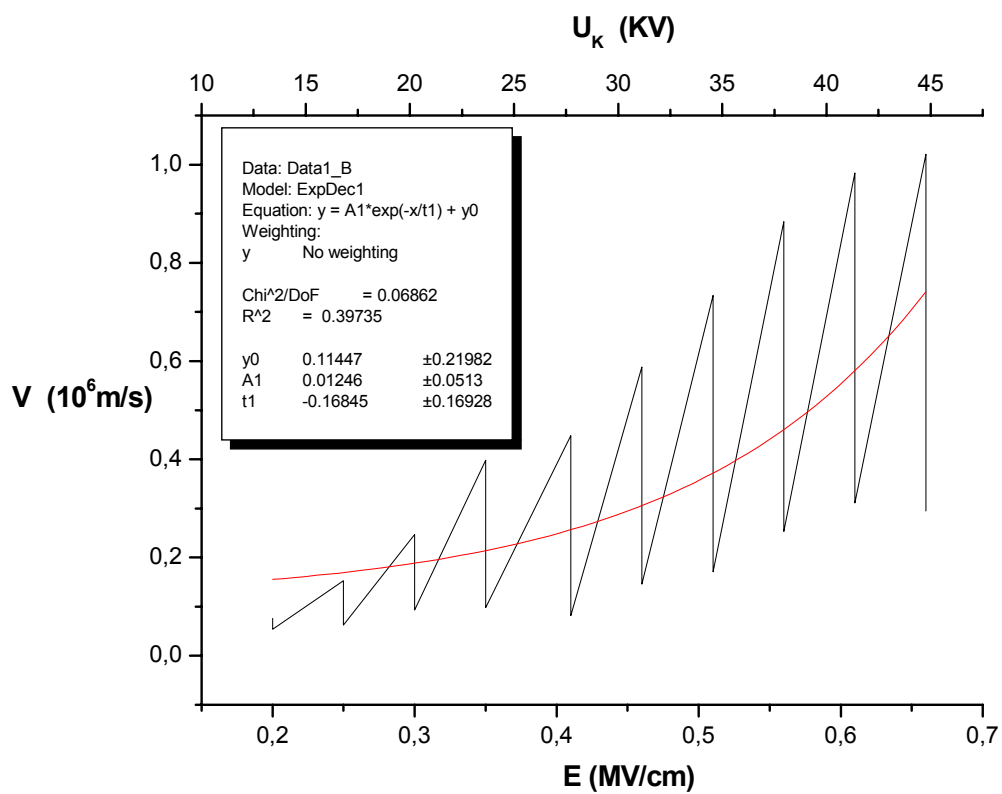


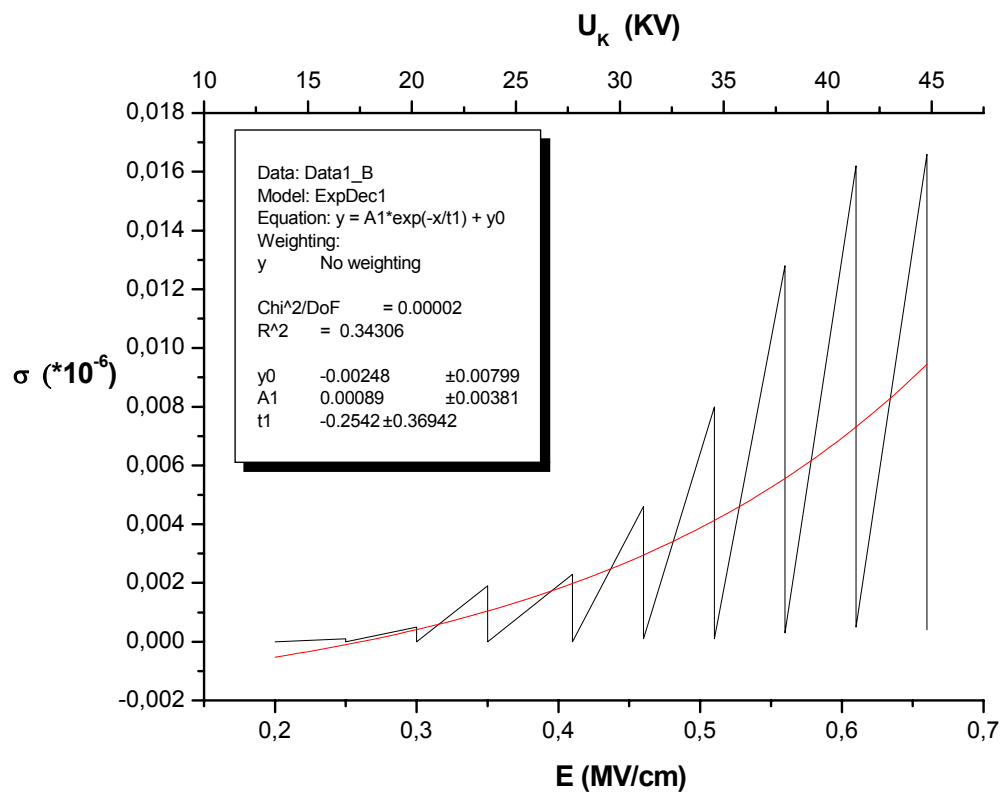
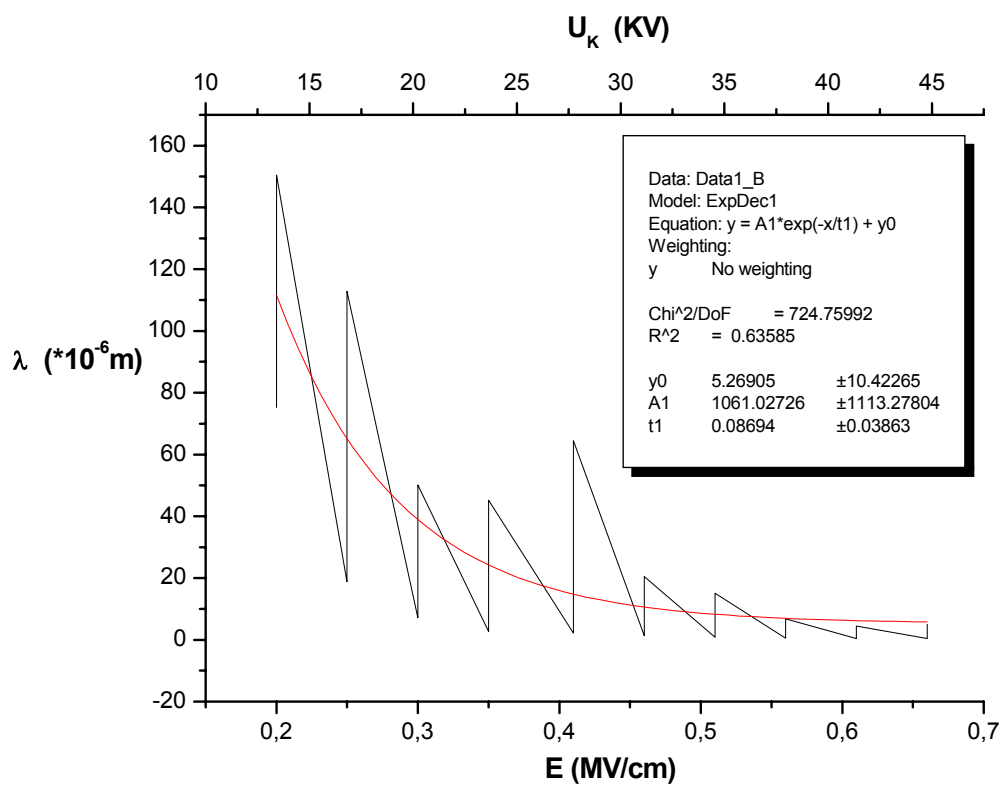


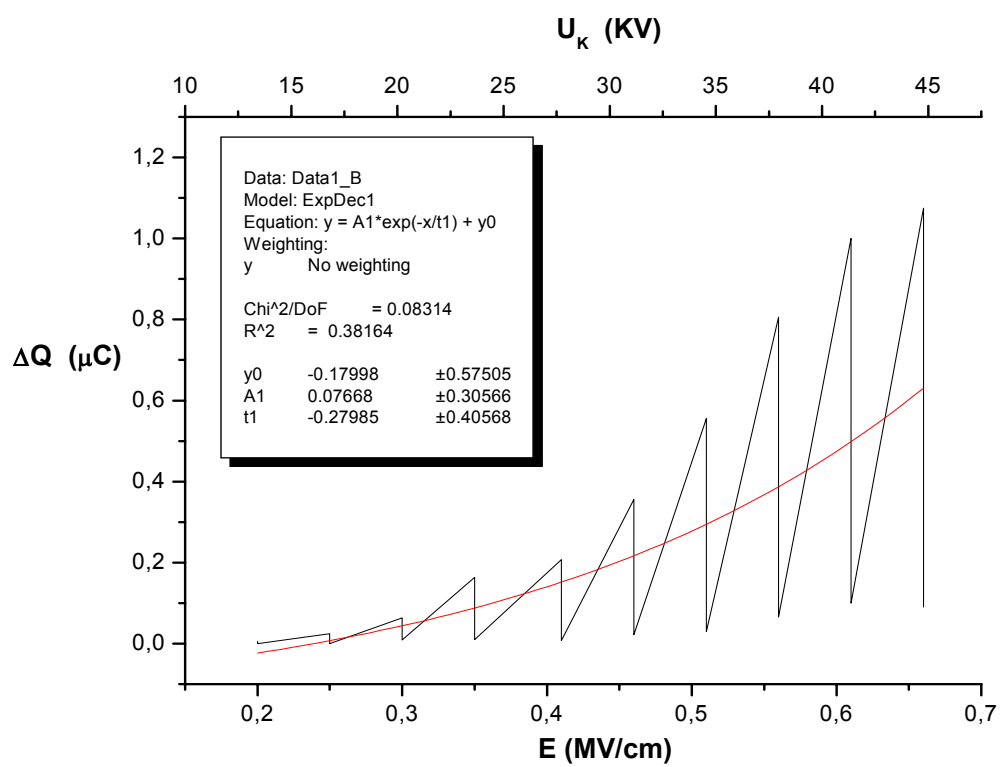




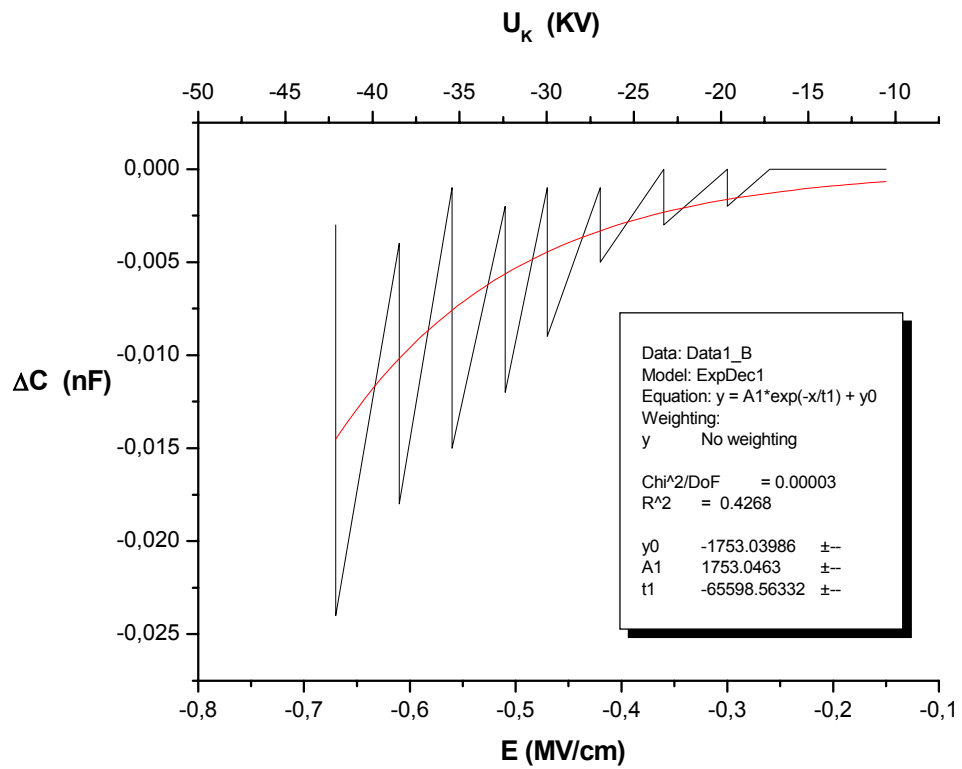
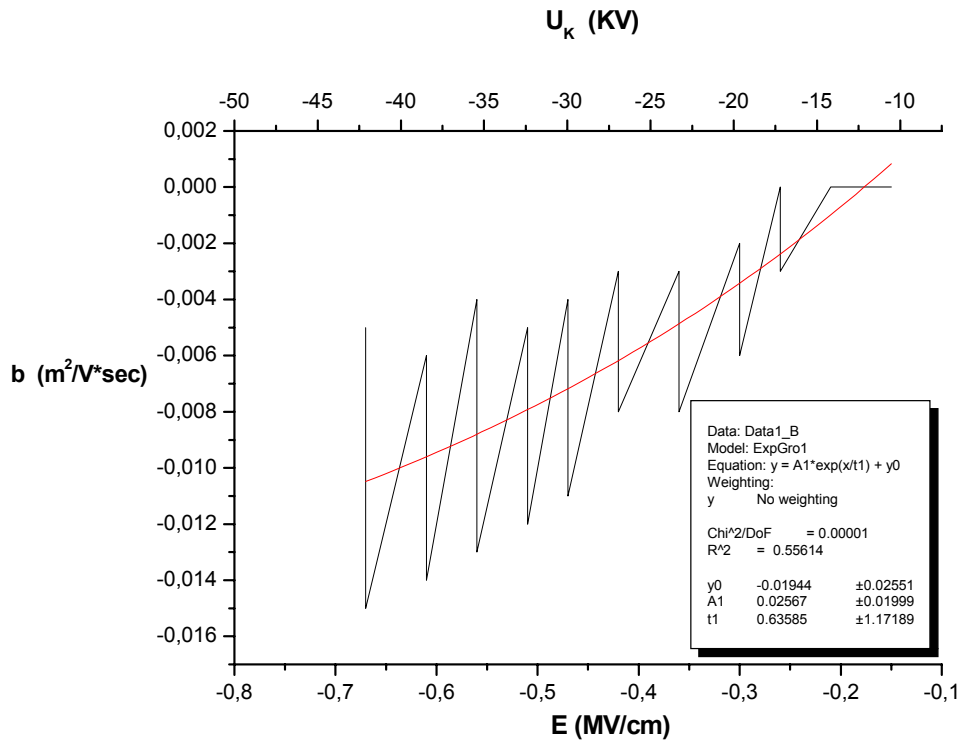


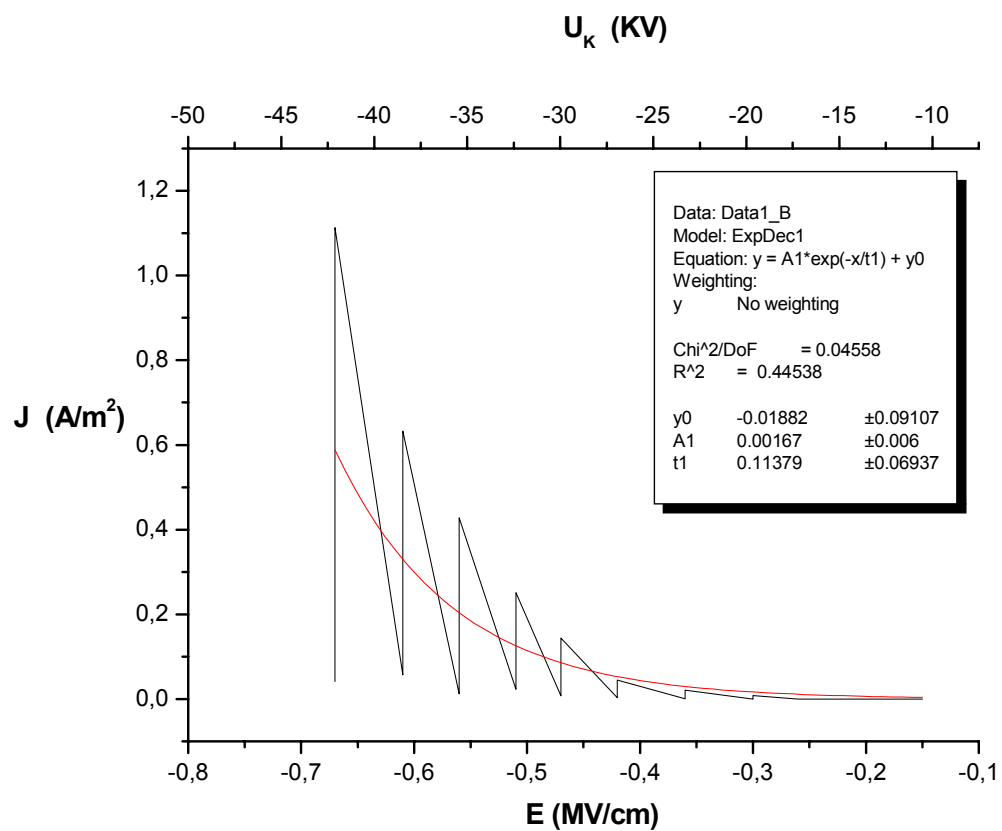
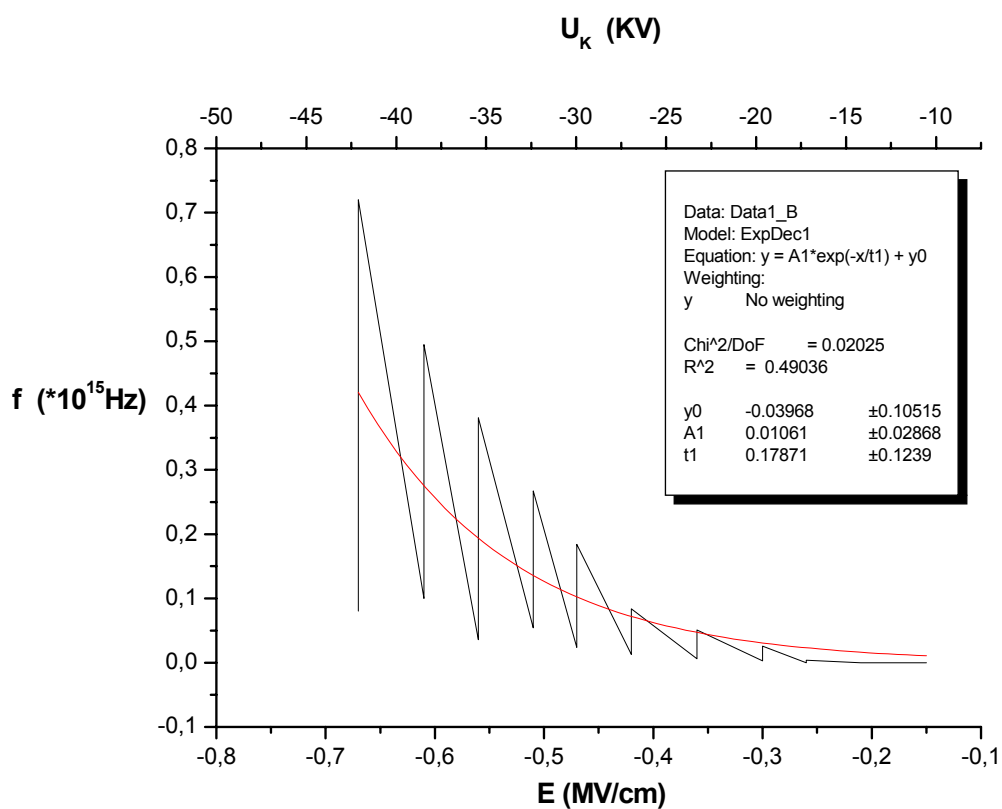


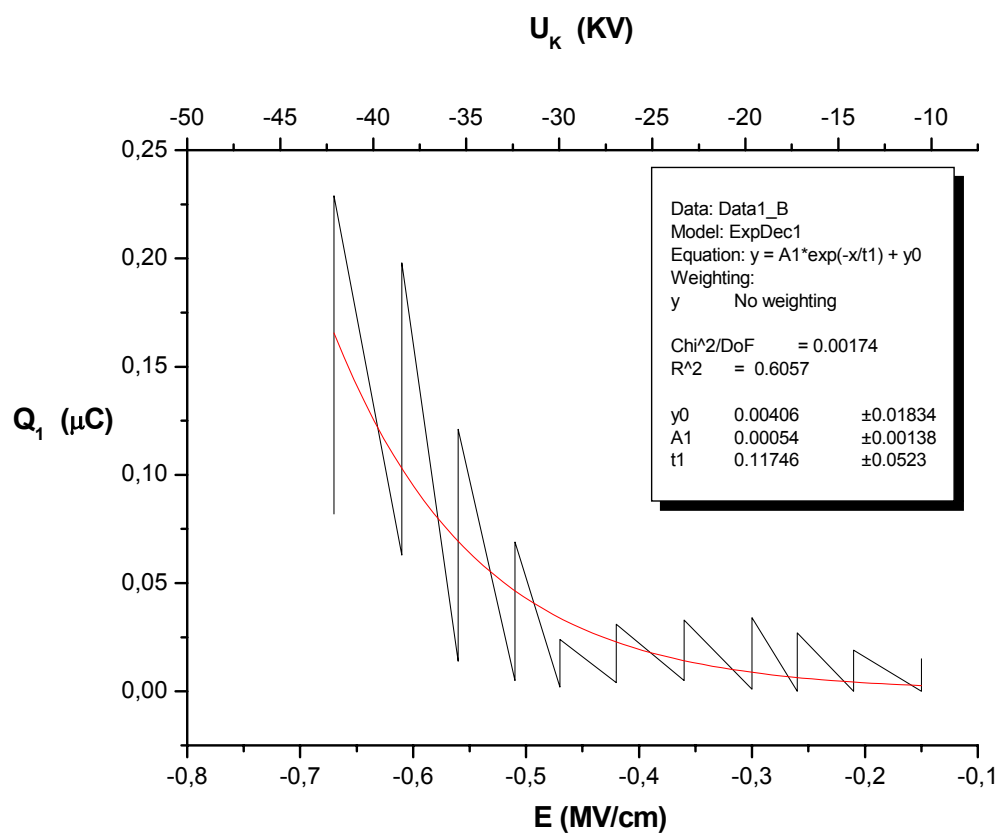
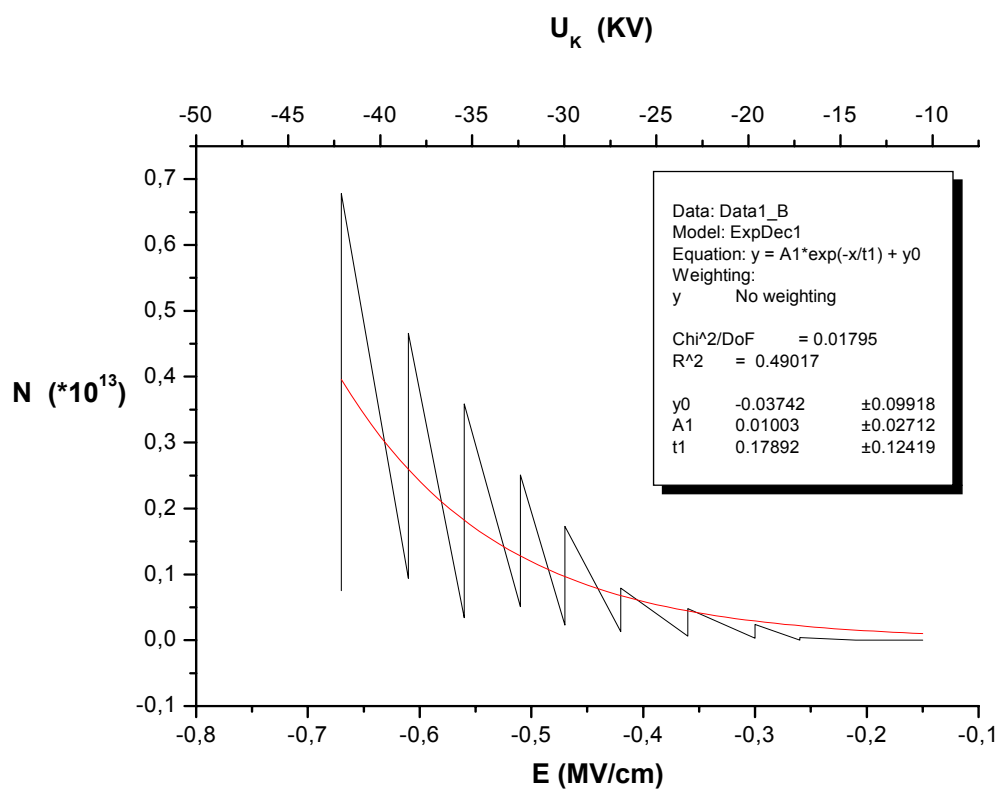




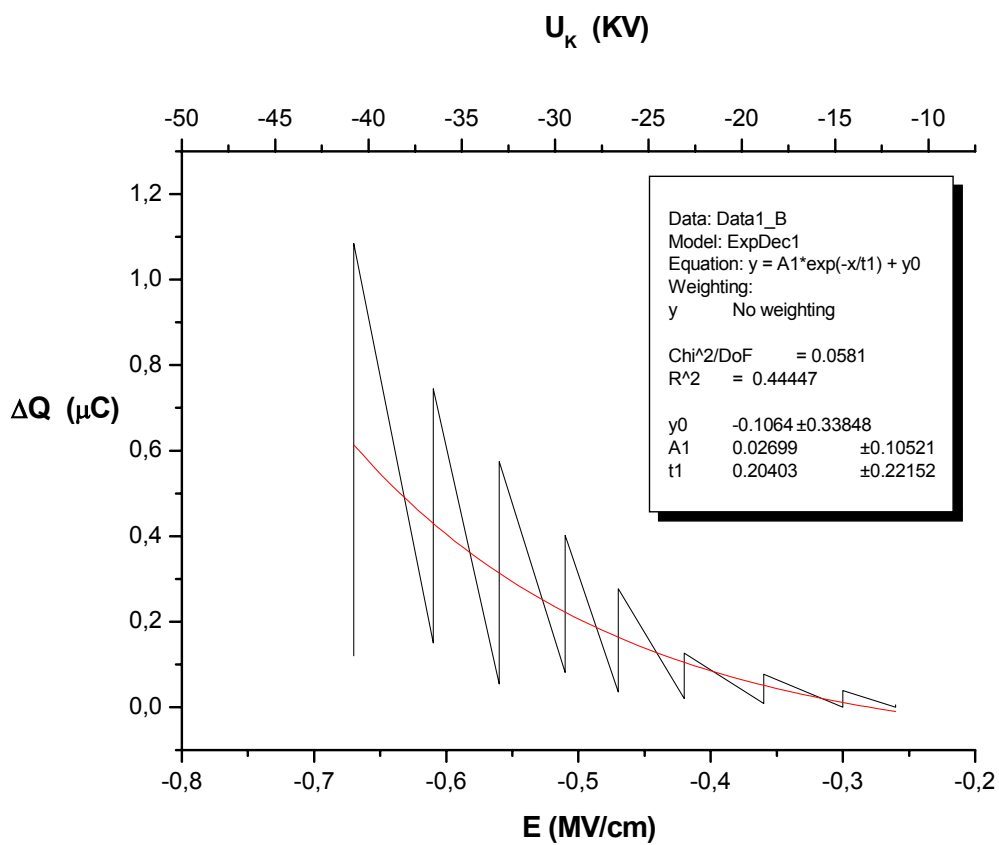
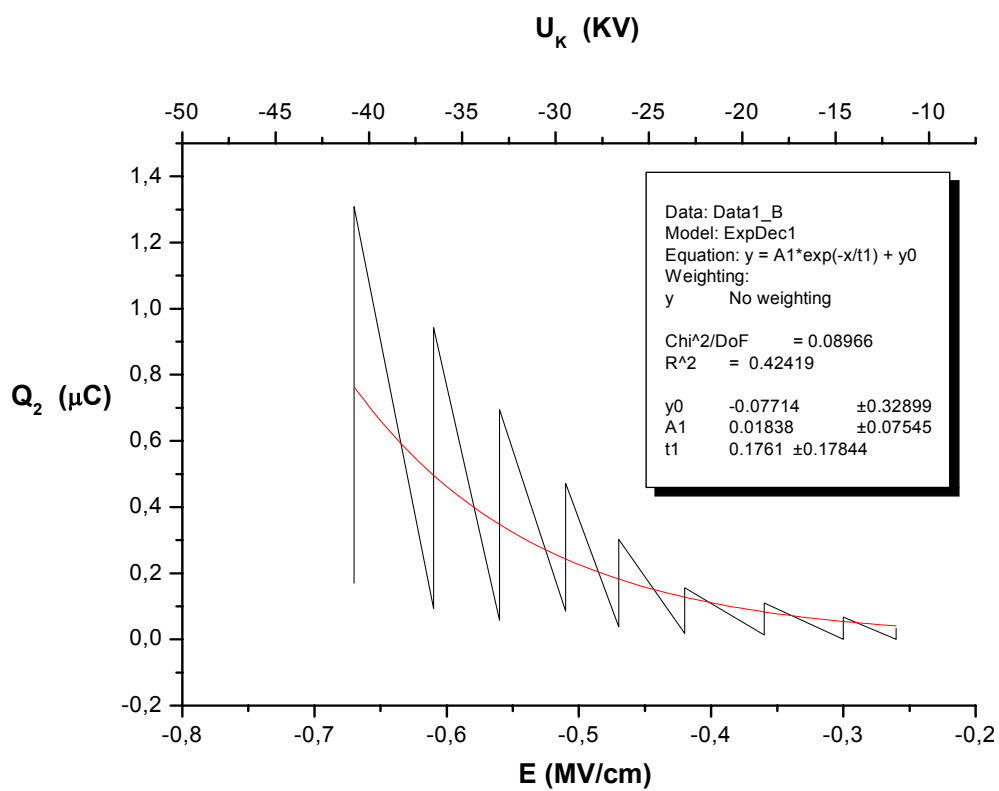
Αρνητική πολικότητα  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 40^\circ\text{C}$

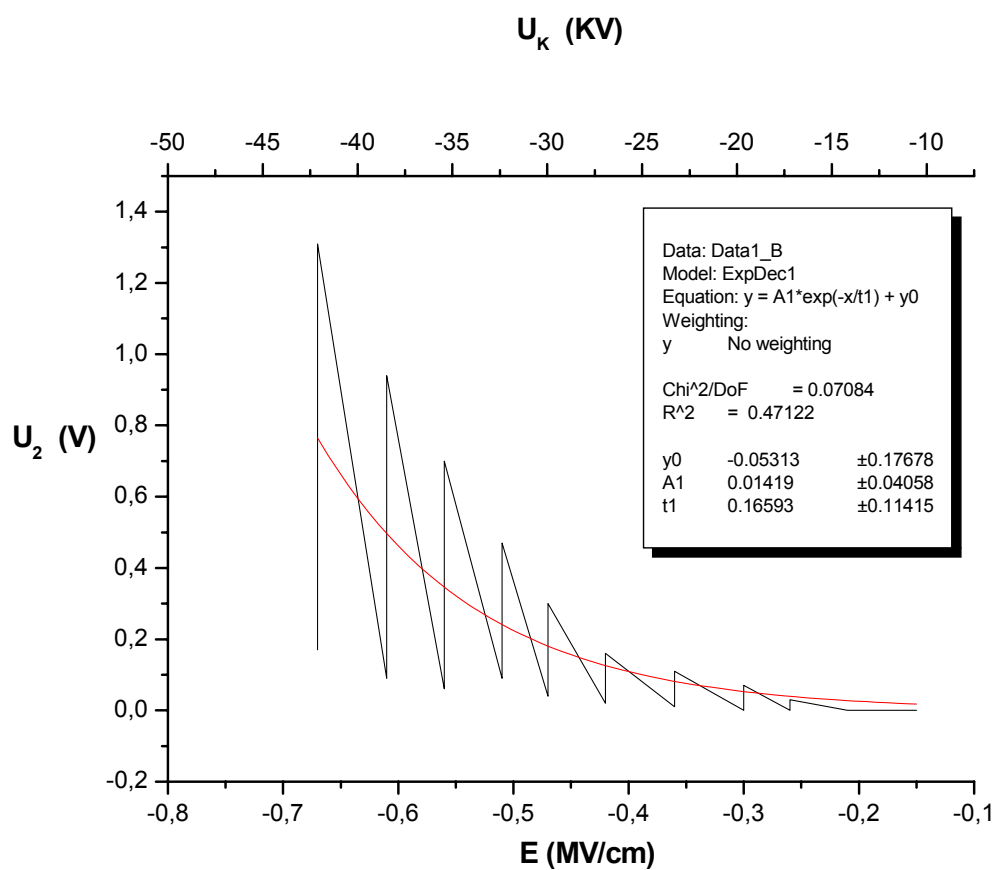
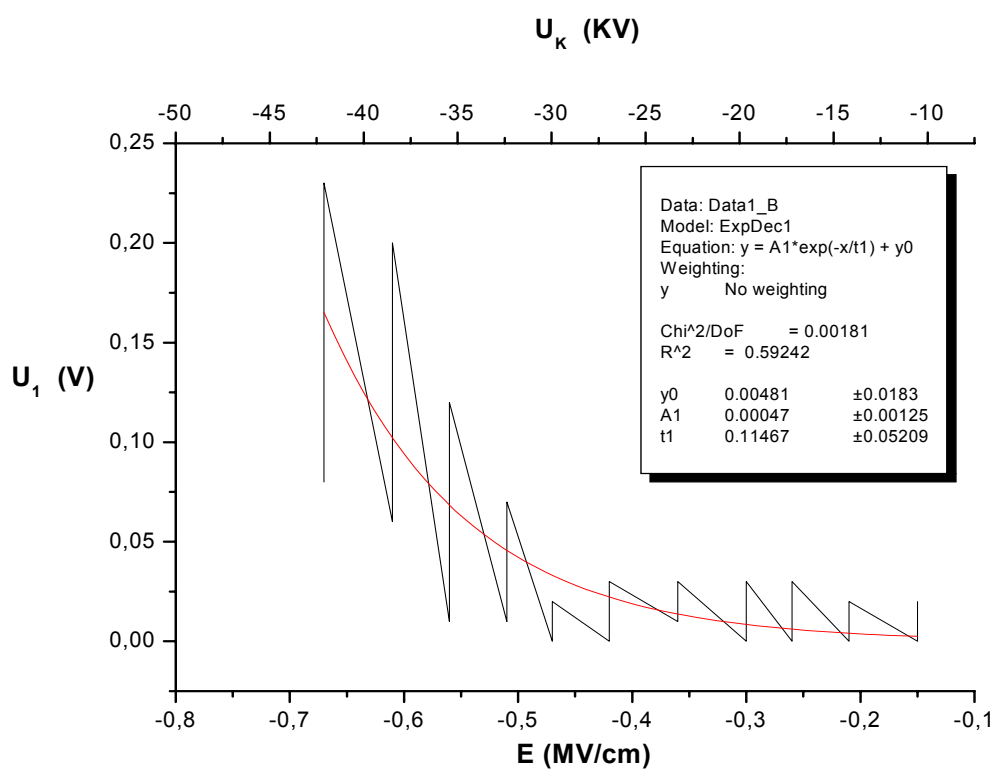


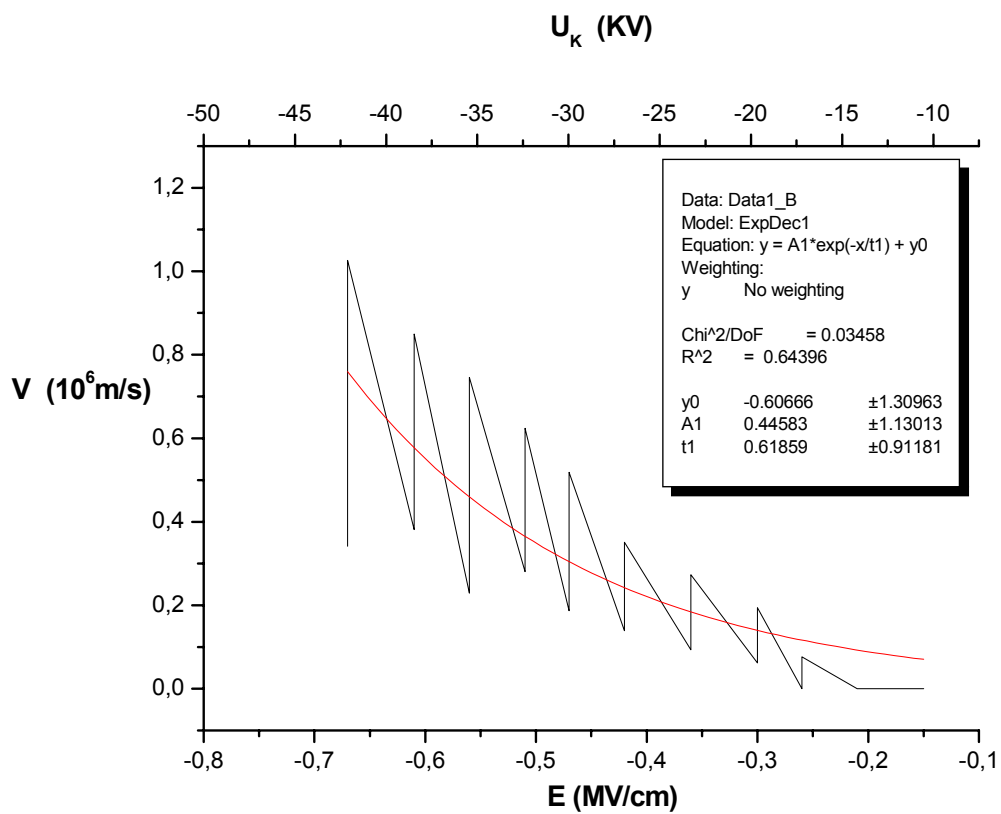
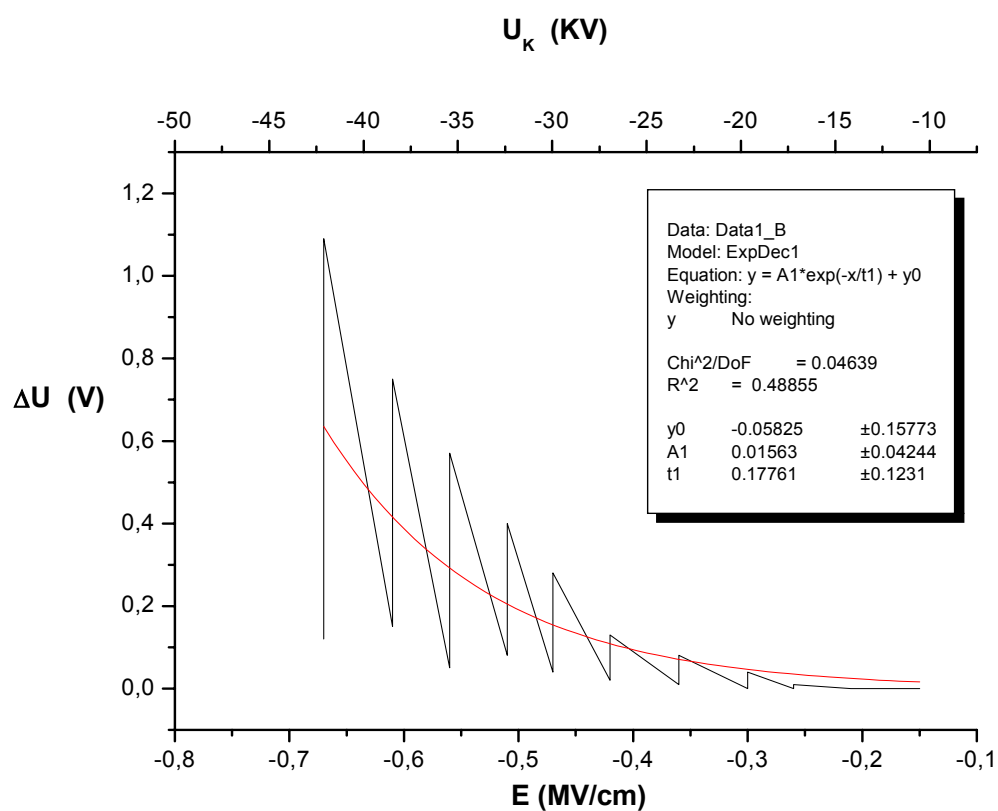


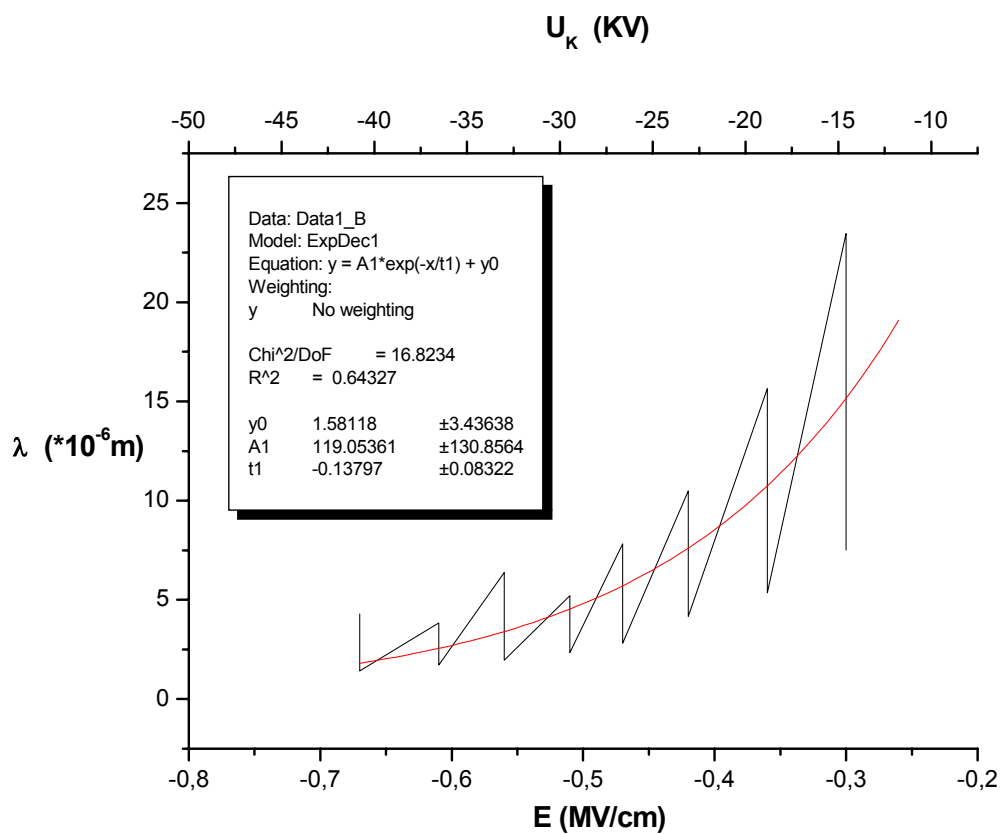
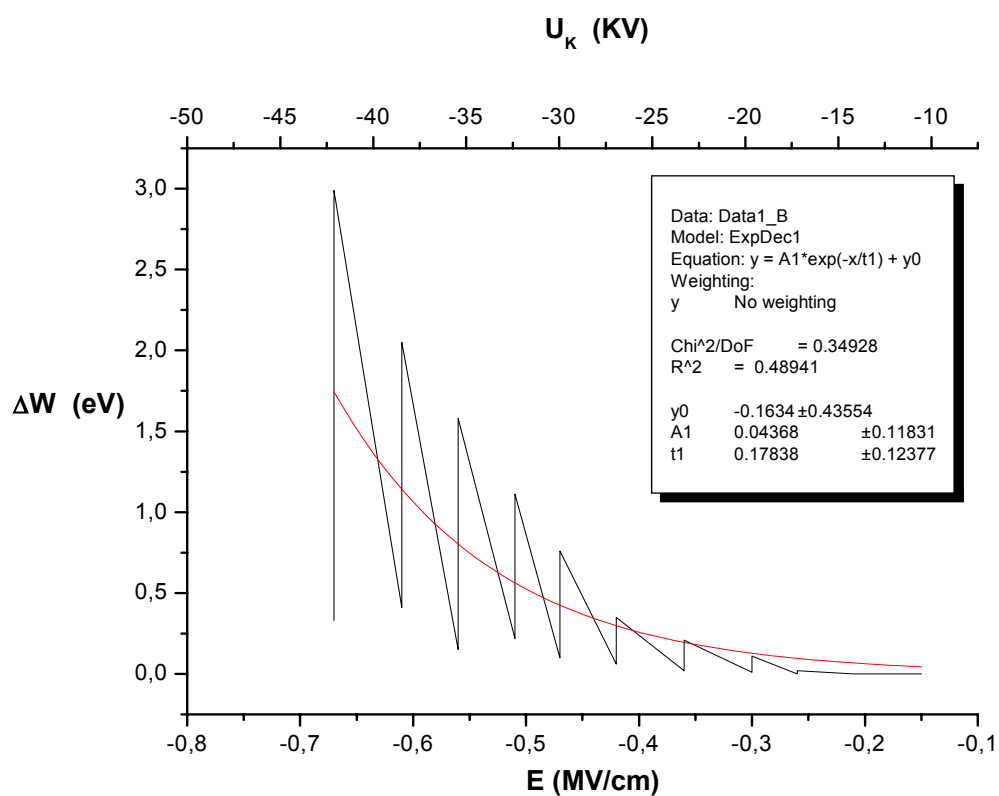


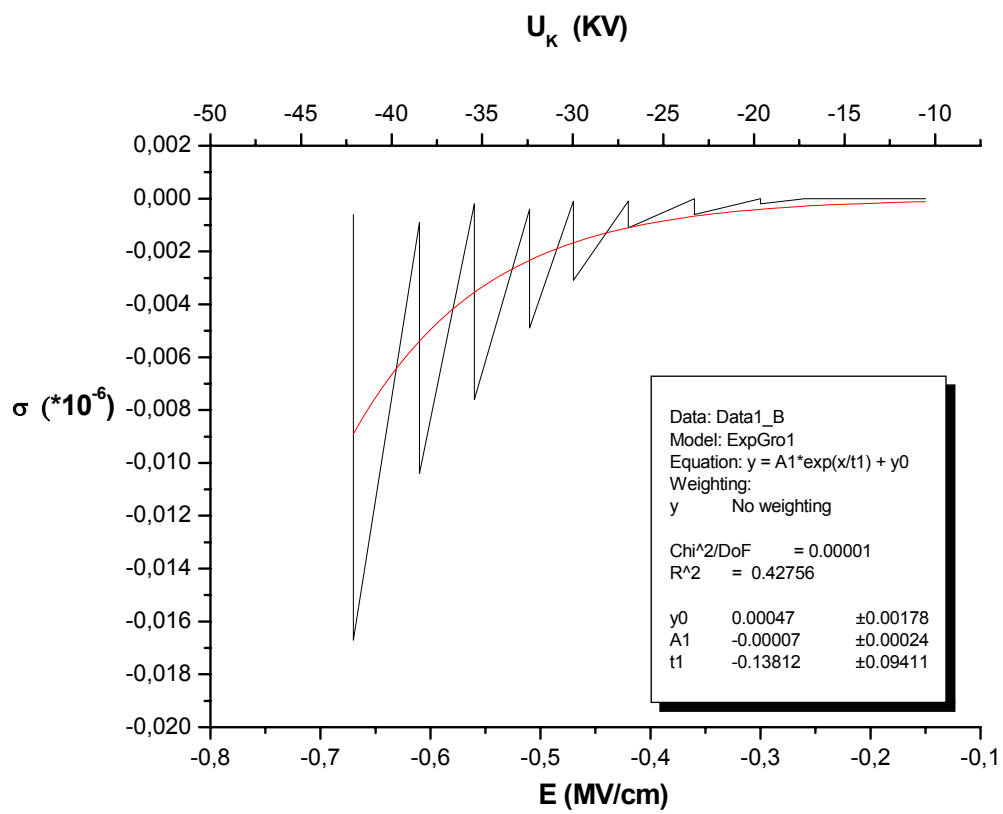




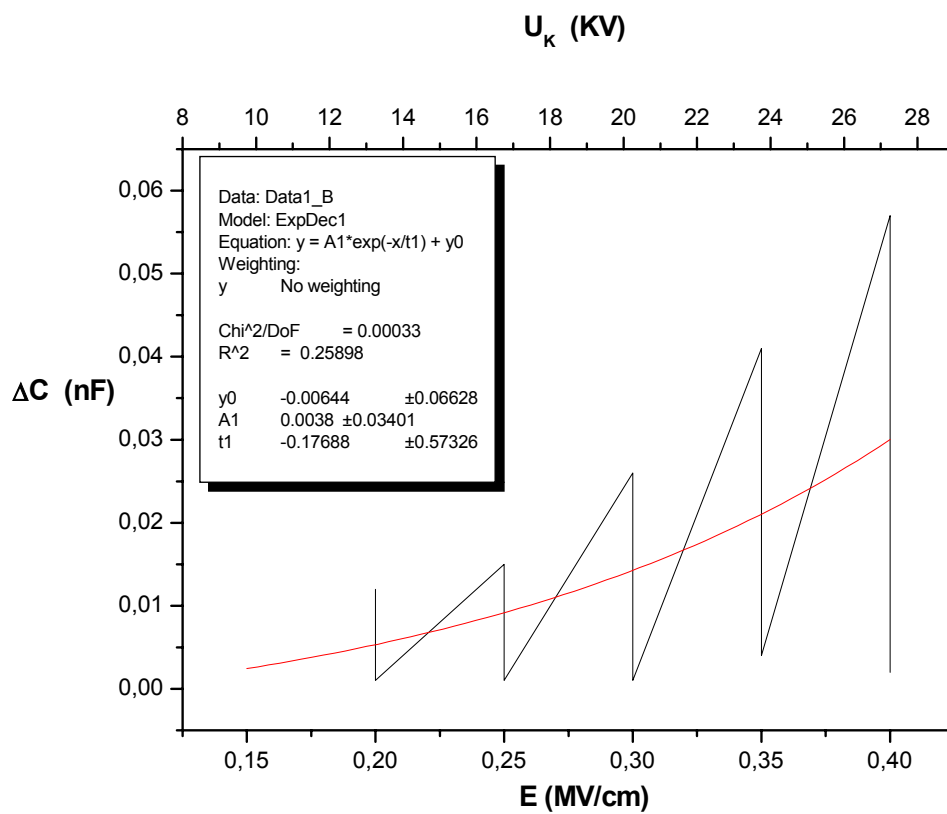
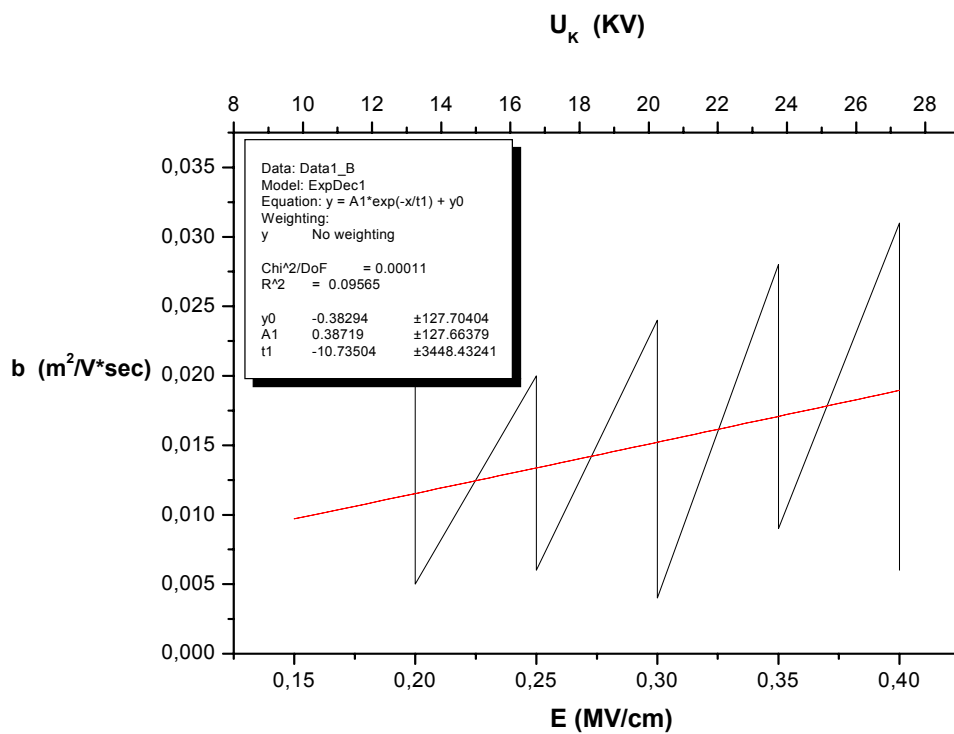


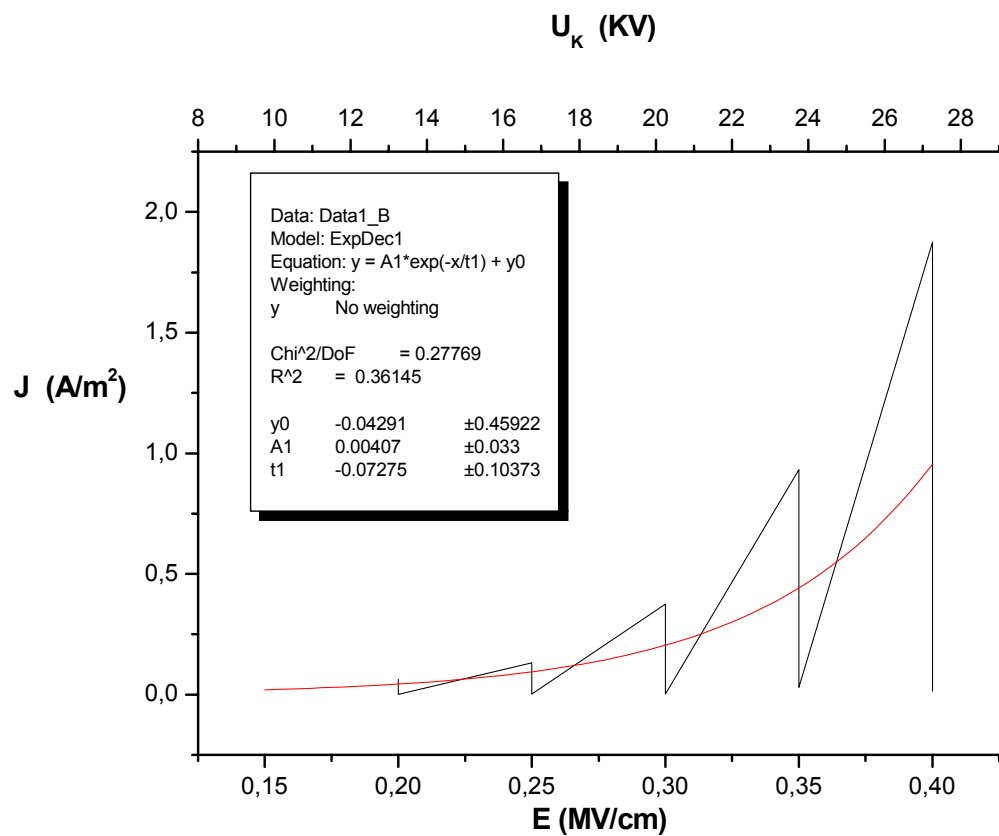
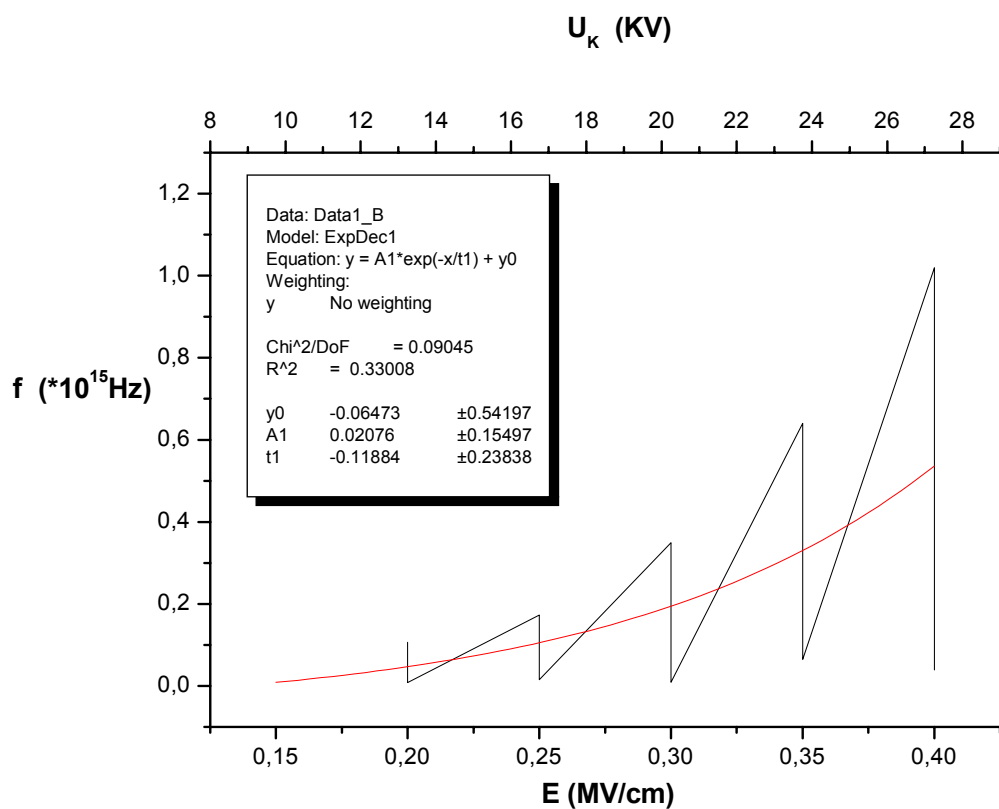


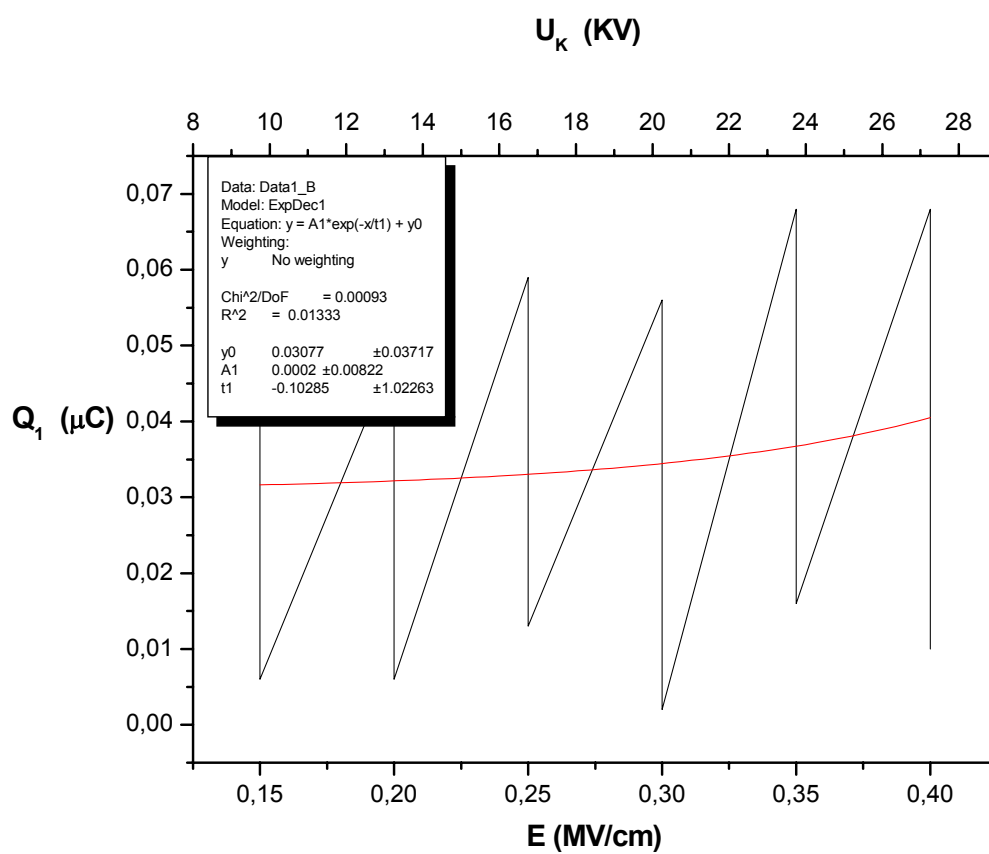
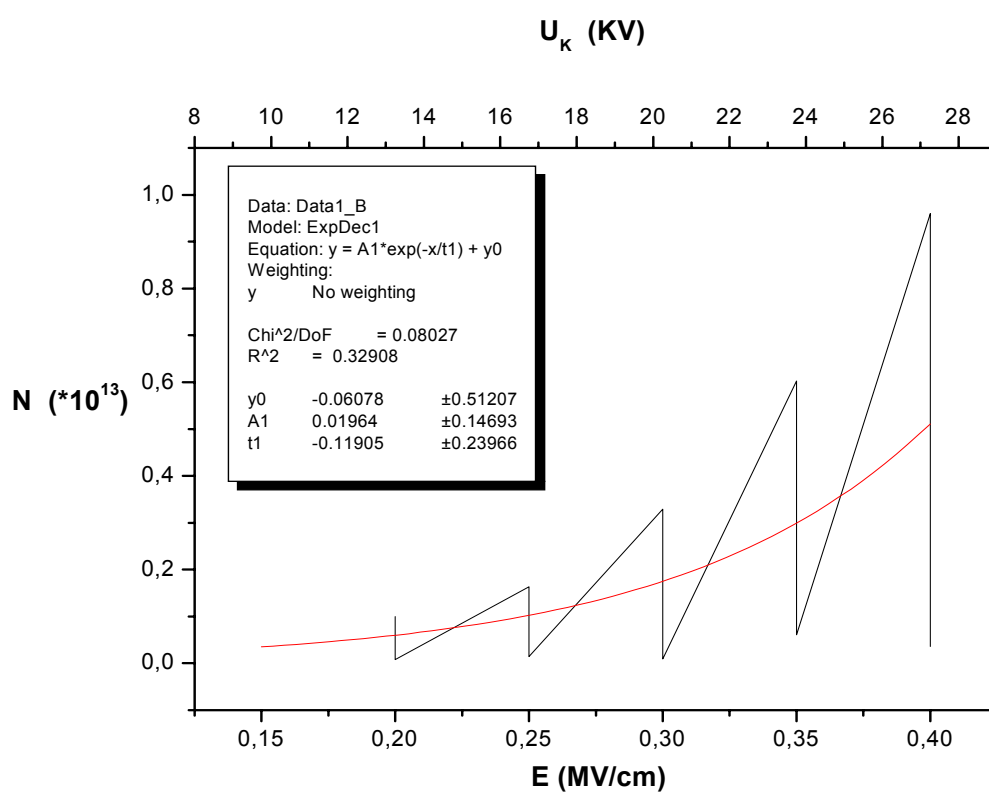




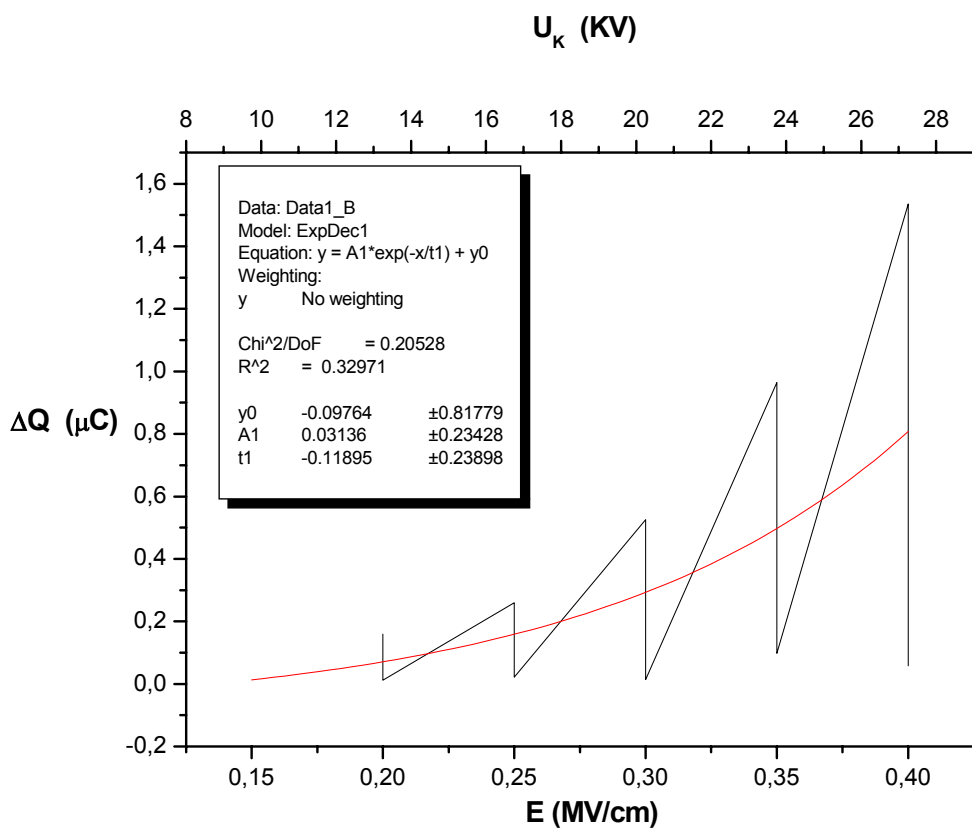
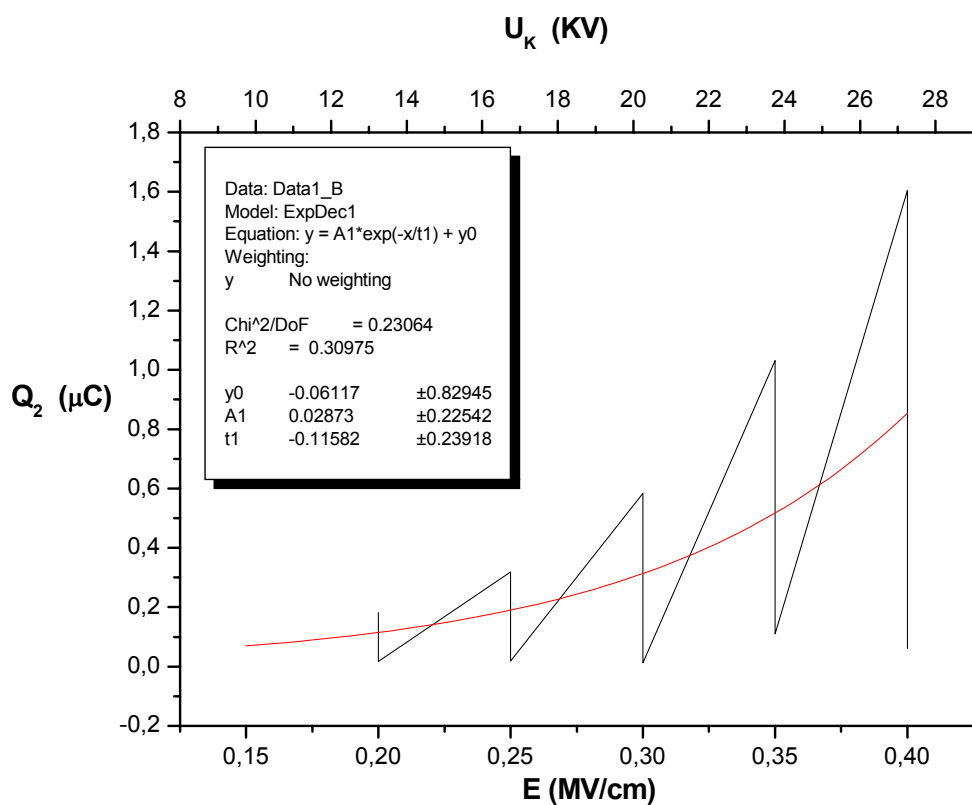
Θετική πολικότητα  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 80^\circ\text{C}$

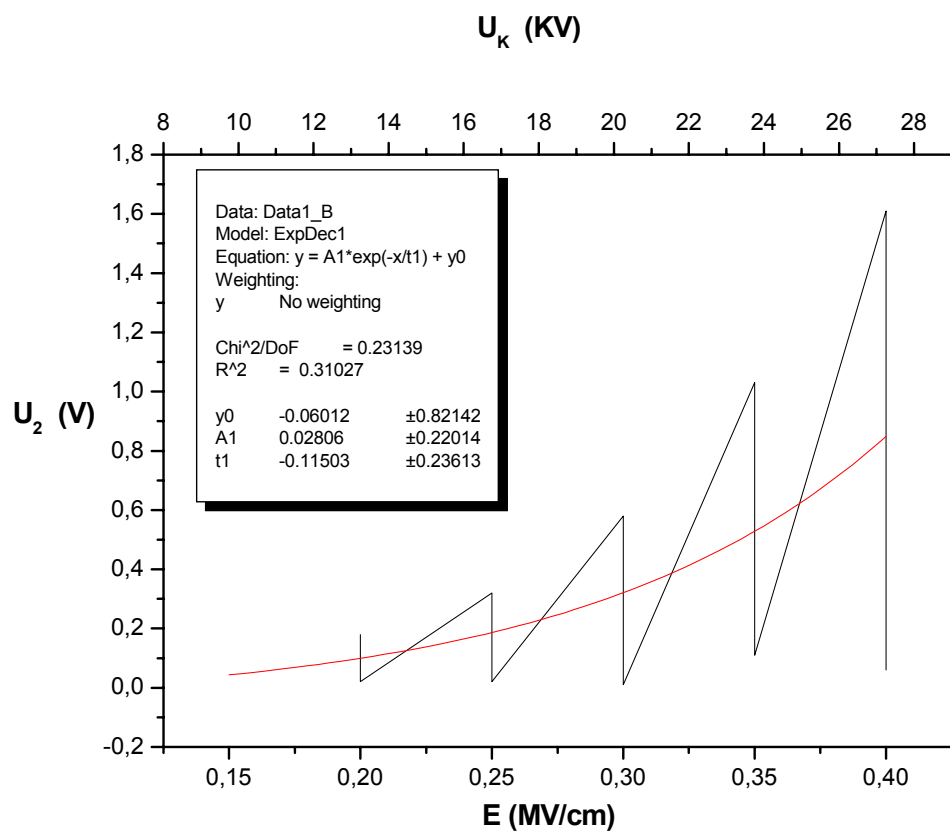
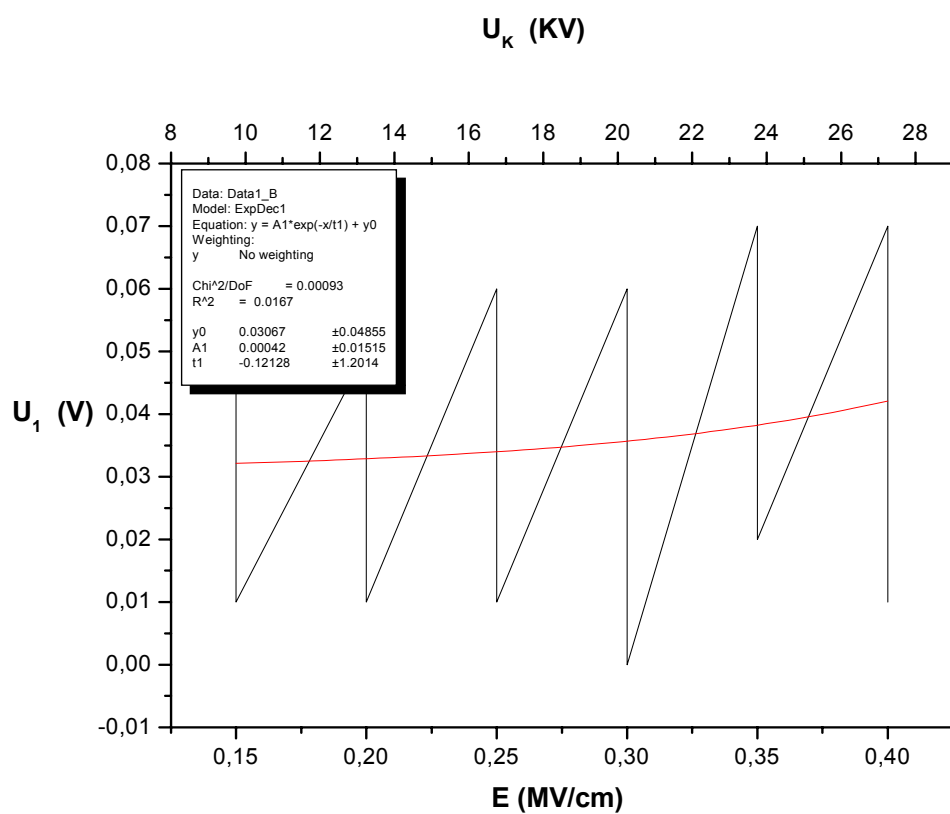


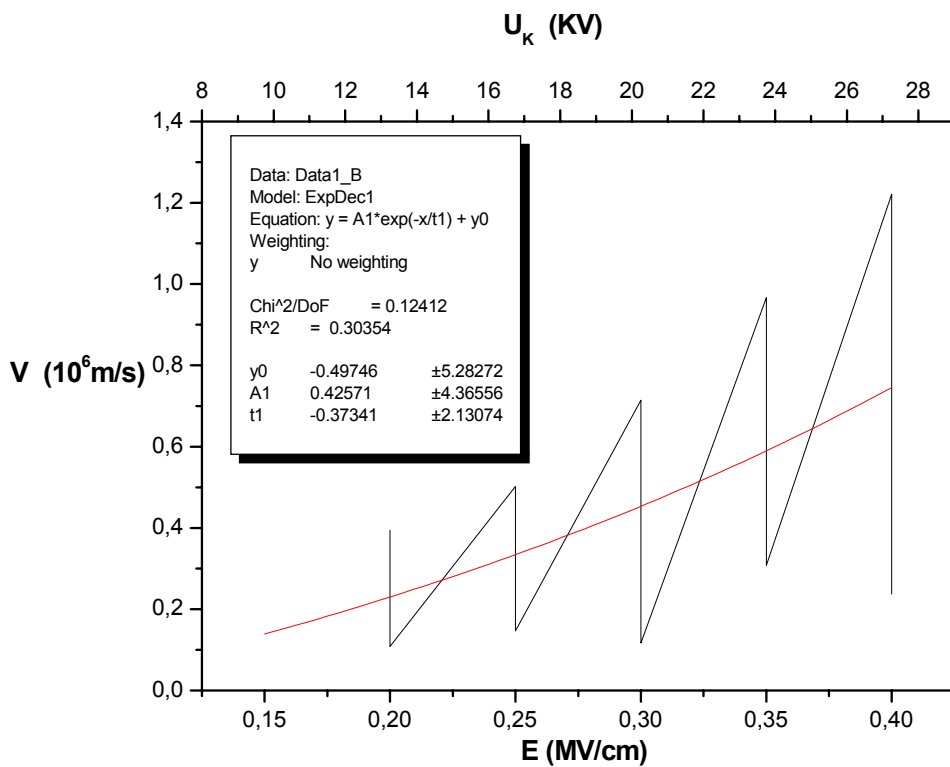
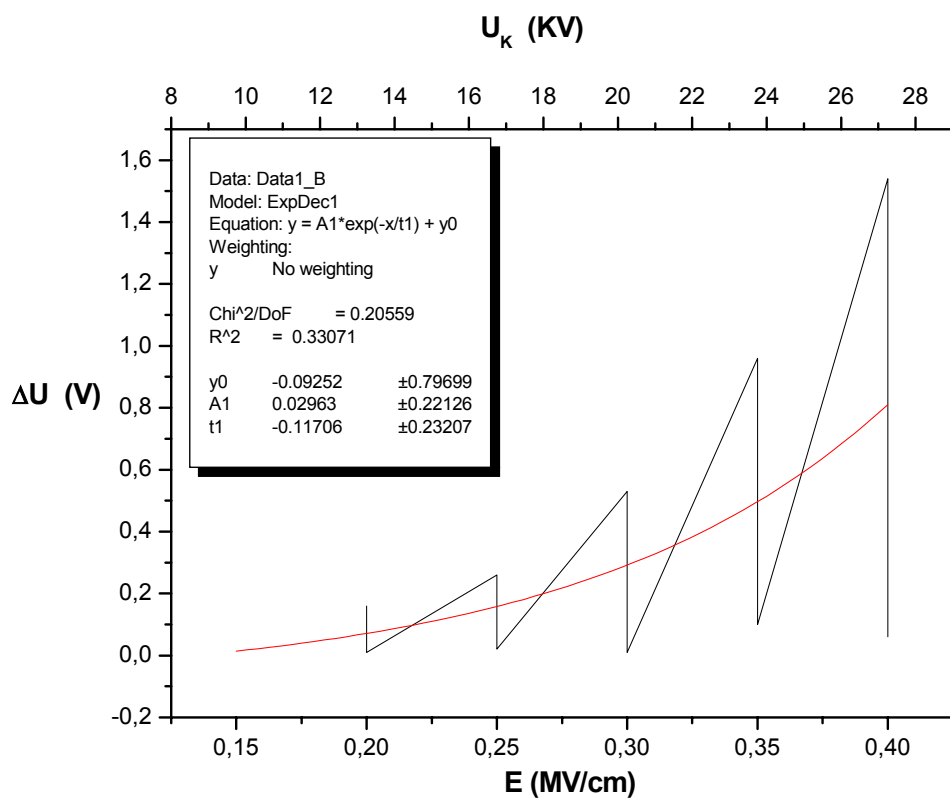


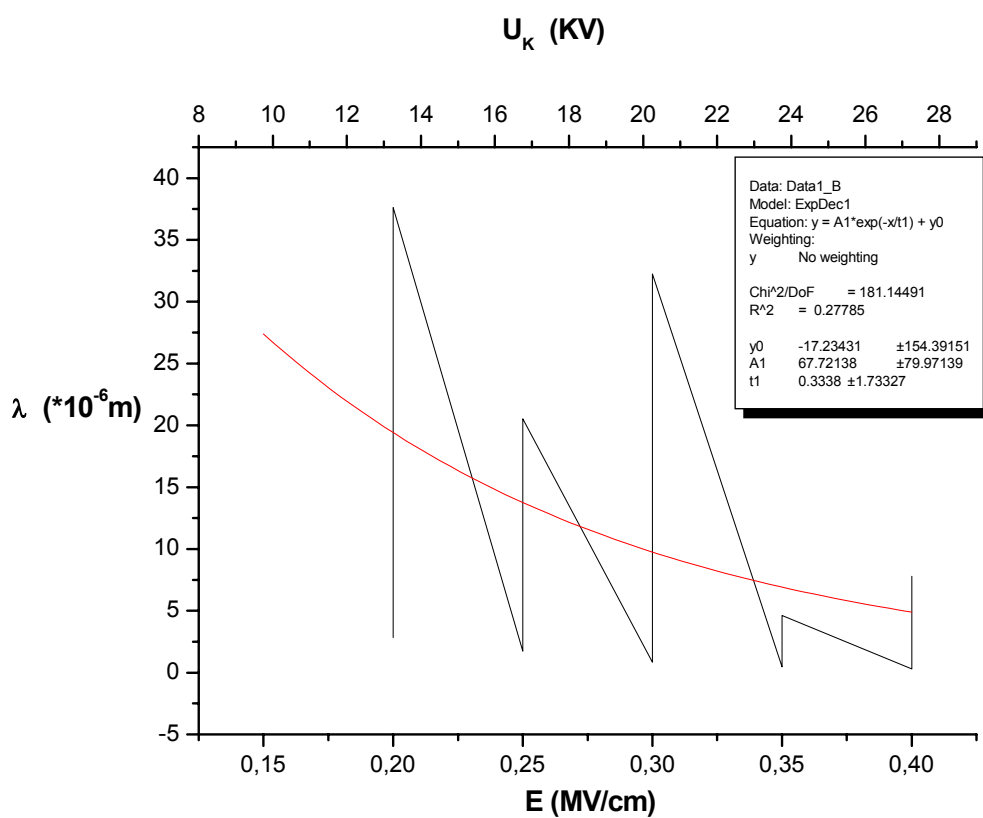
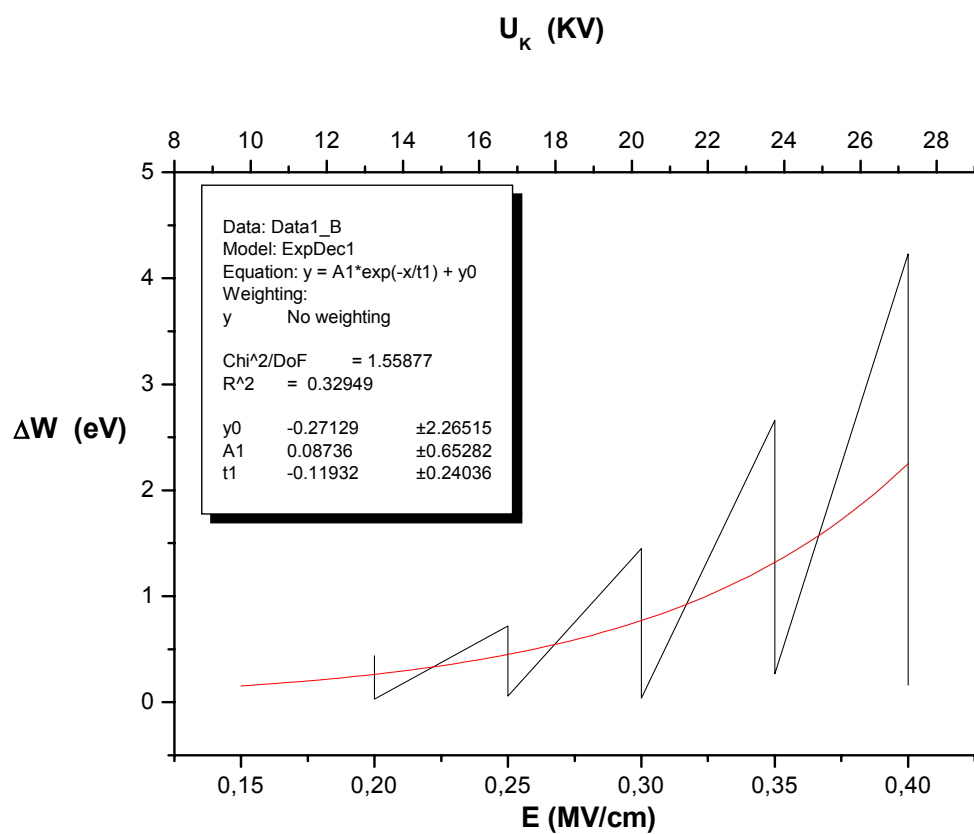


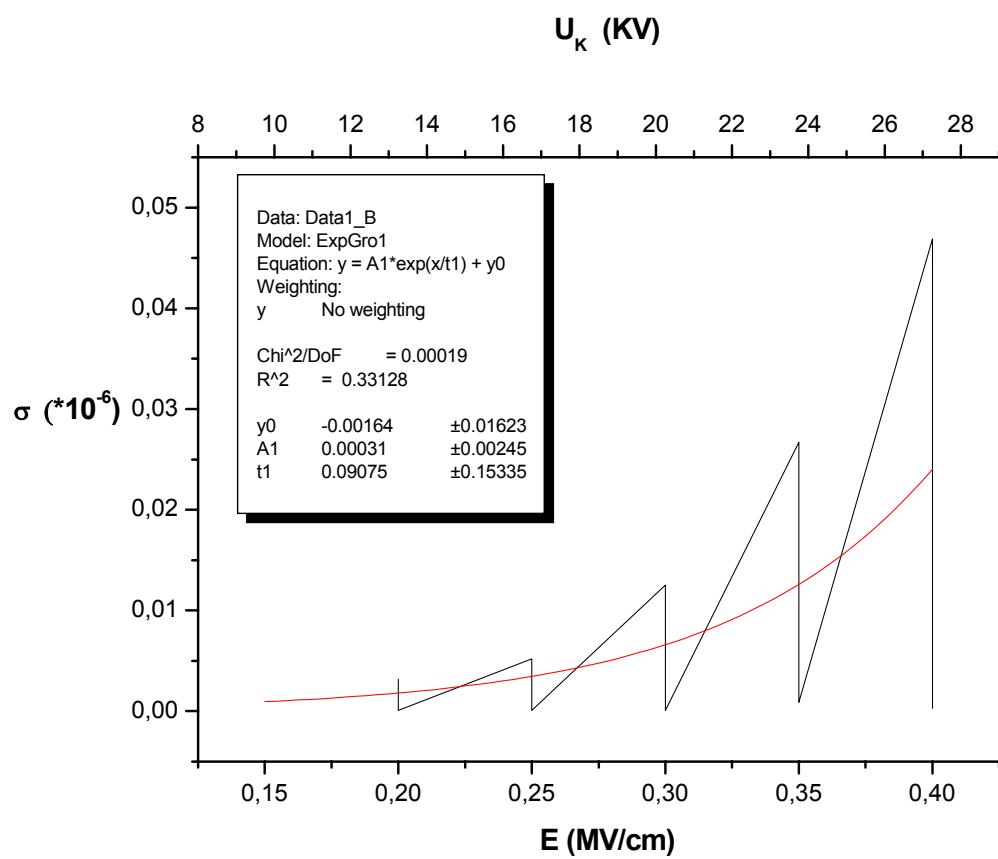




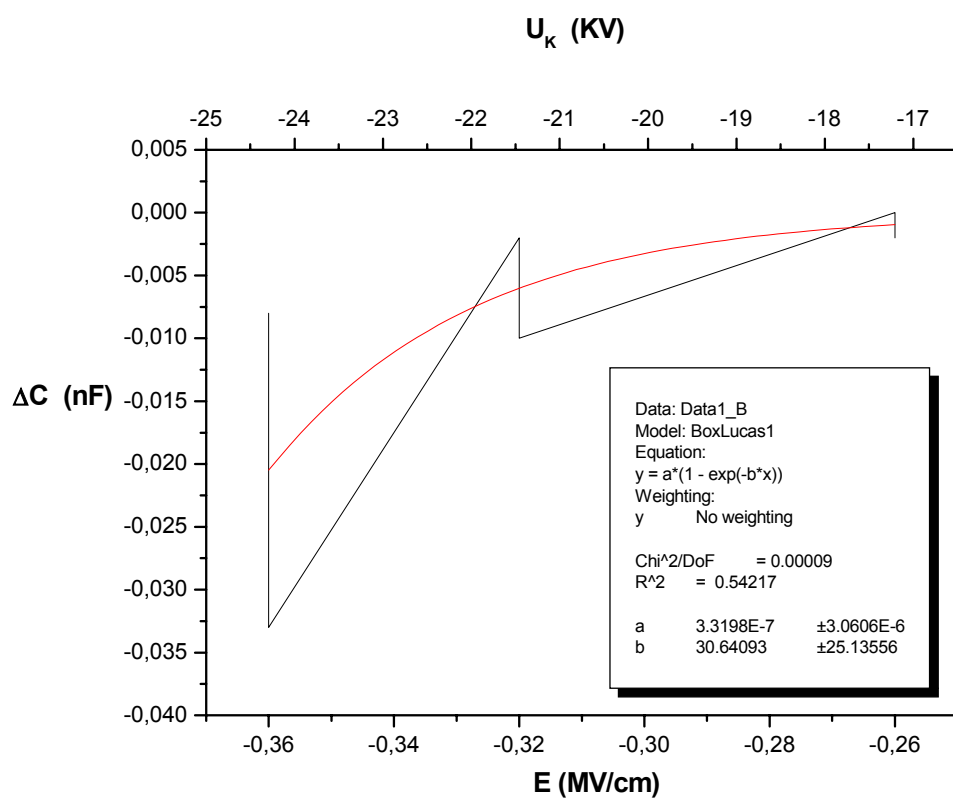
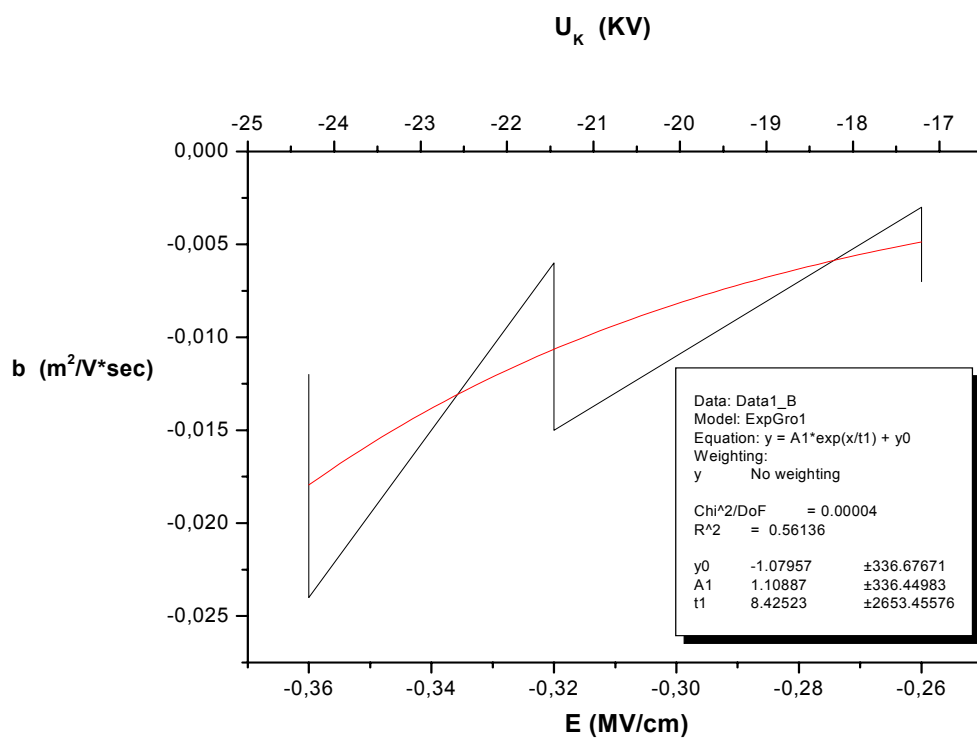


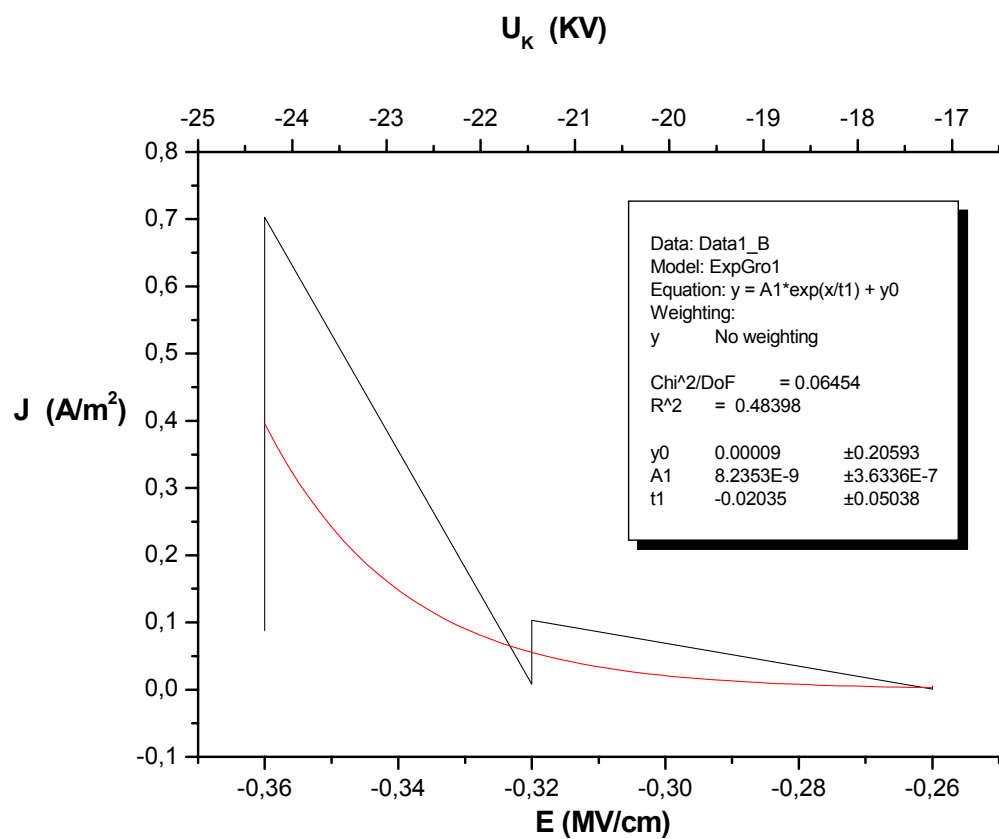
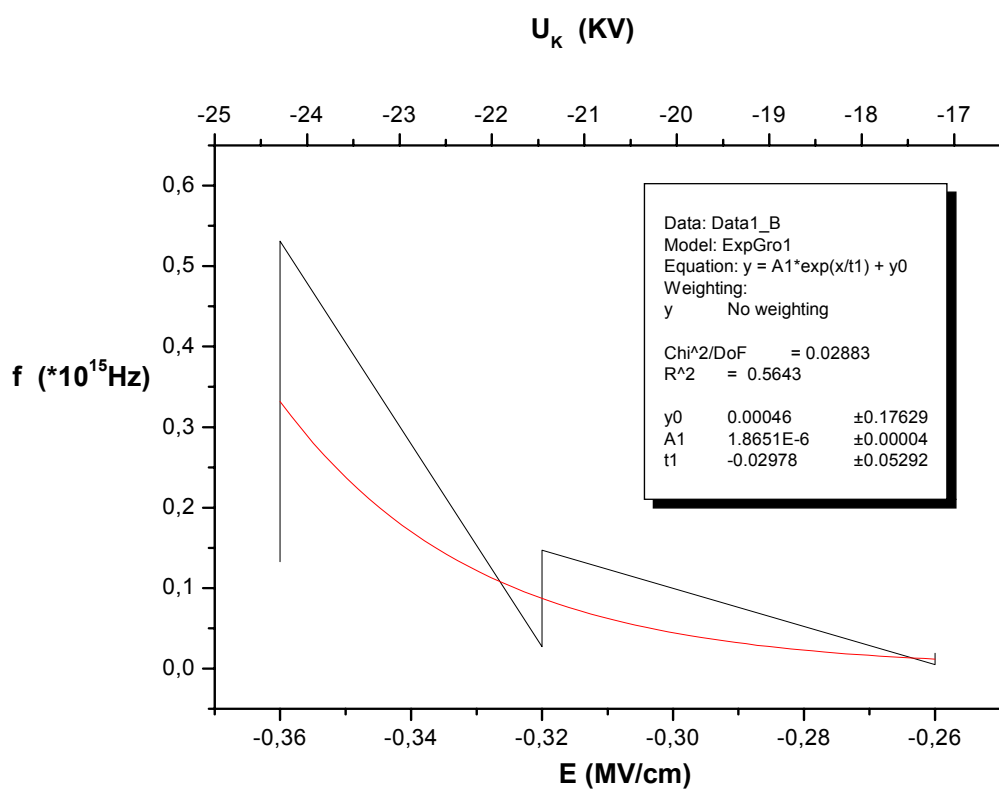


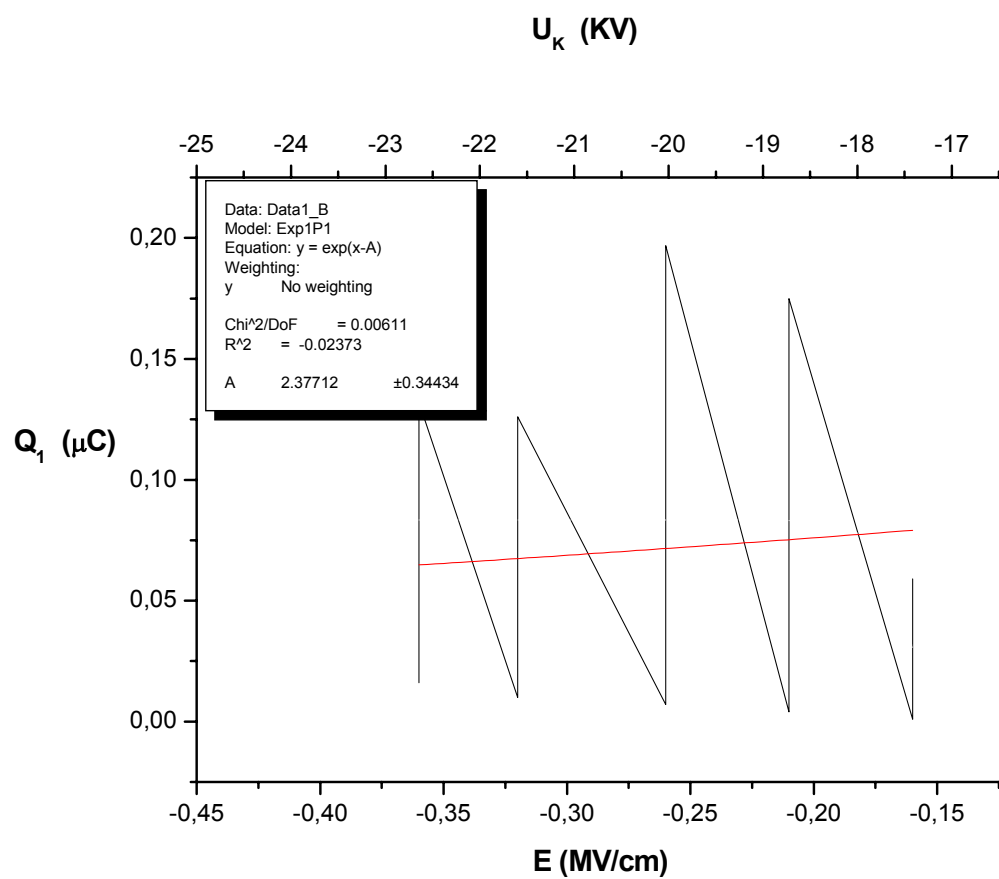
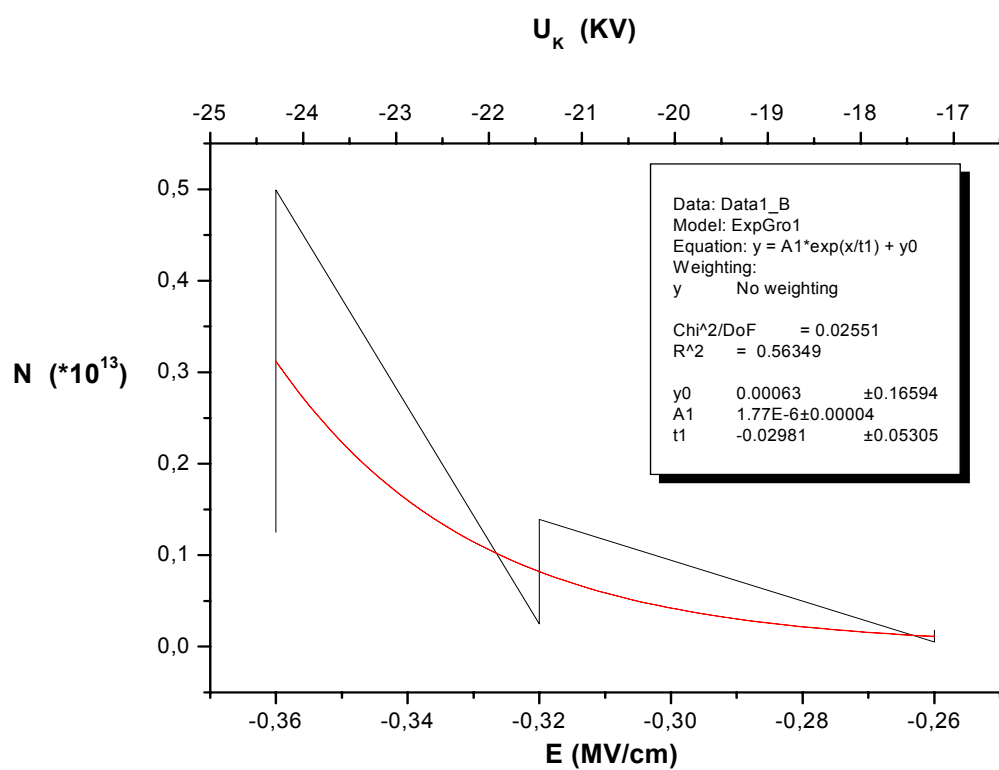




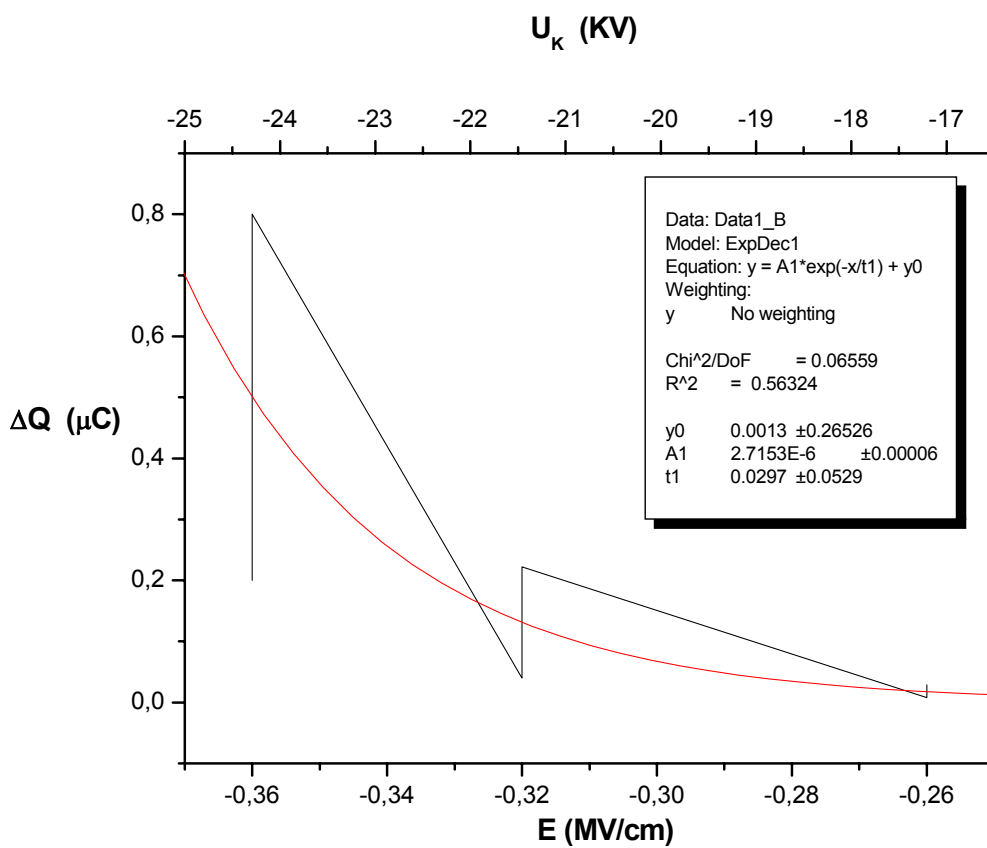
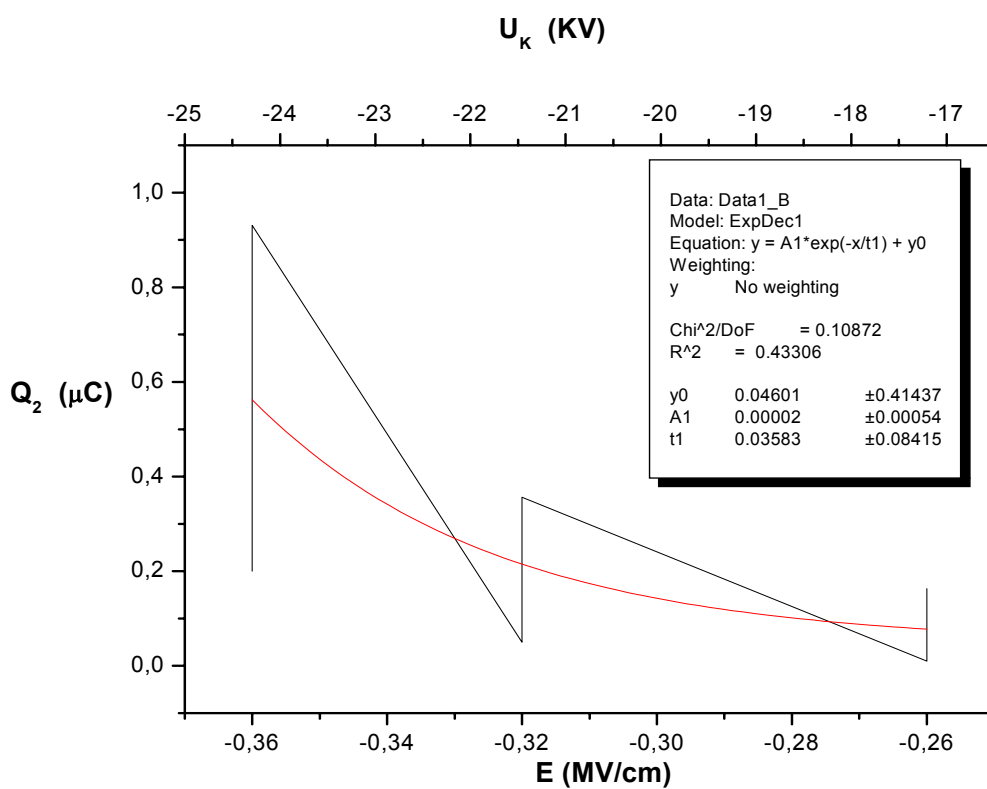
Αρνητική πολικότητα  $d = 1 \text{ mm}$   $\theta = 80^\circ\text{C}$

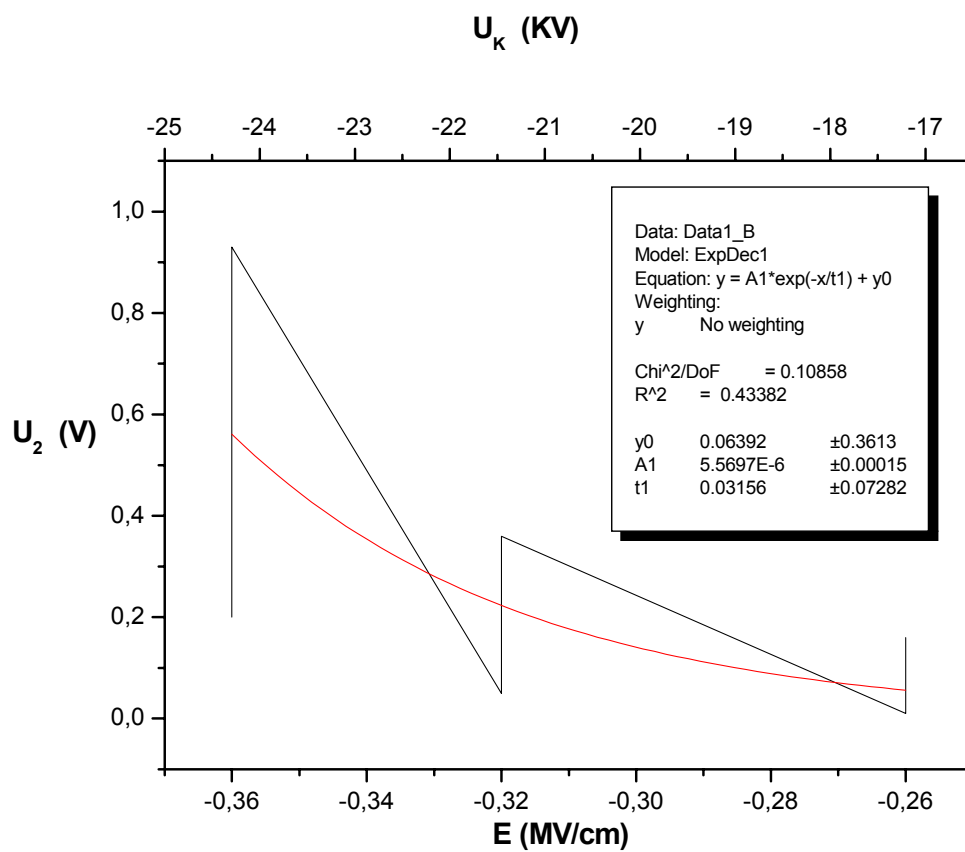
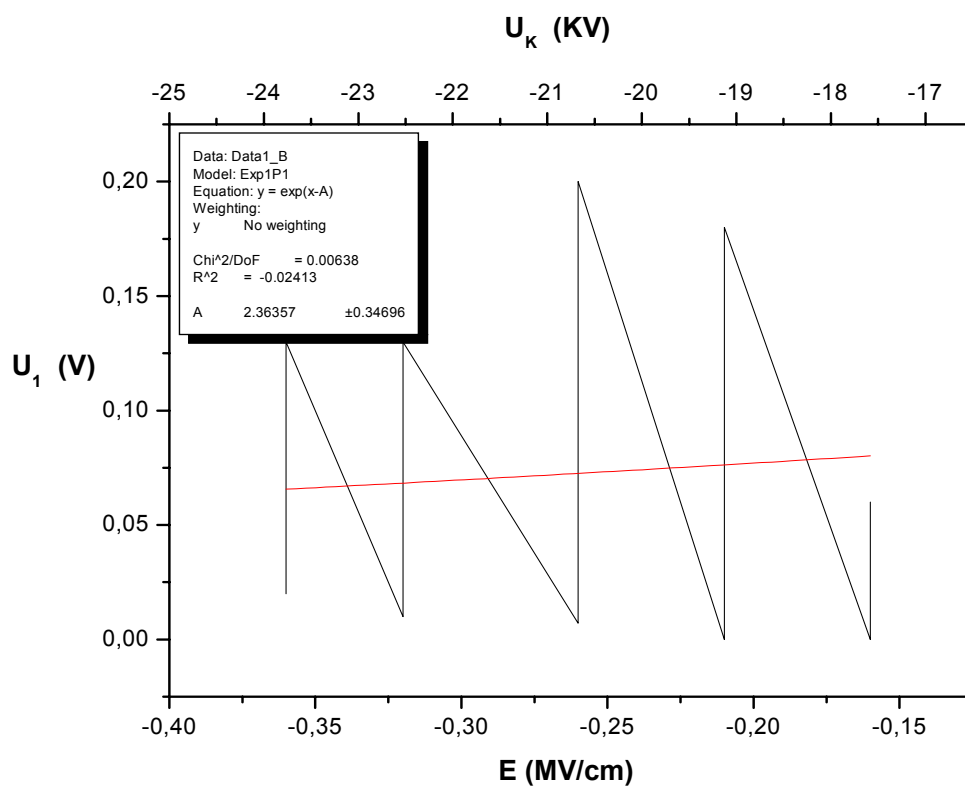


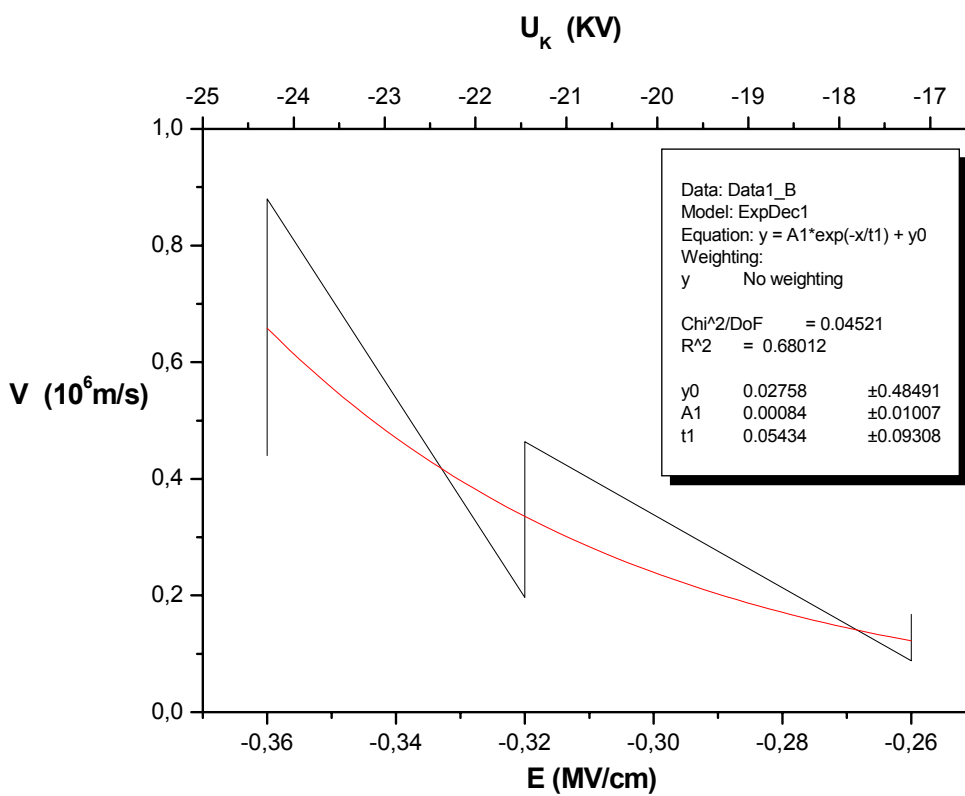
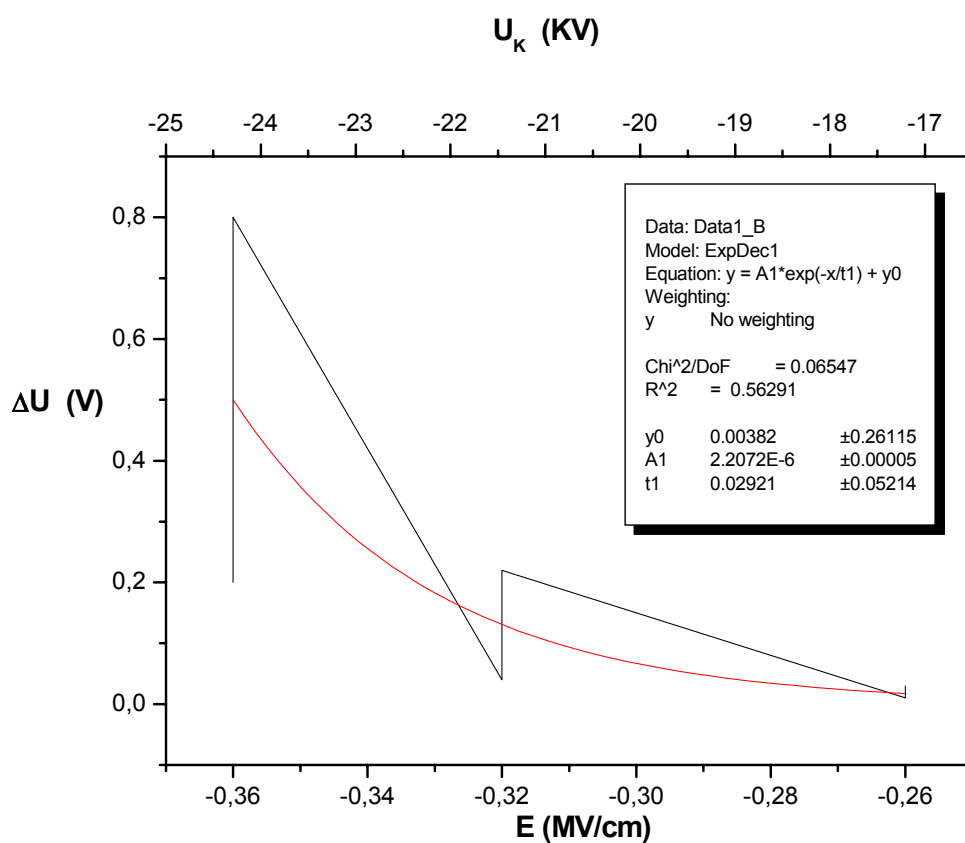


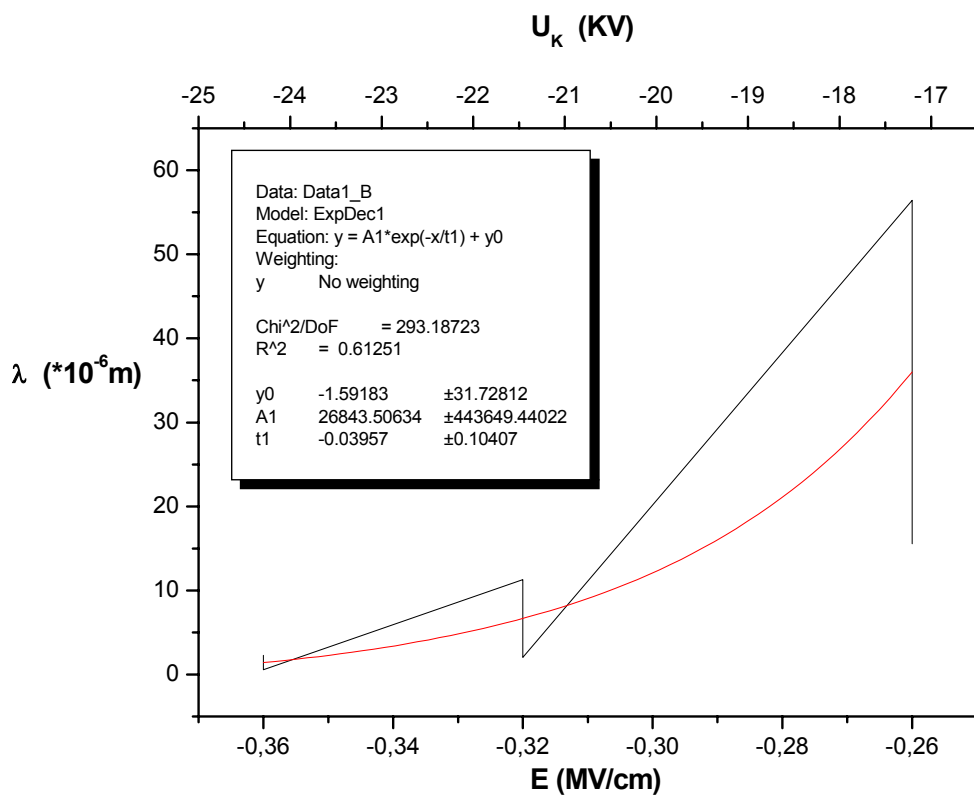
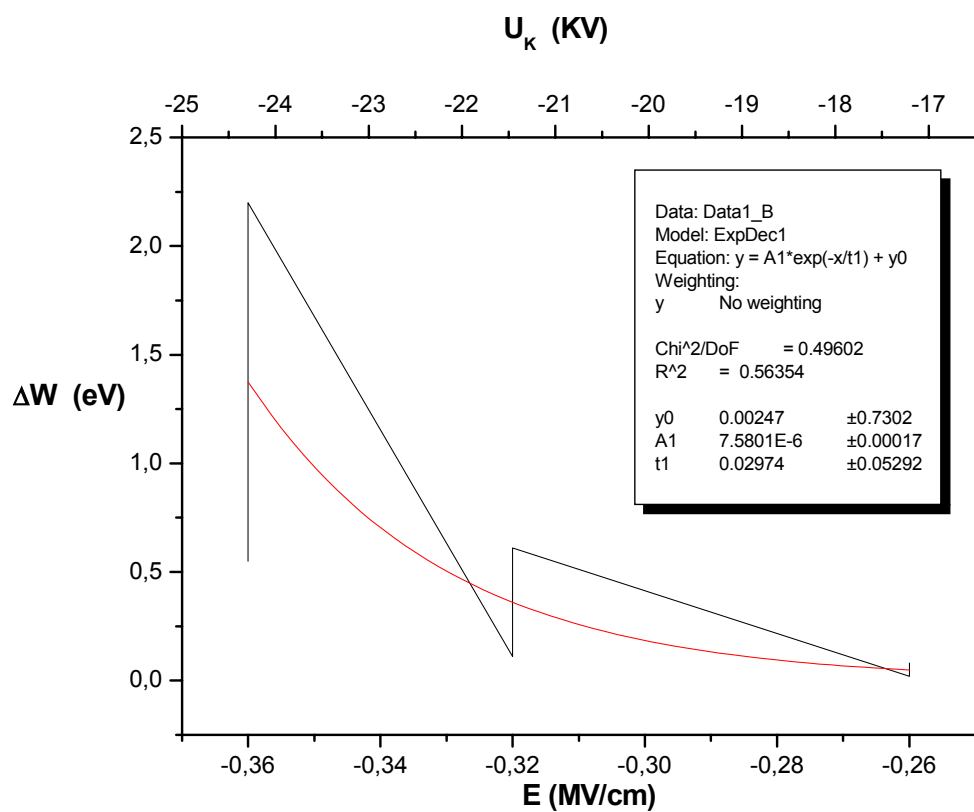


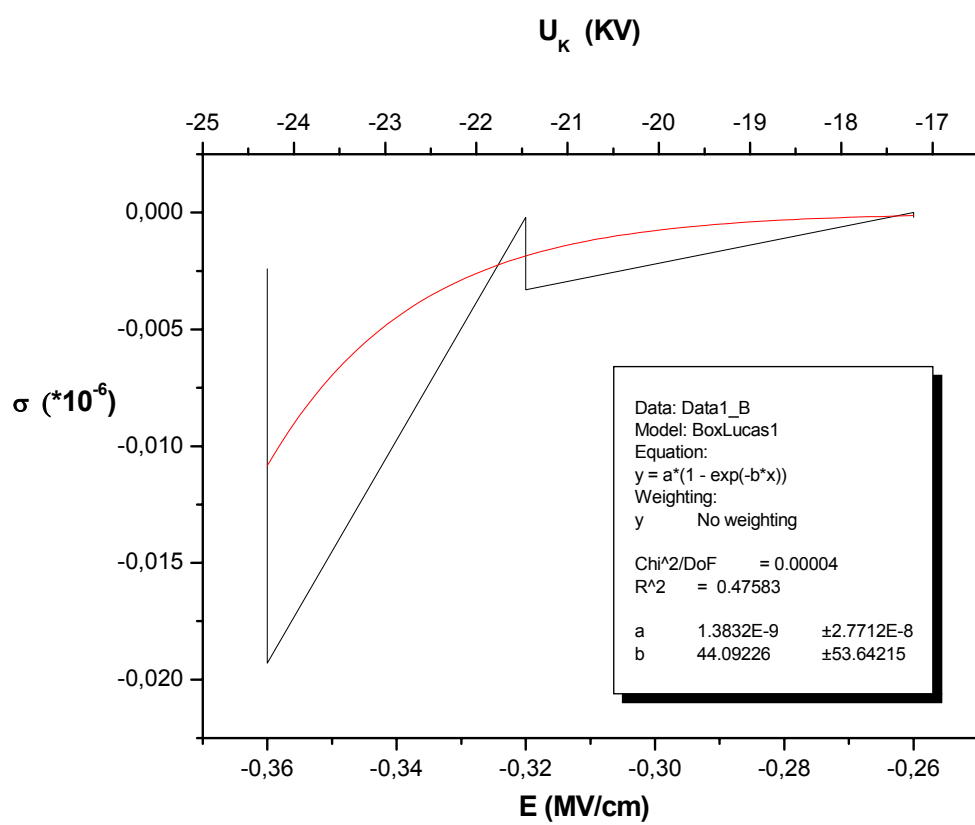




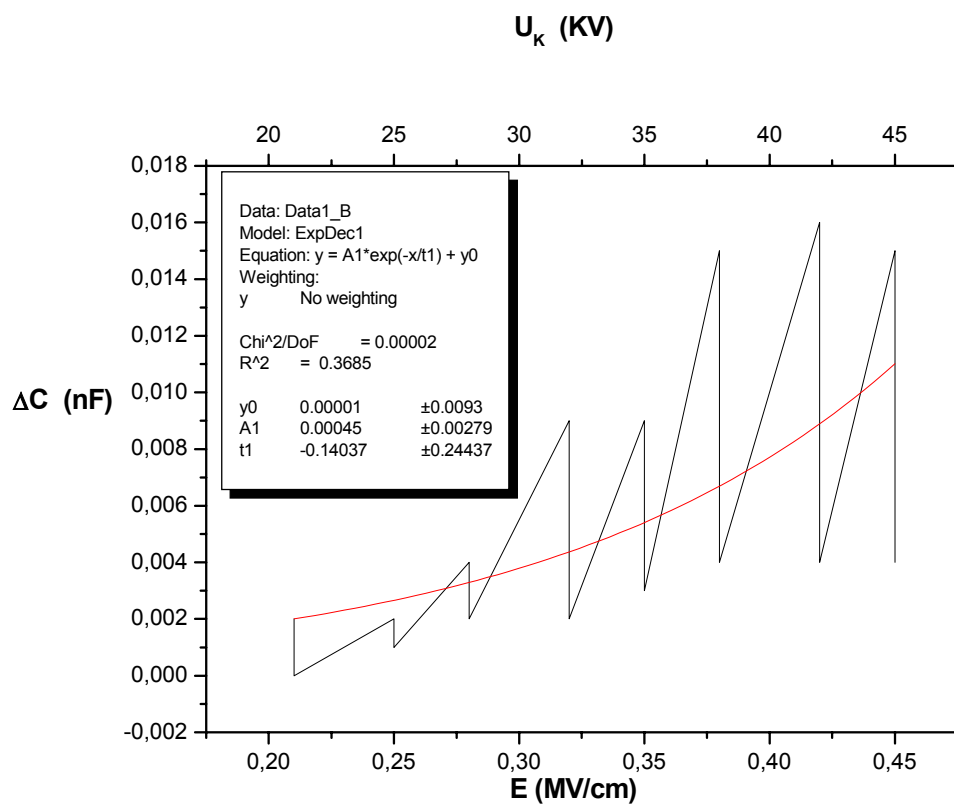
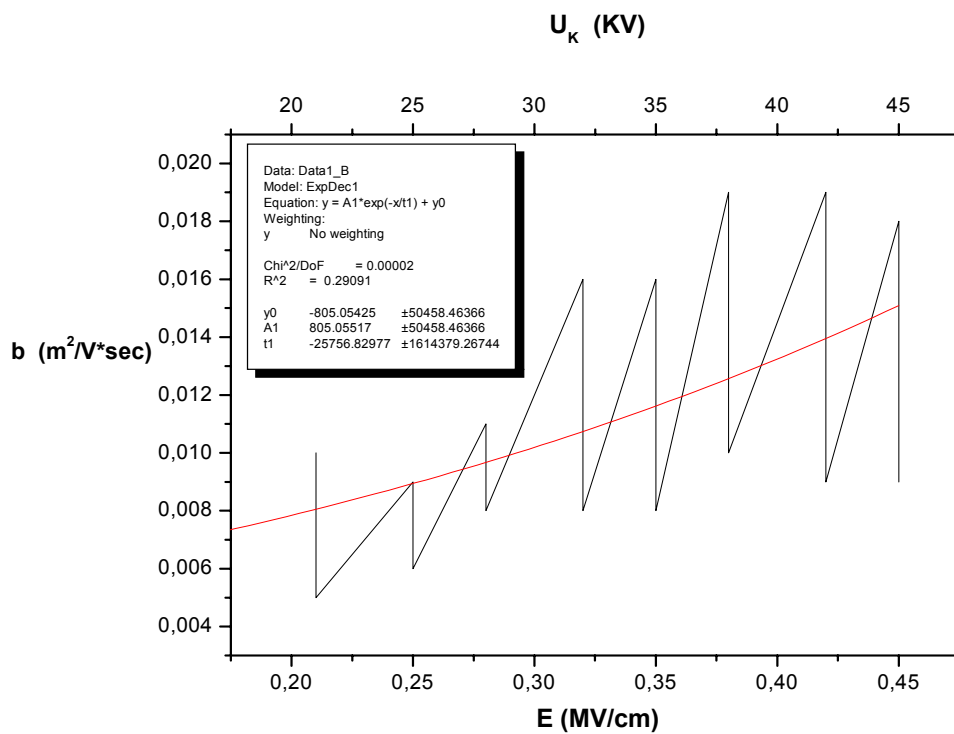


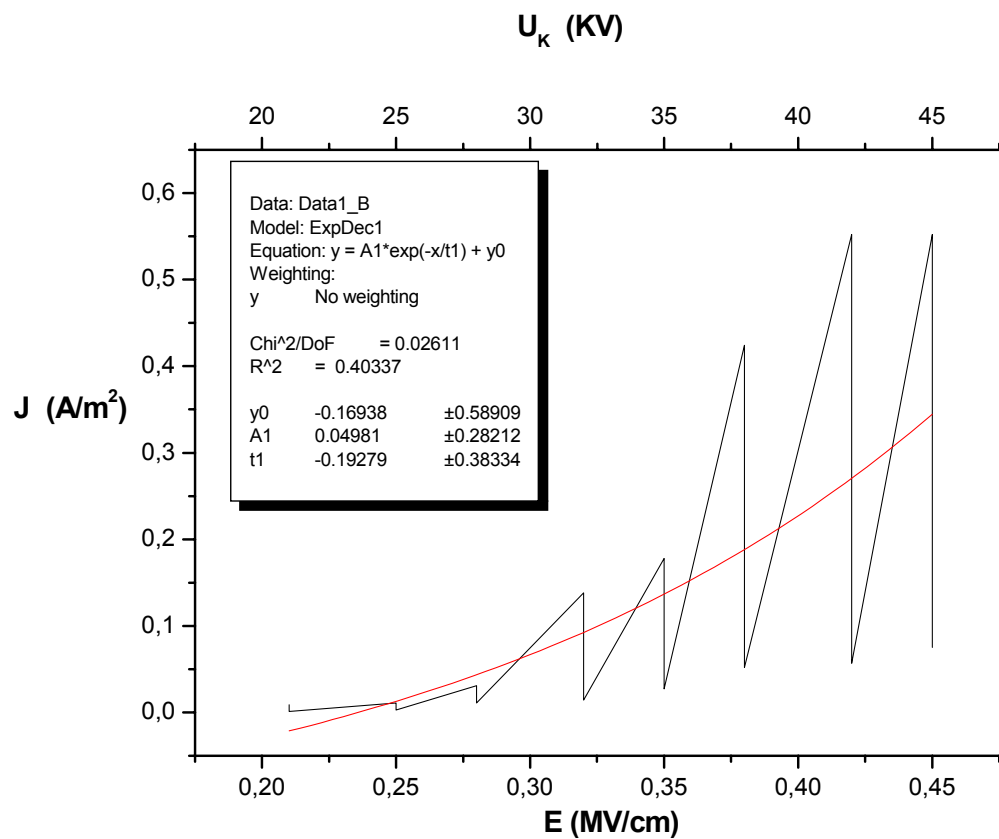
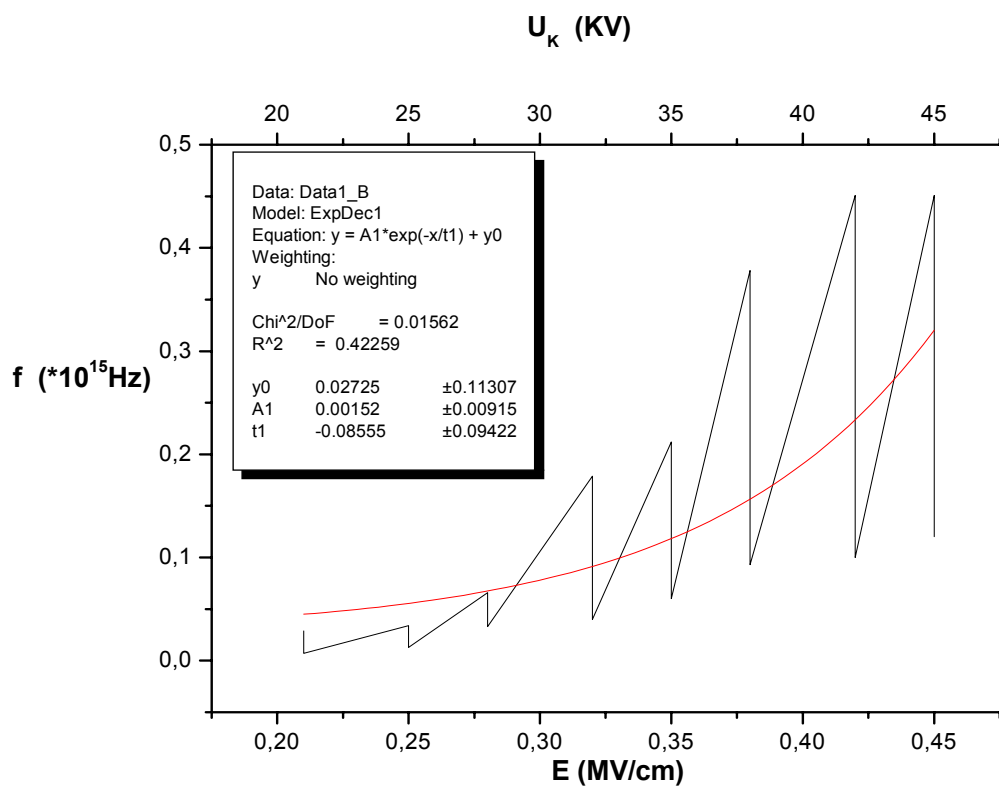


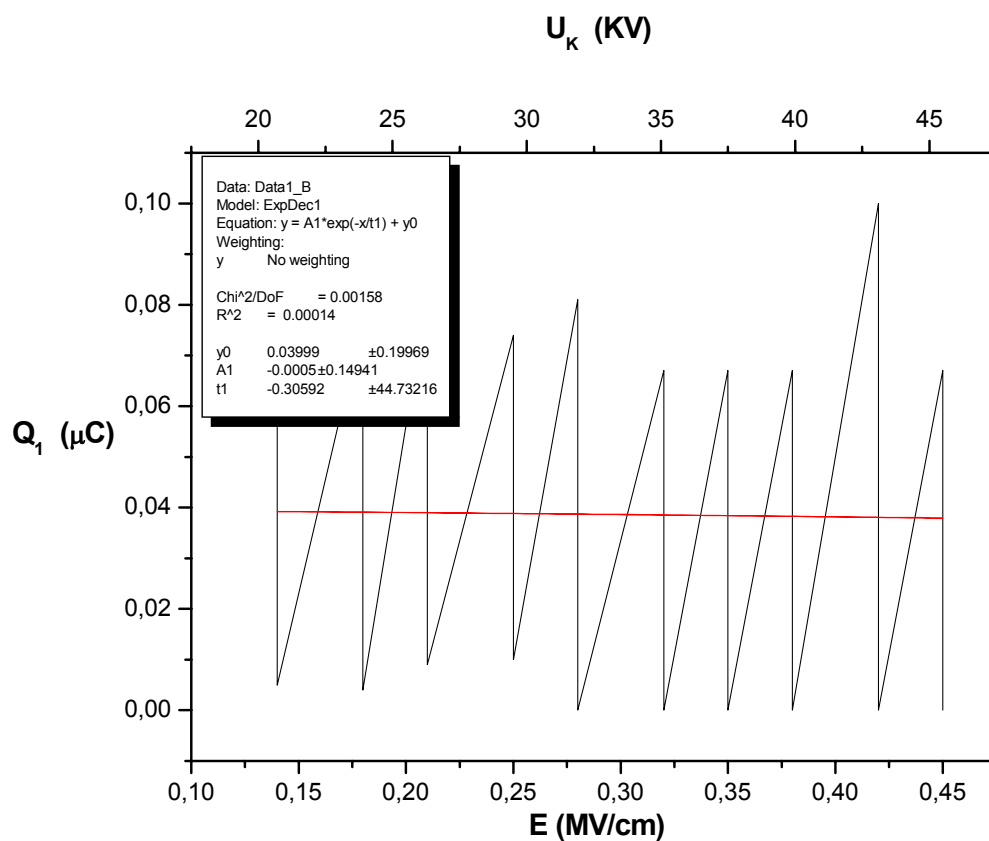
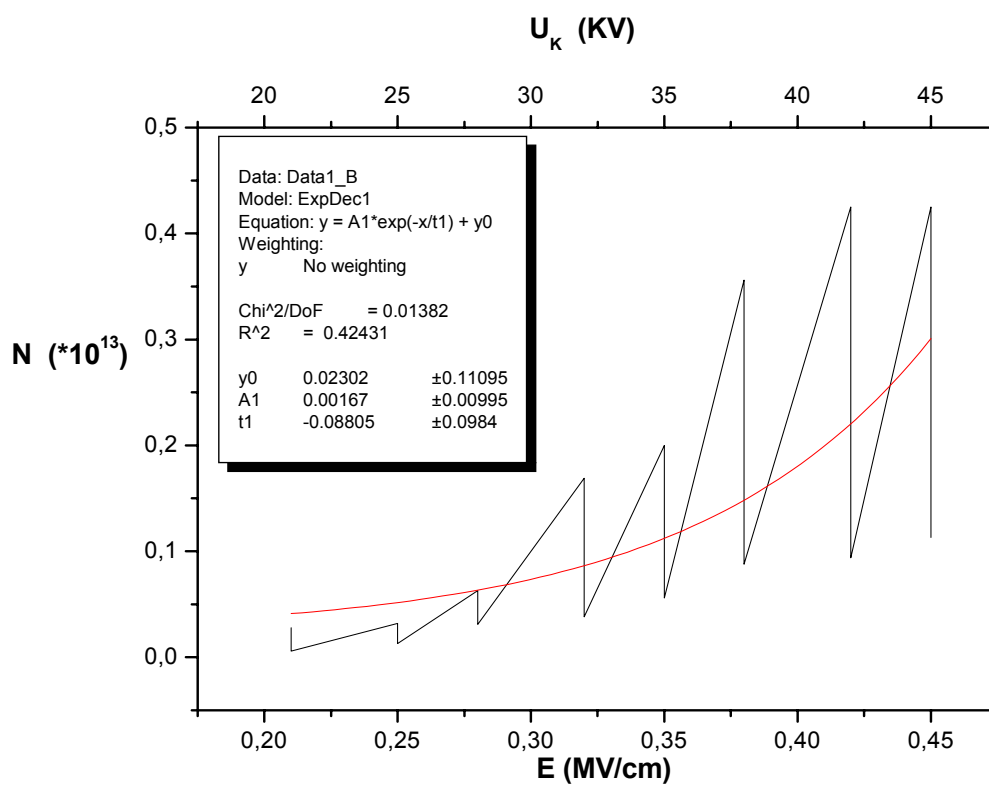




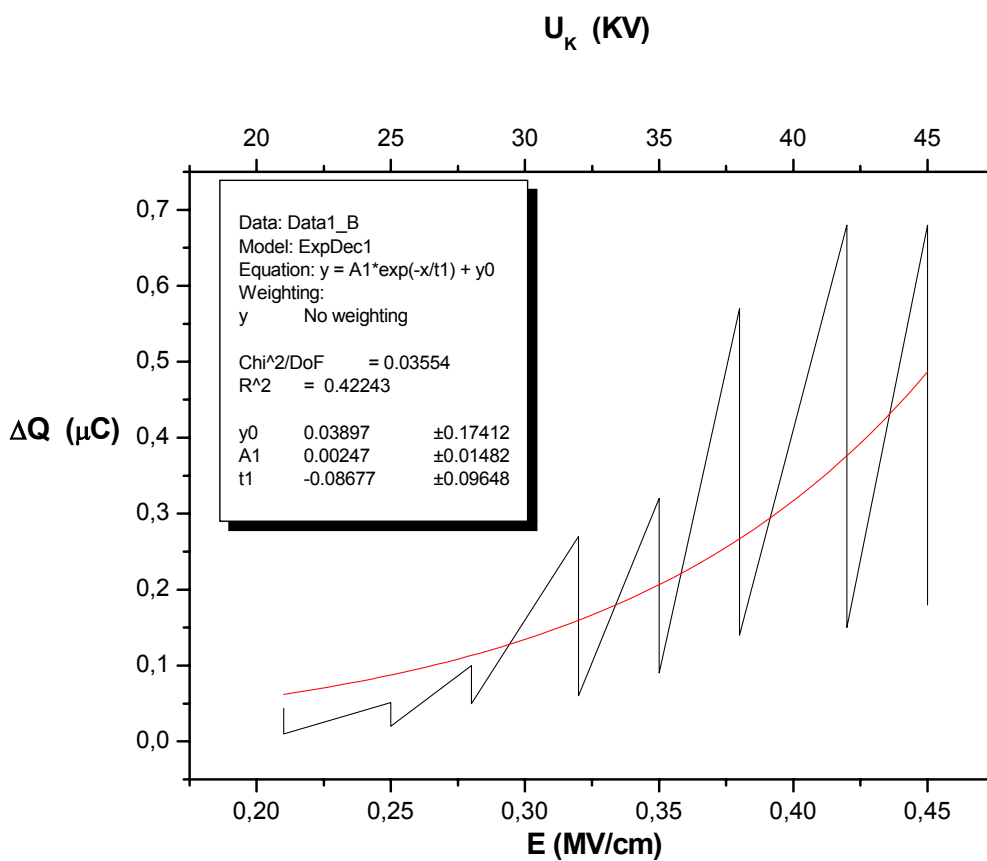
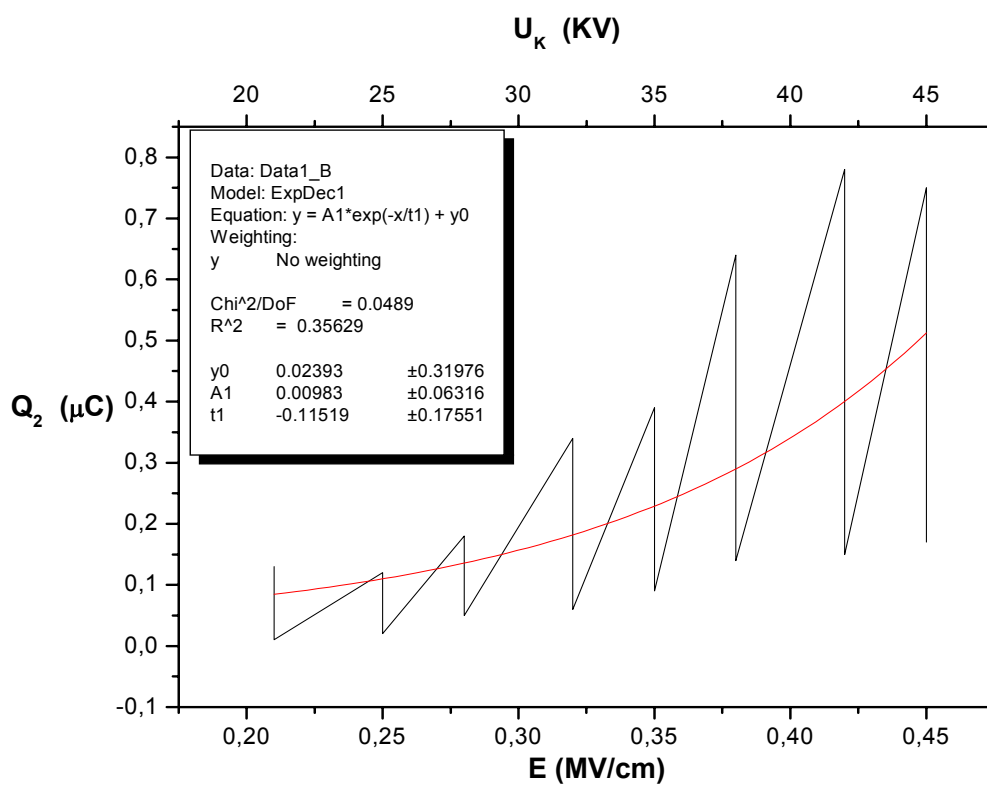
Θετική πολικότητα  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 20^\circ\text{C}$

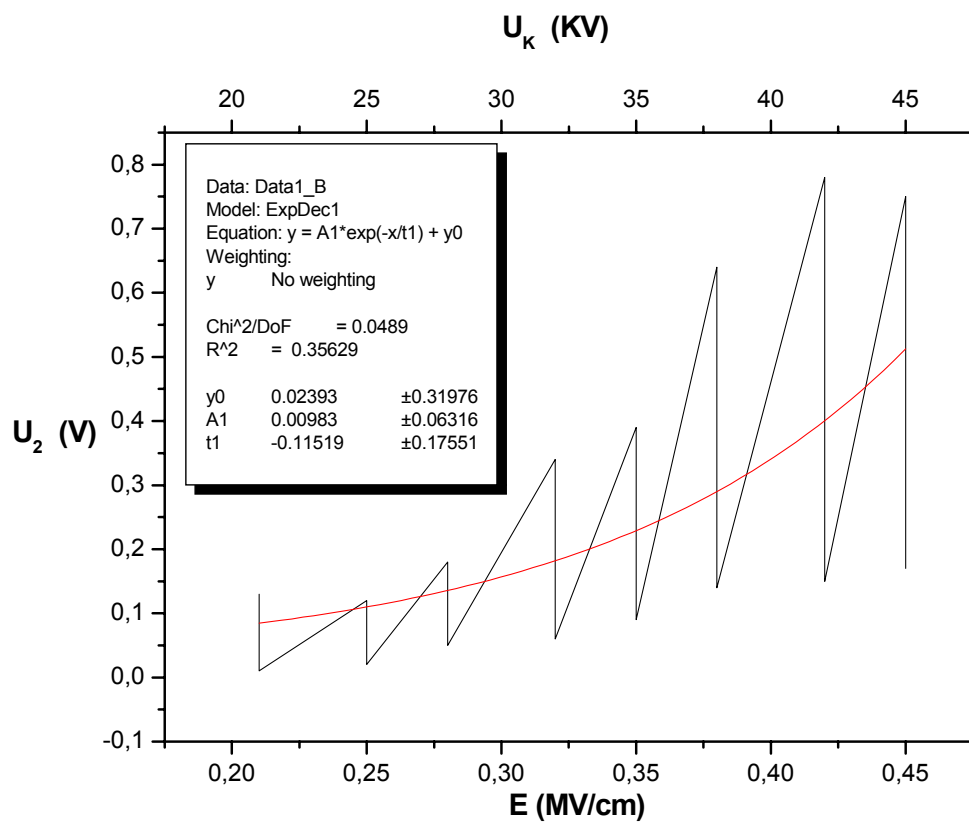
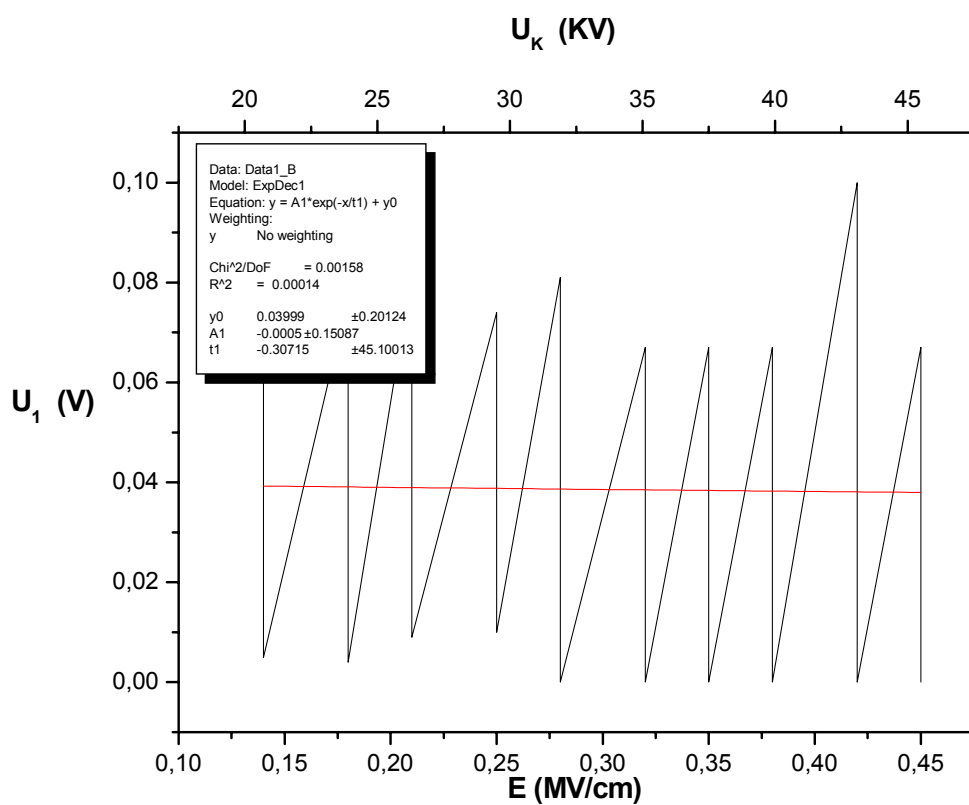


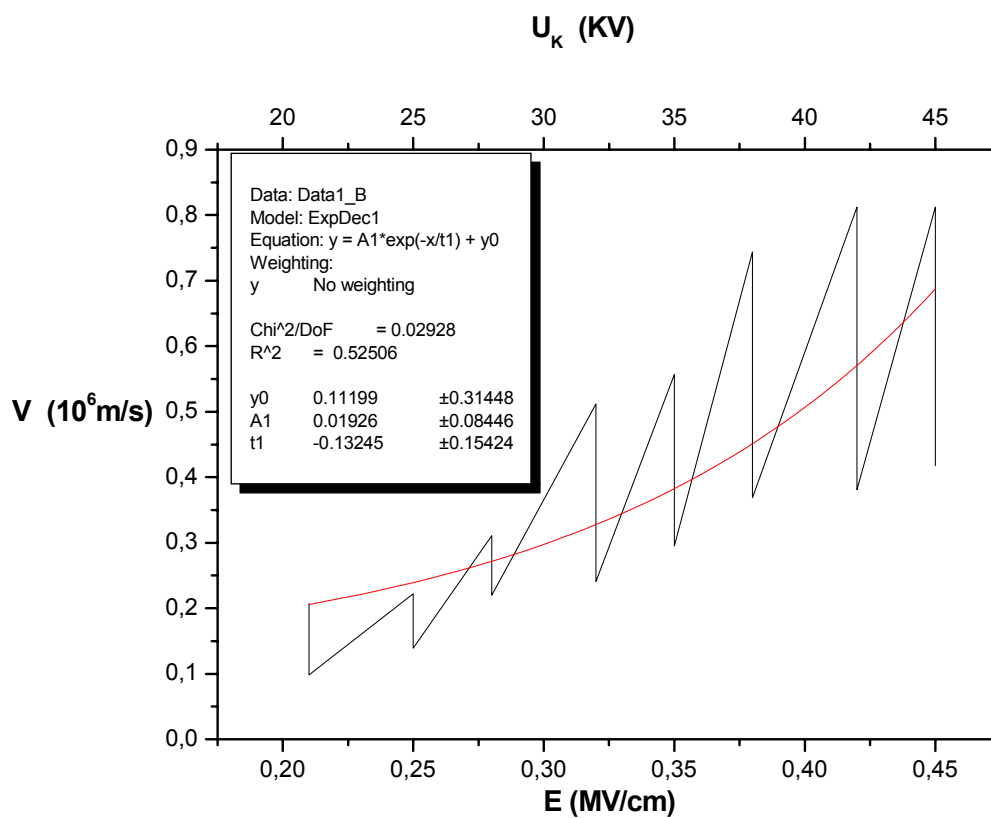
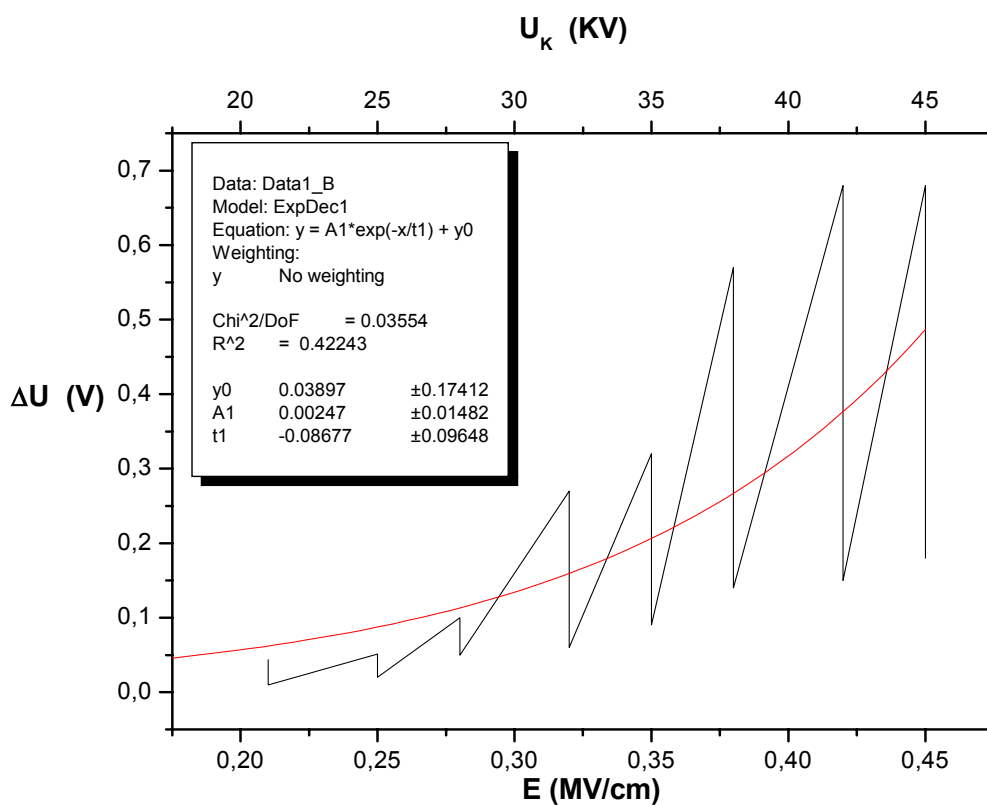


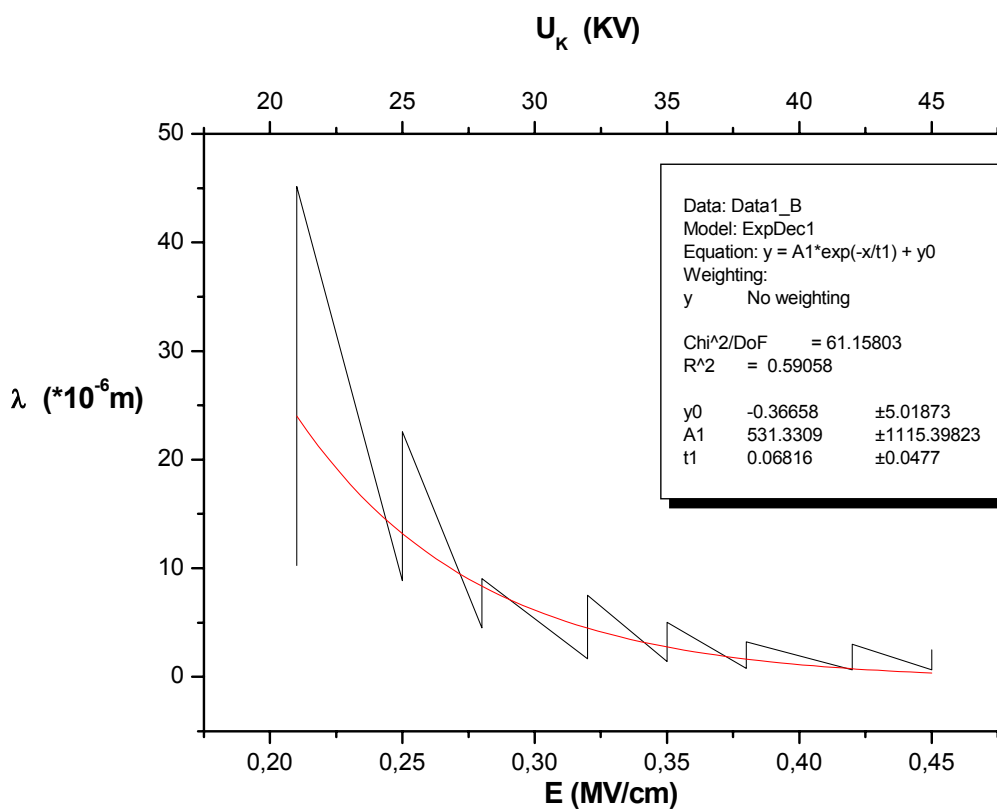
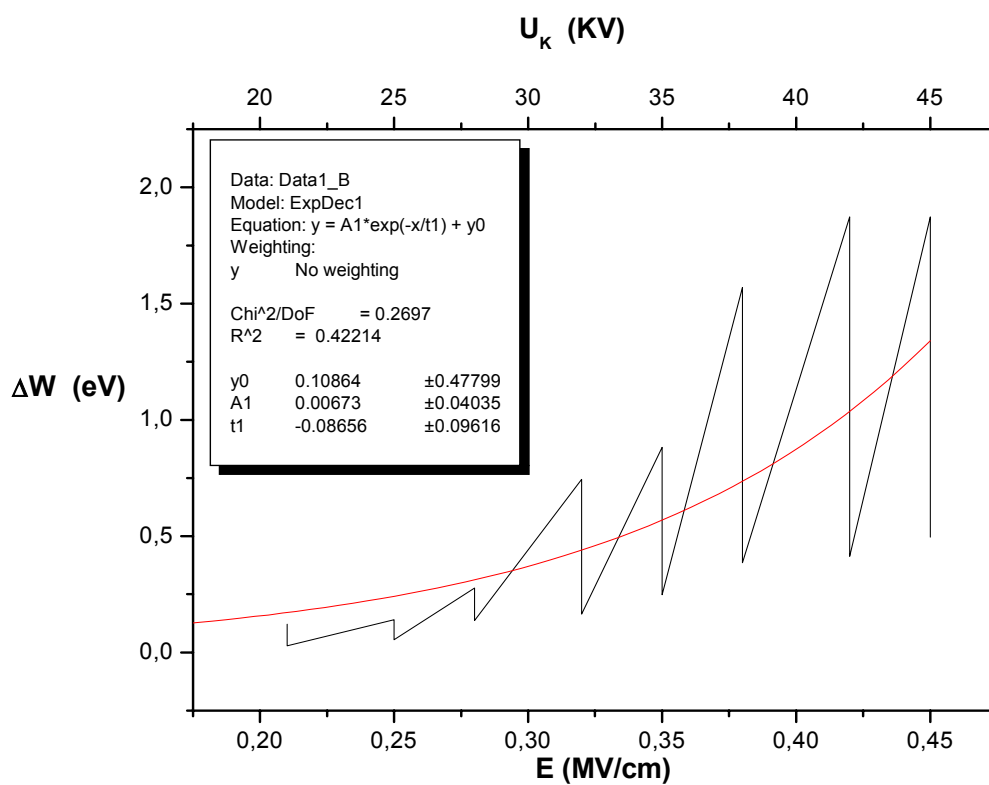


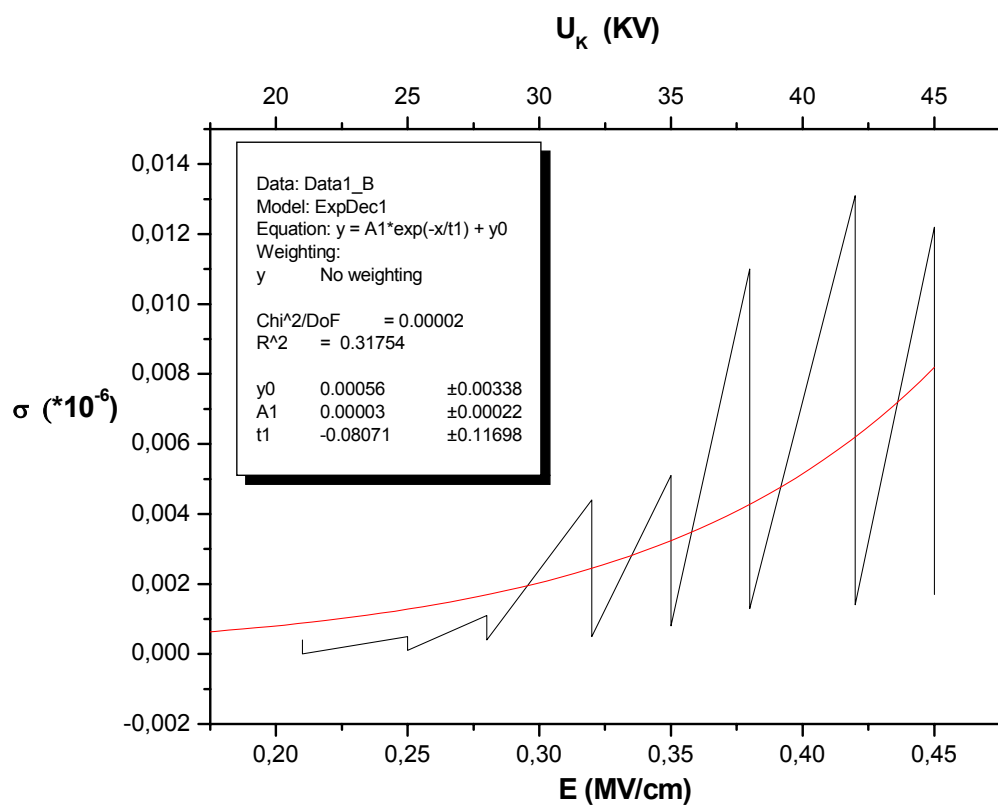




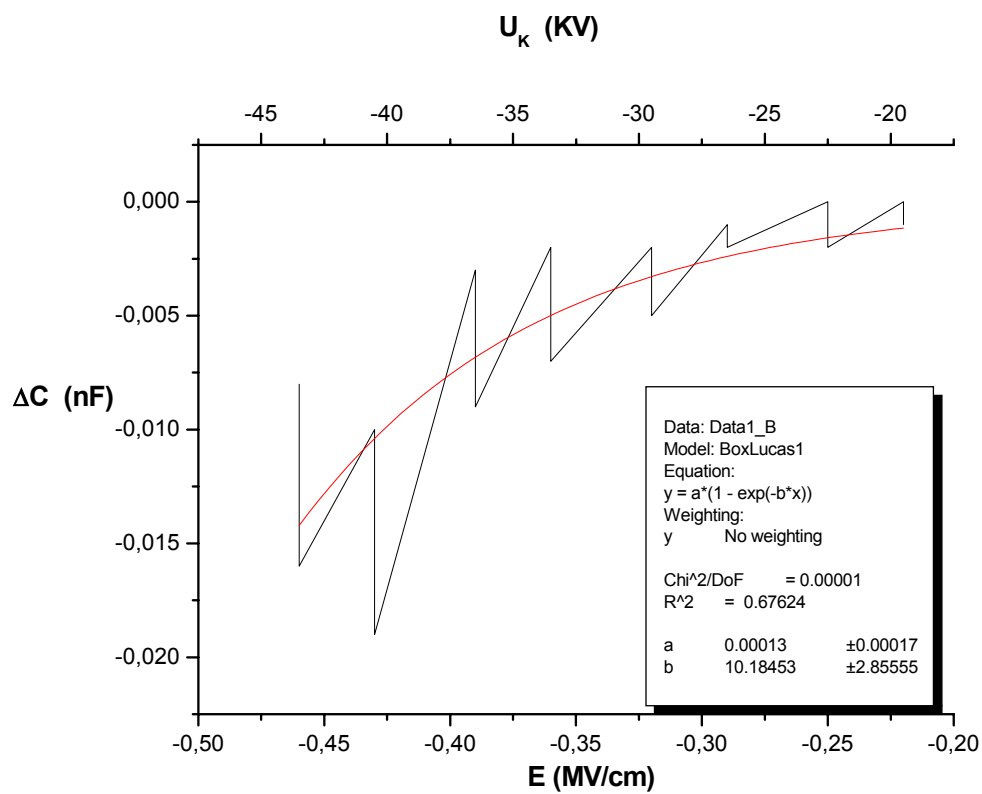
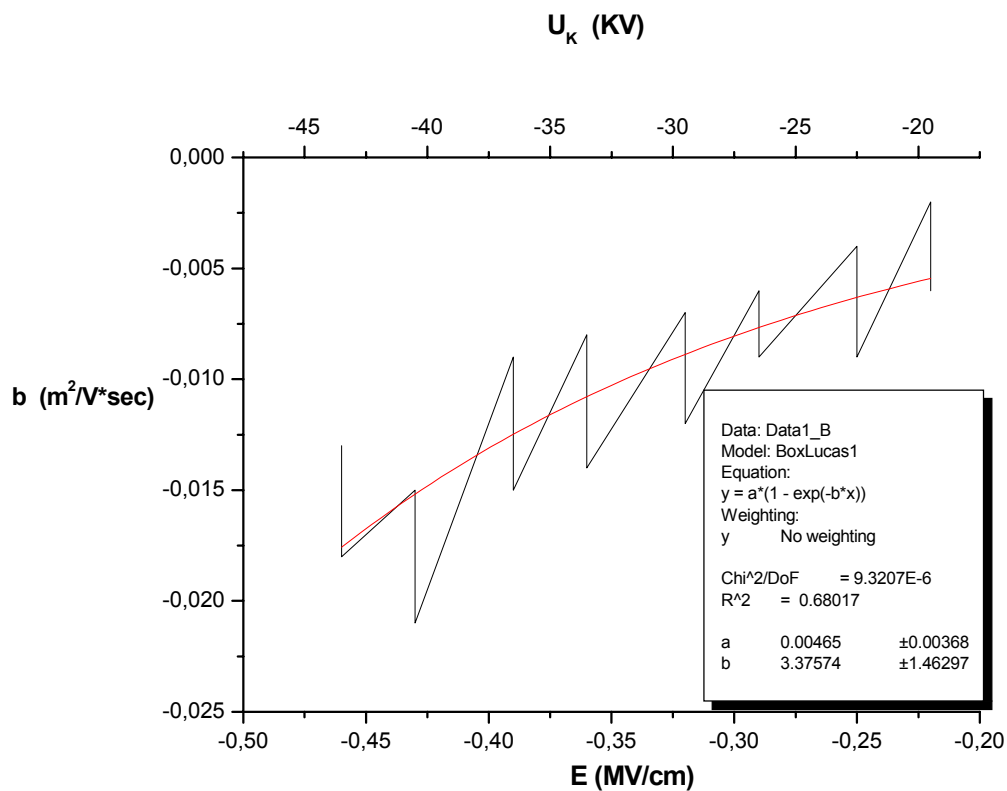


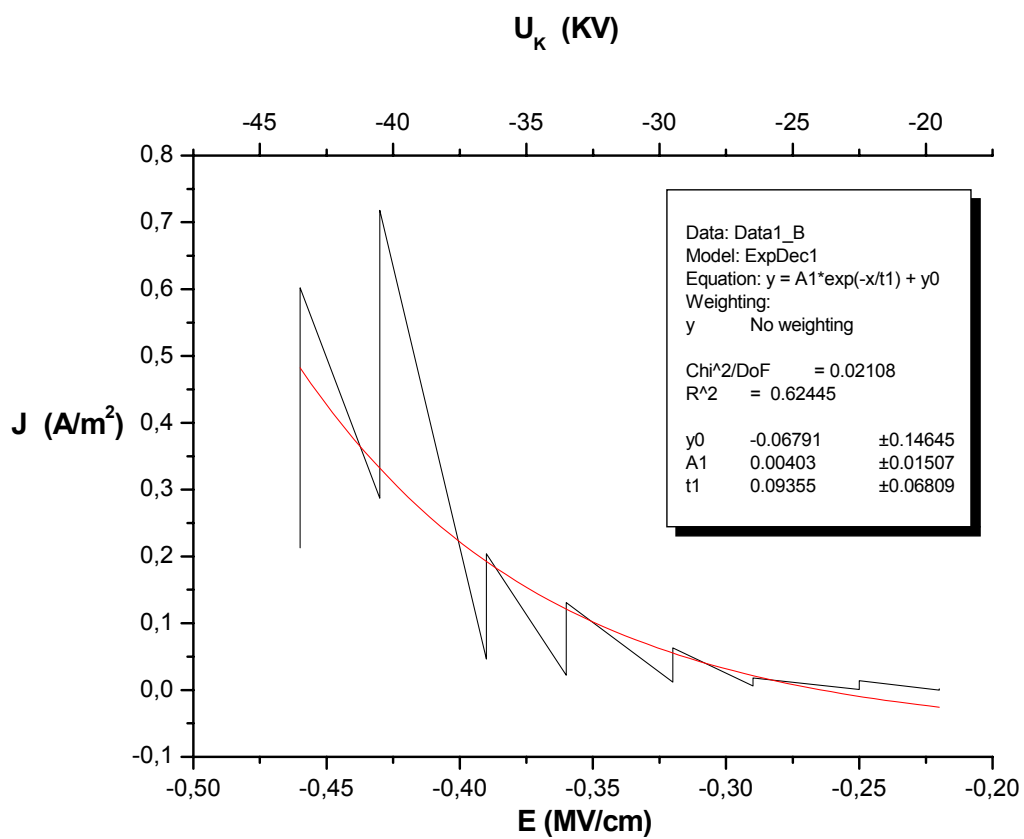
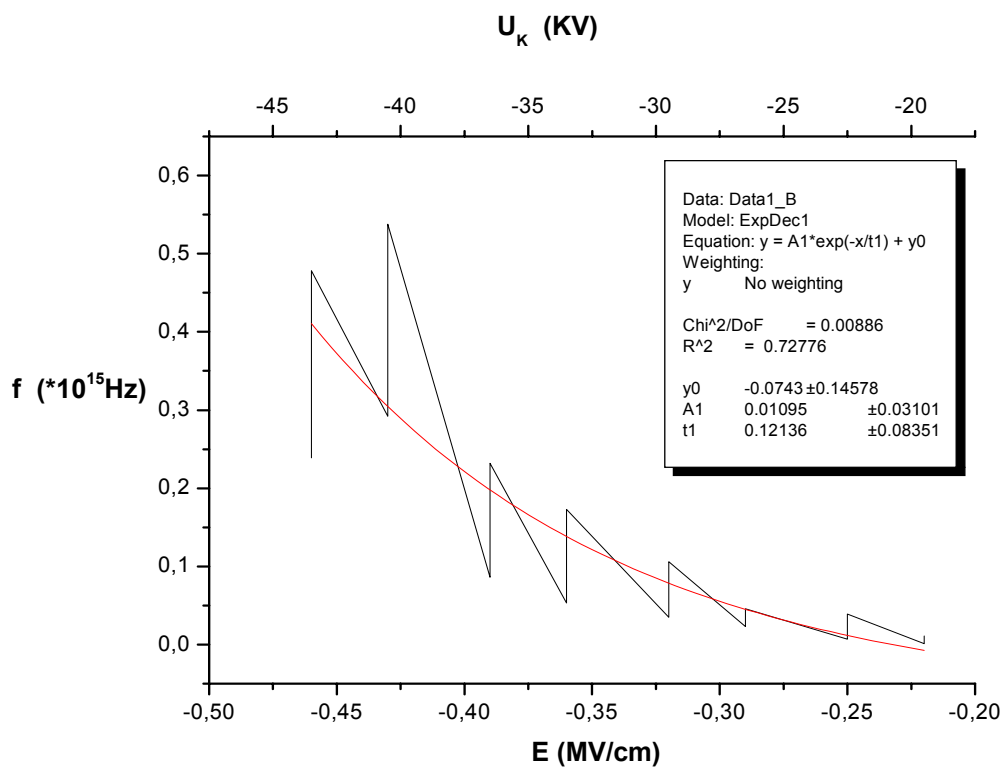


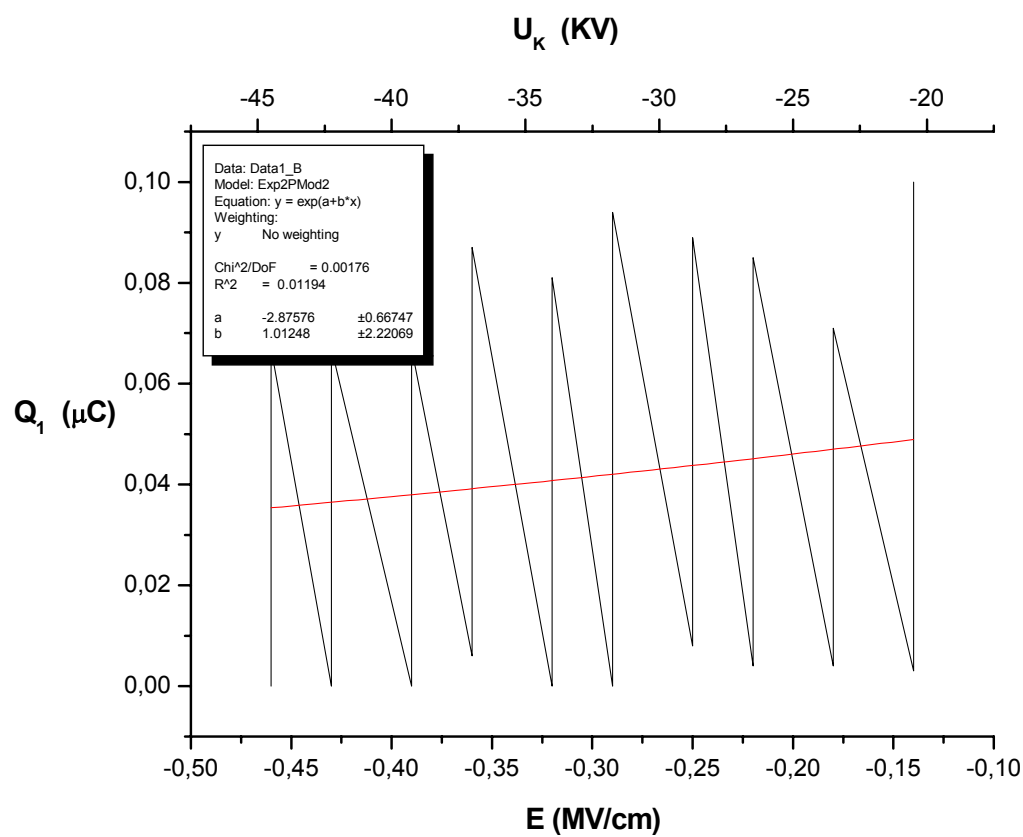
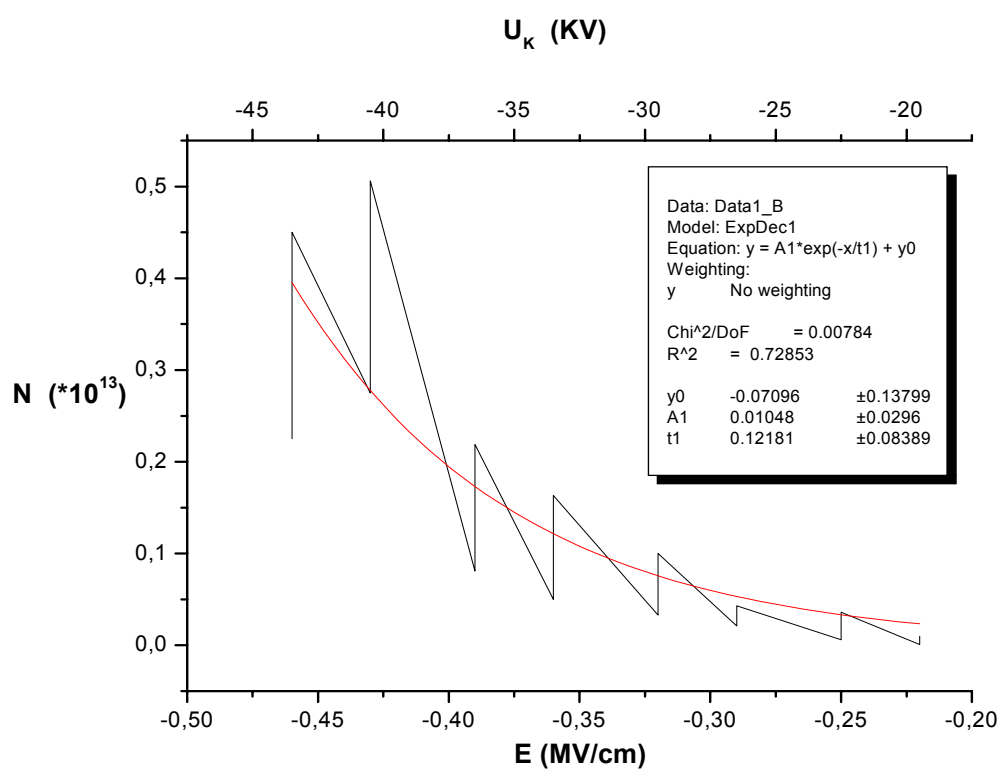




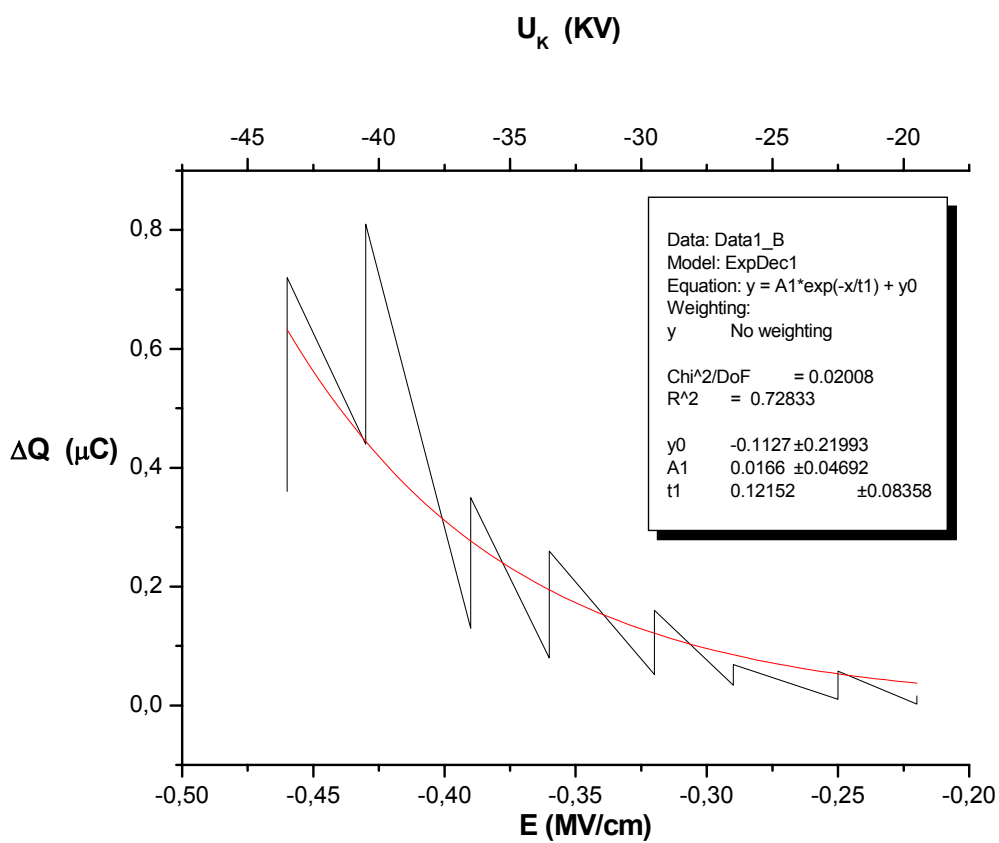
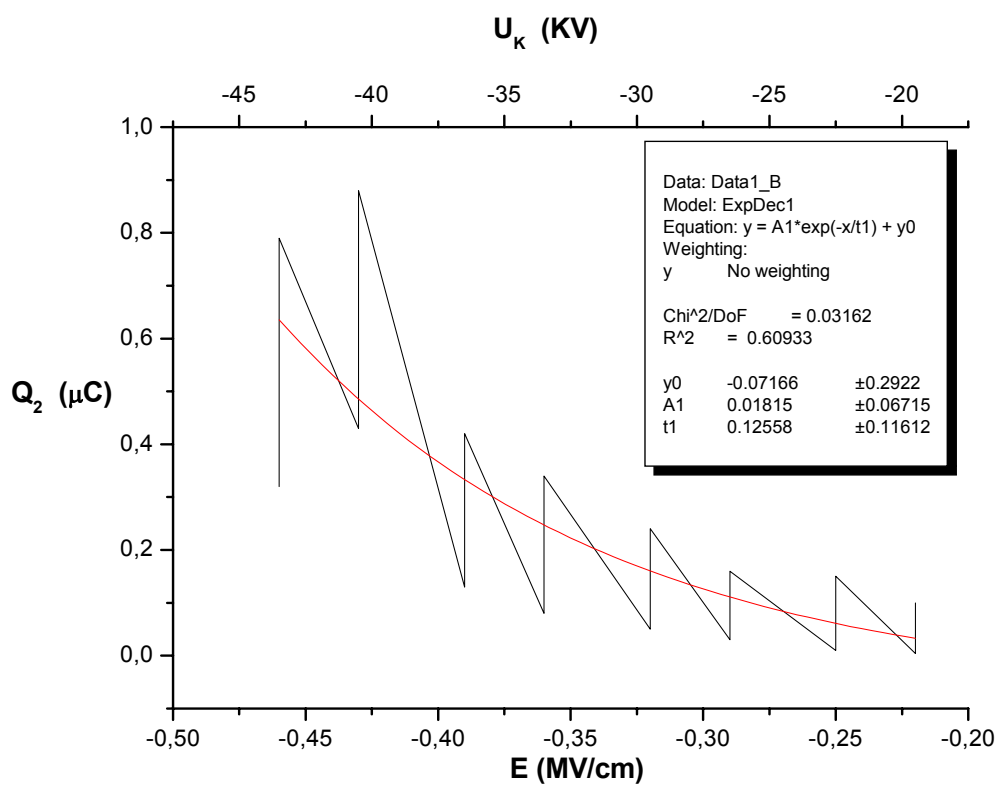
Αρνητική πολικότητα  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 20^\circ\text{C}$

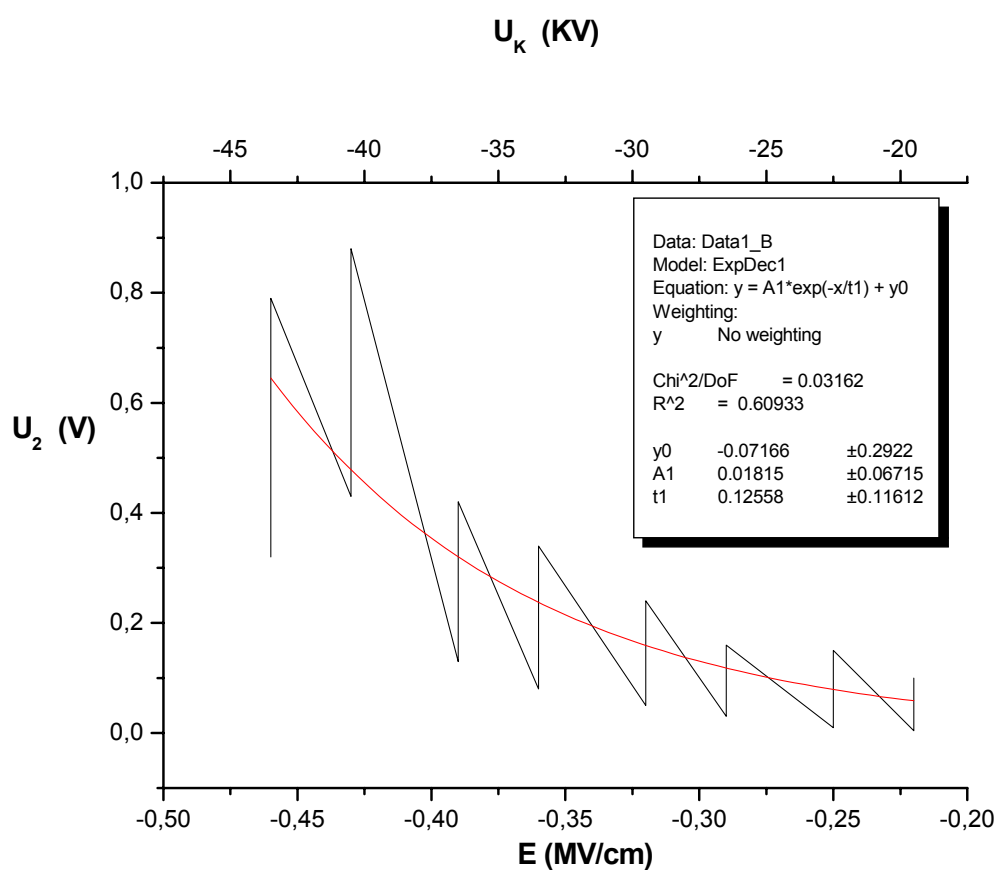
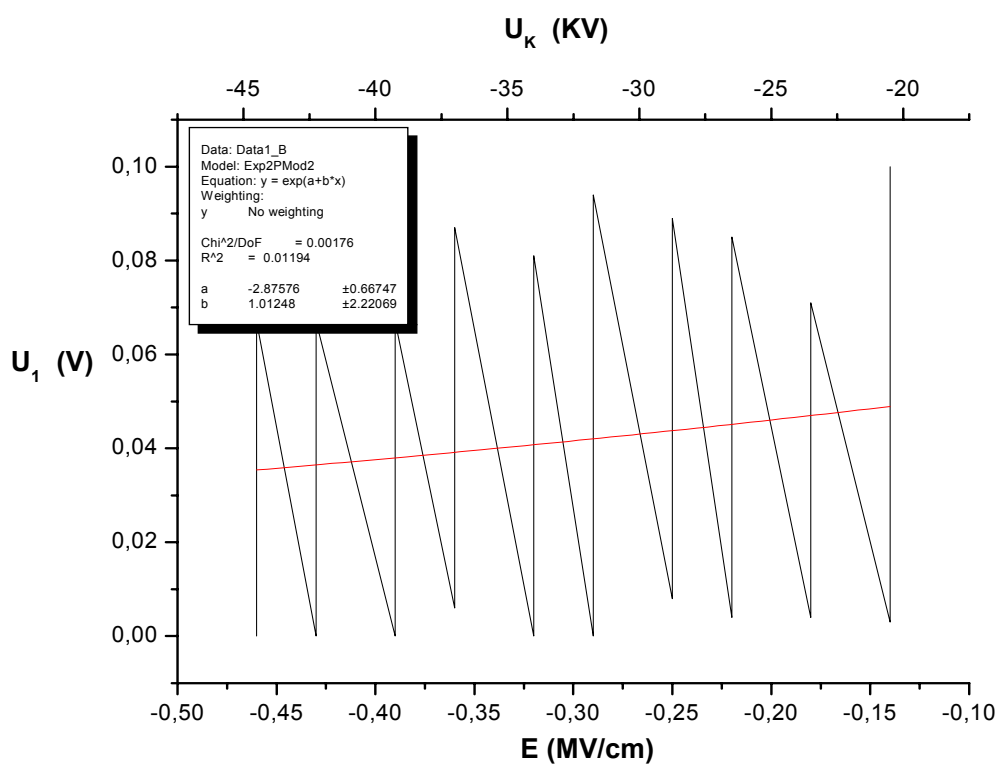


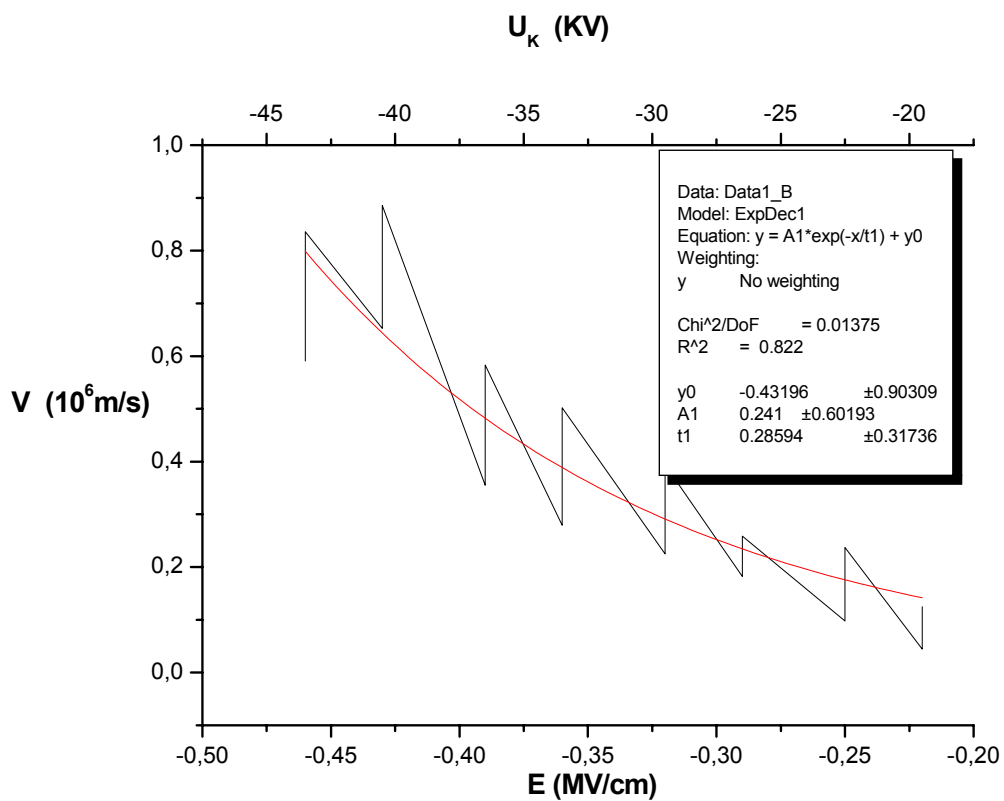
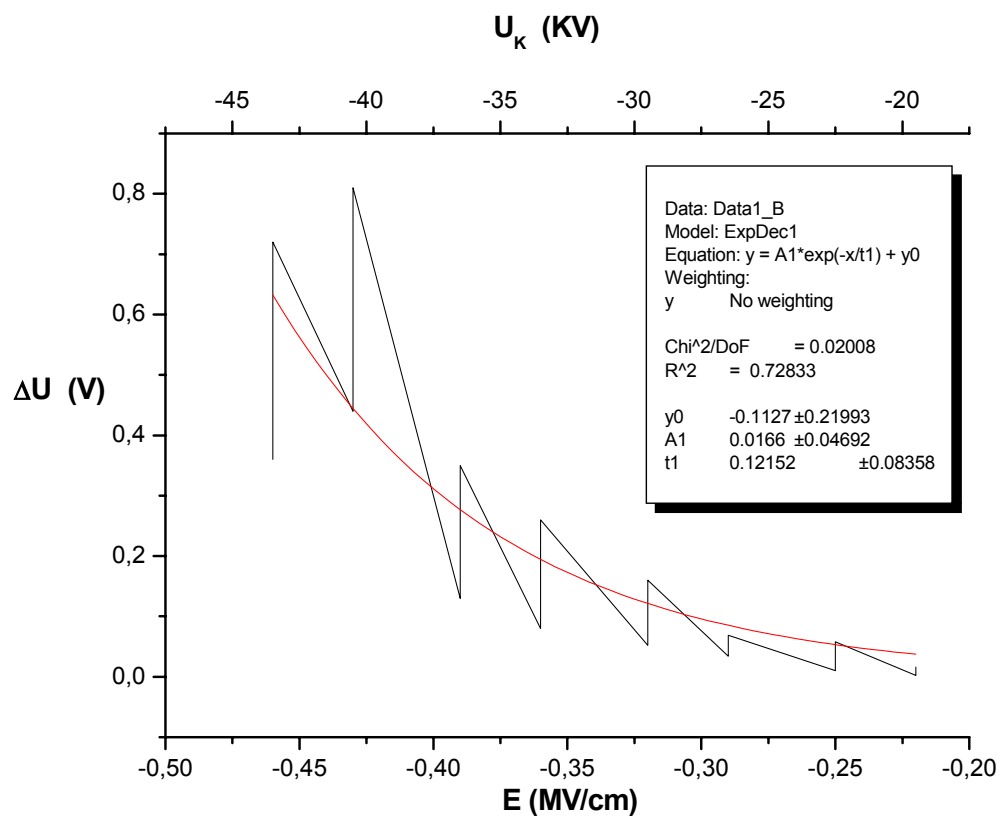


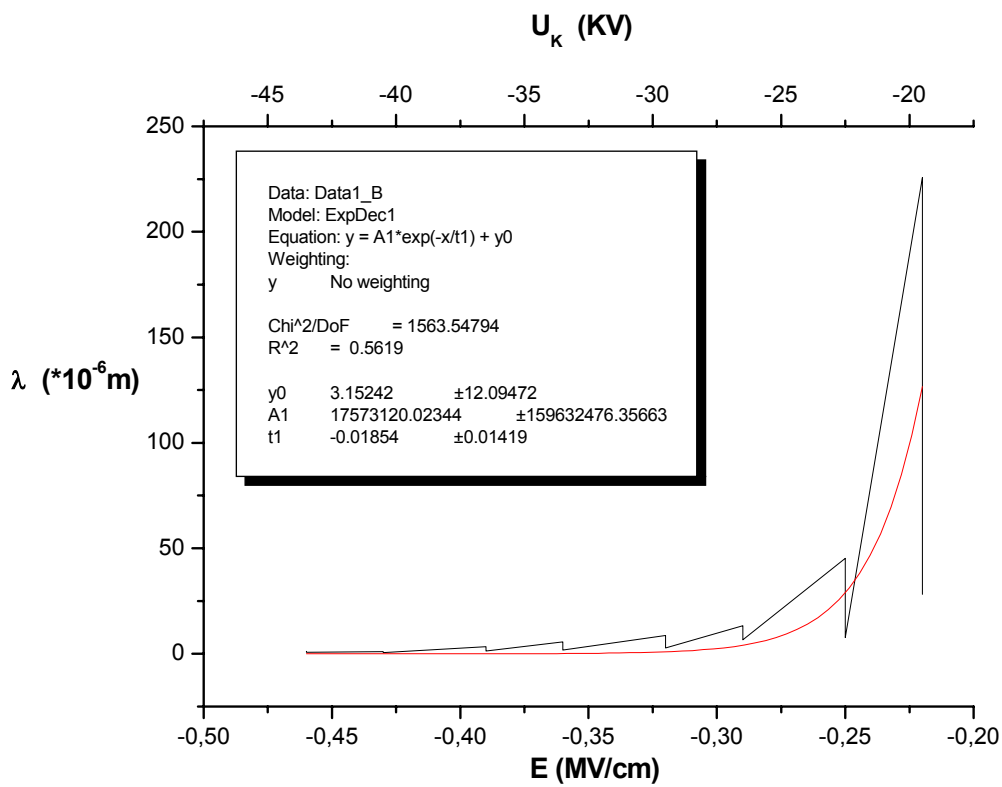
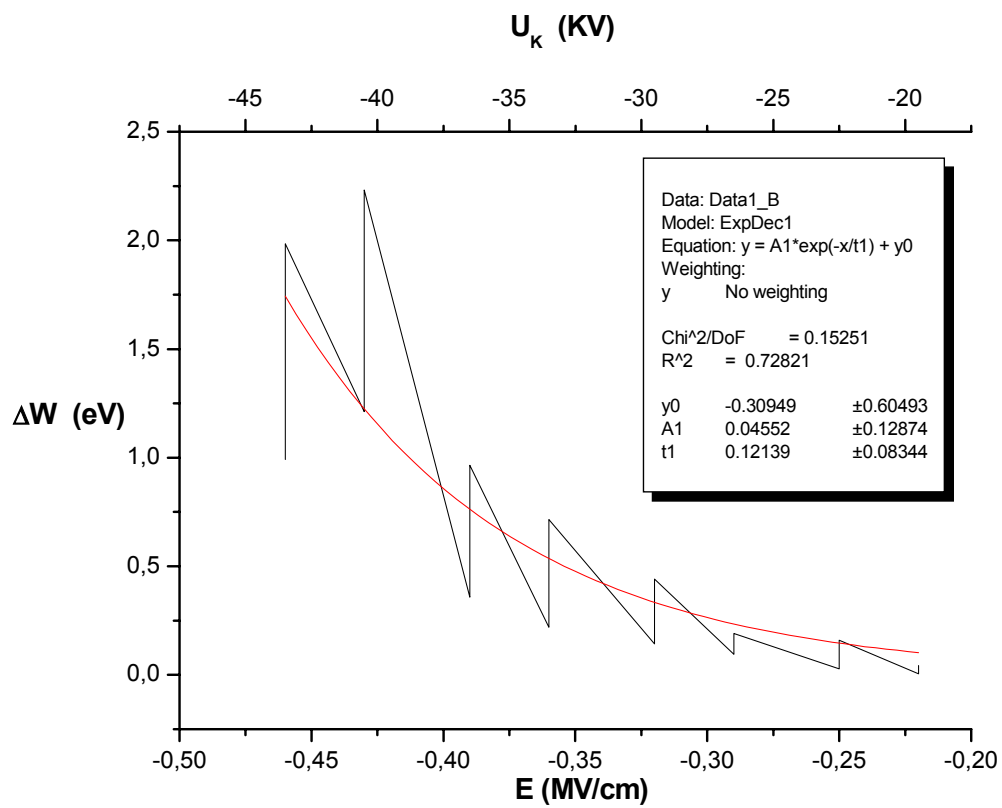


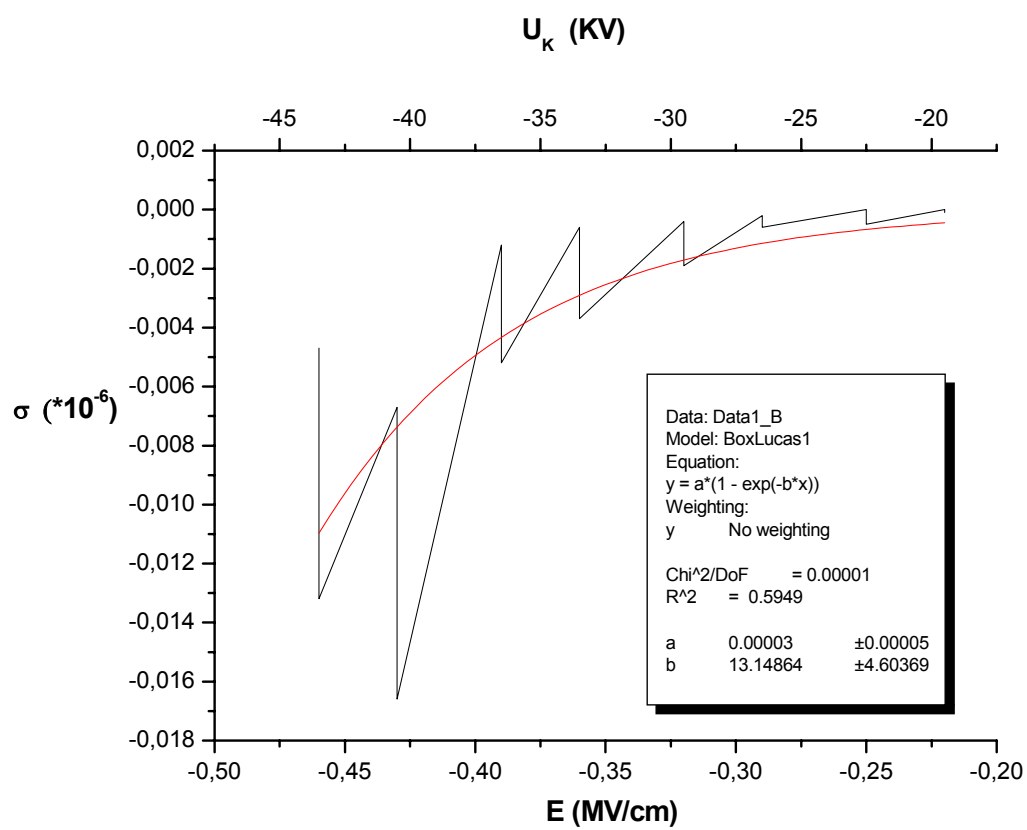




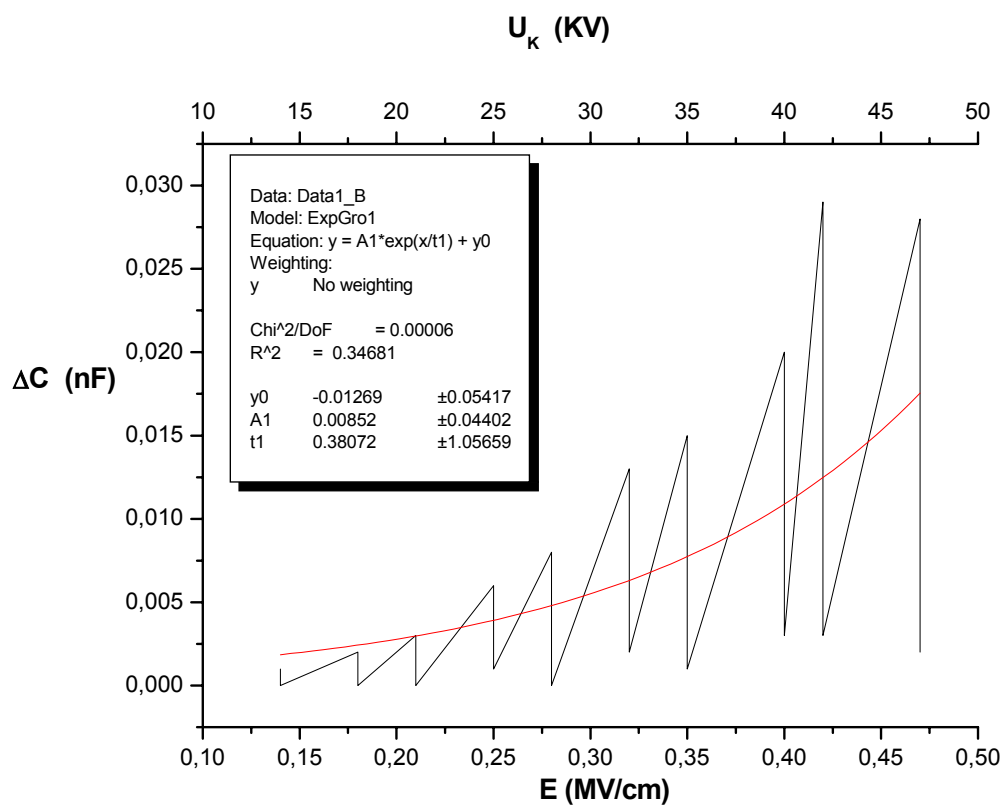
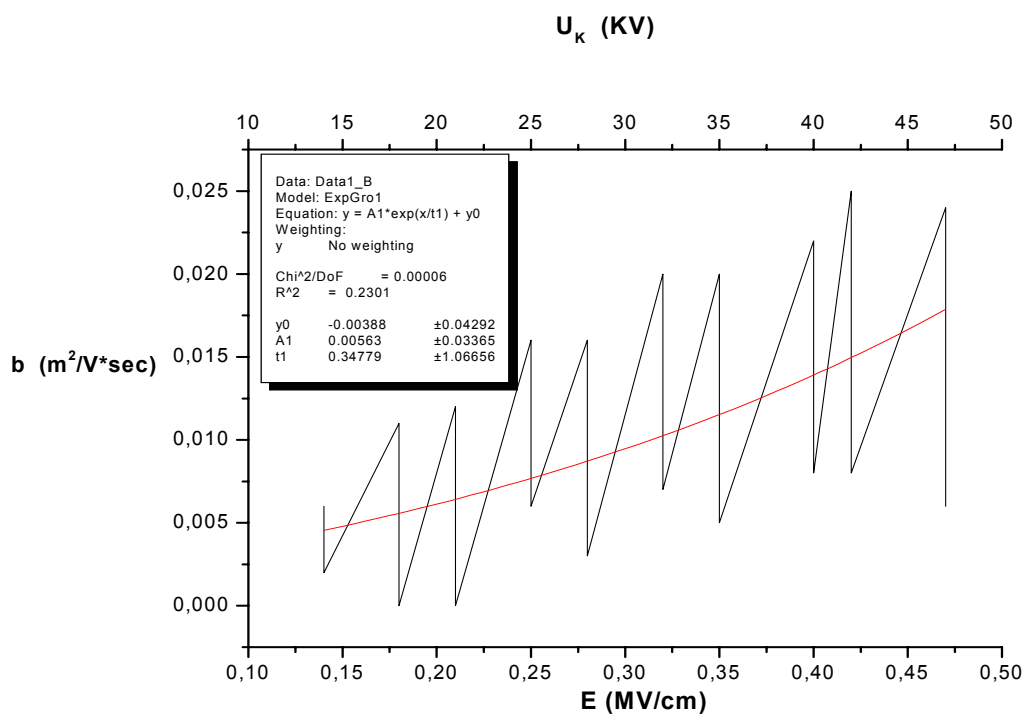


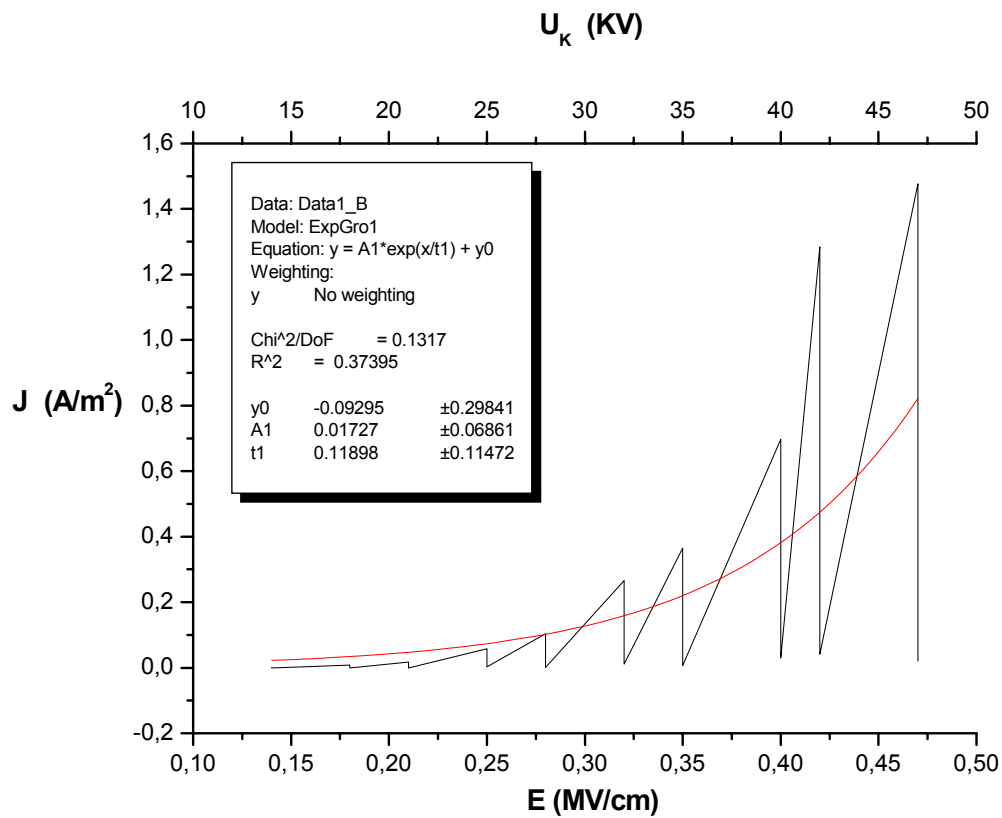
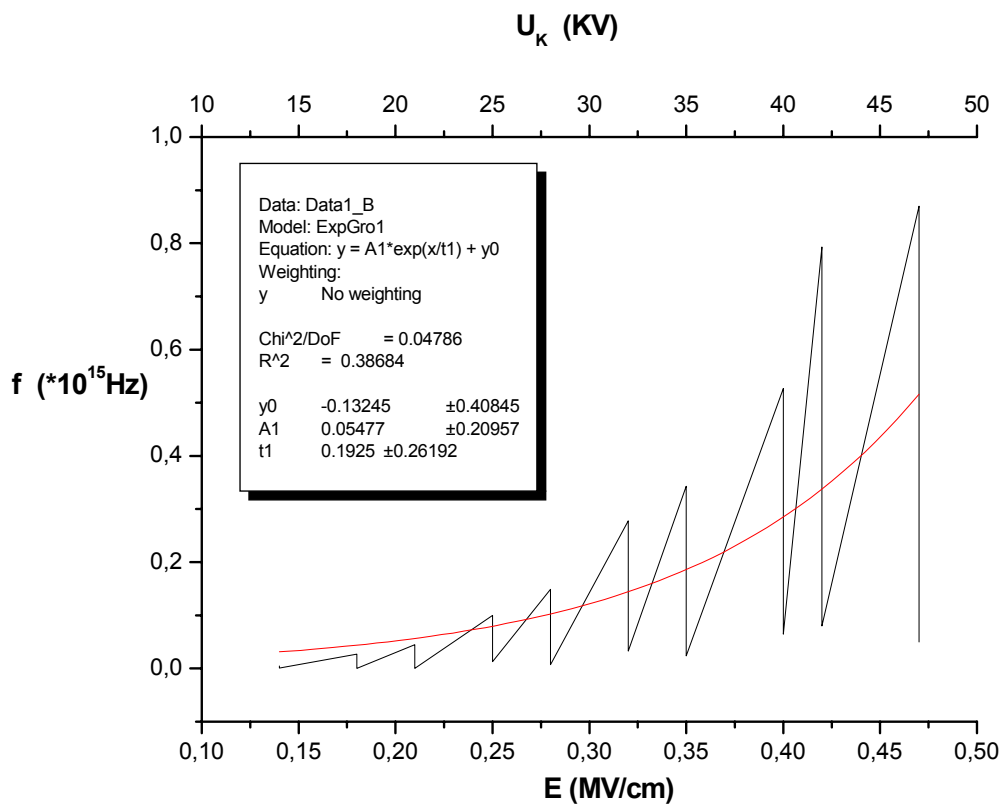


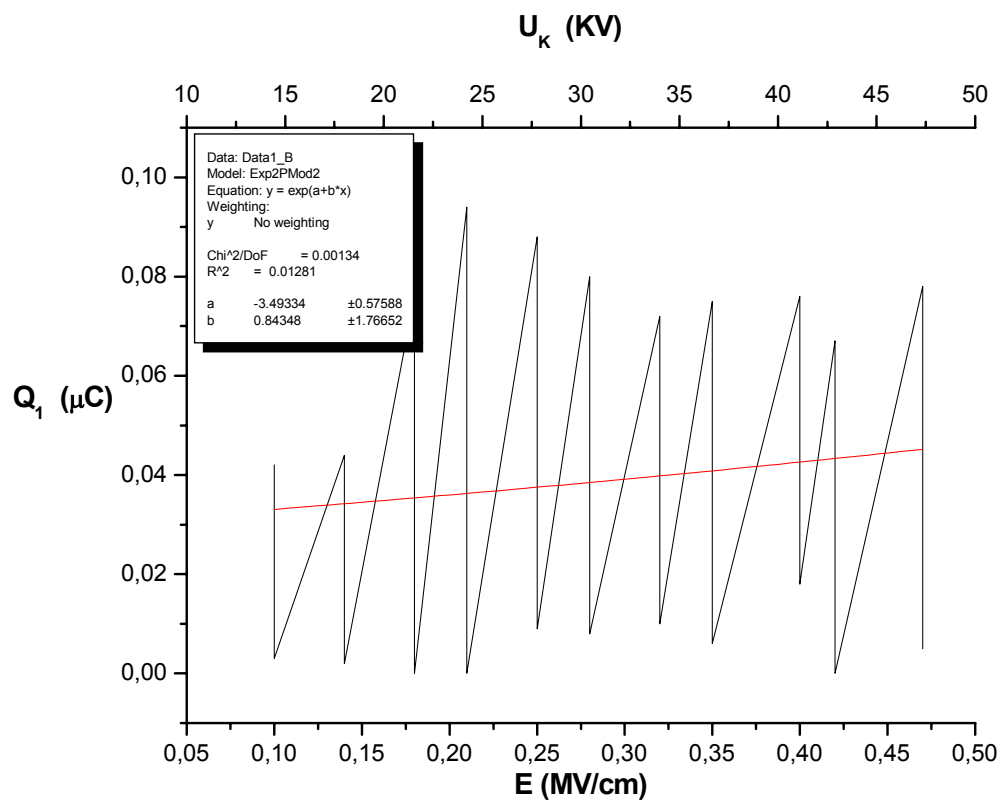
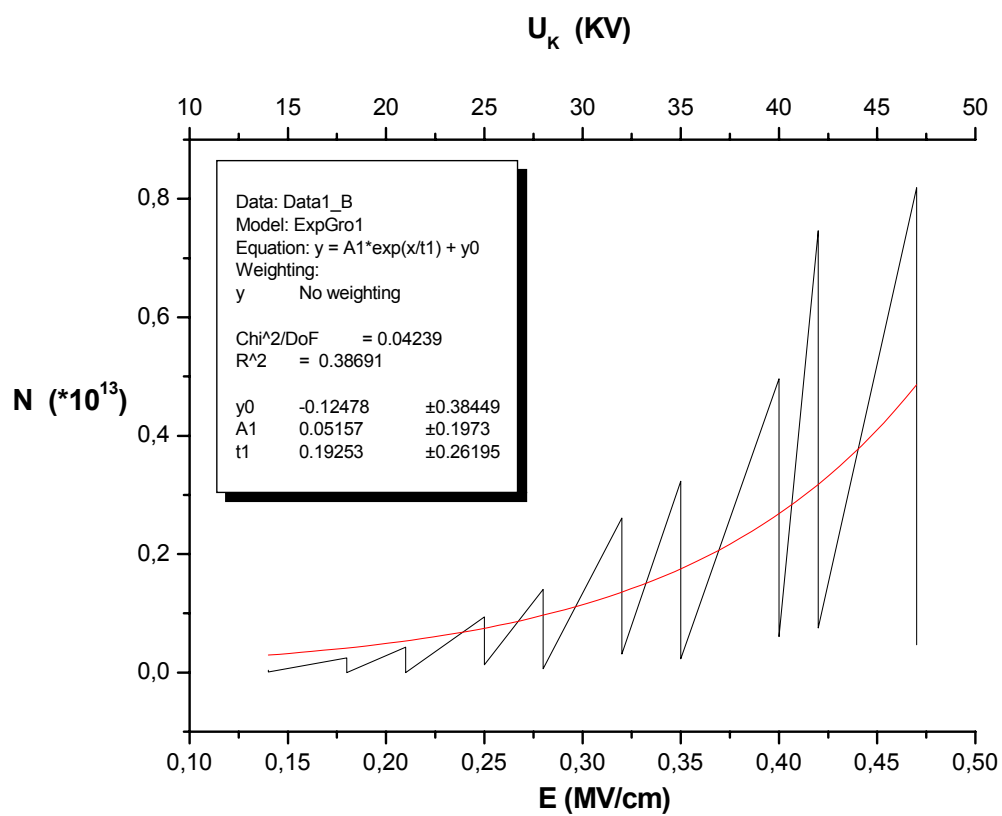




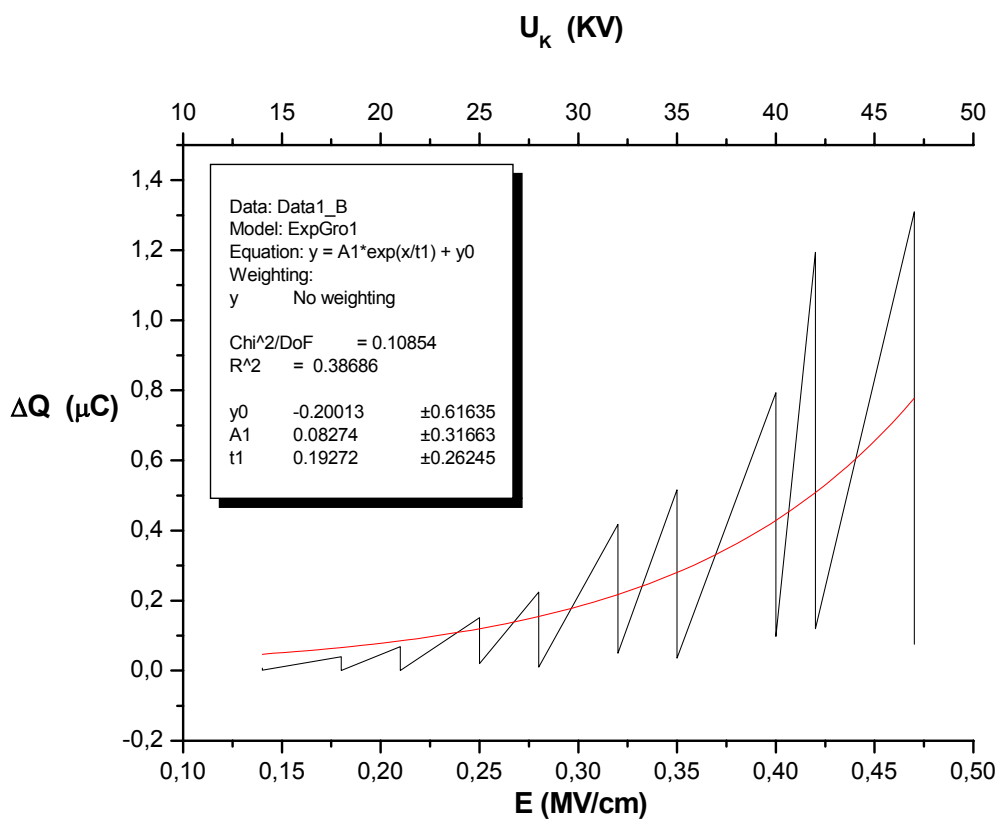
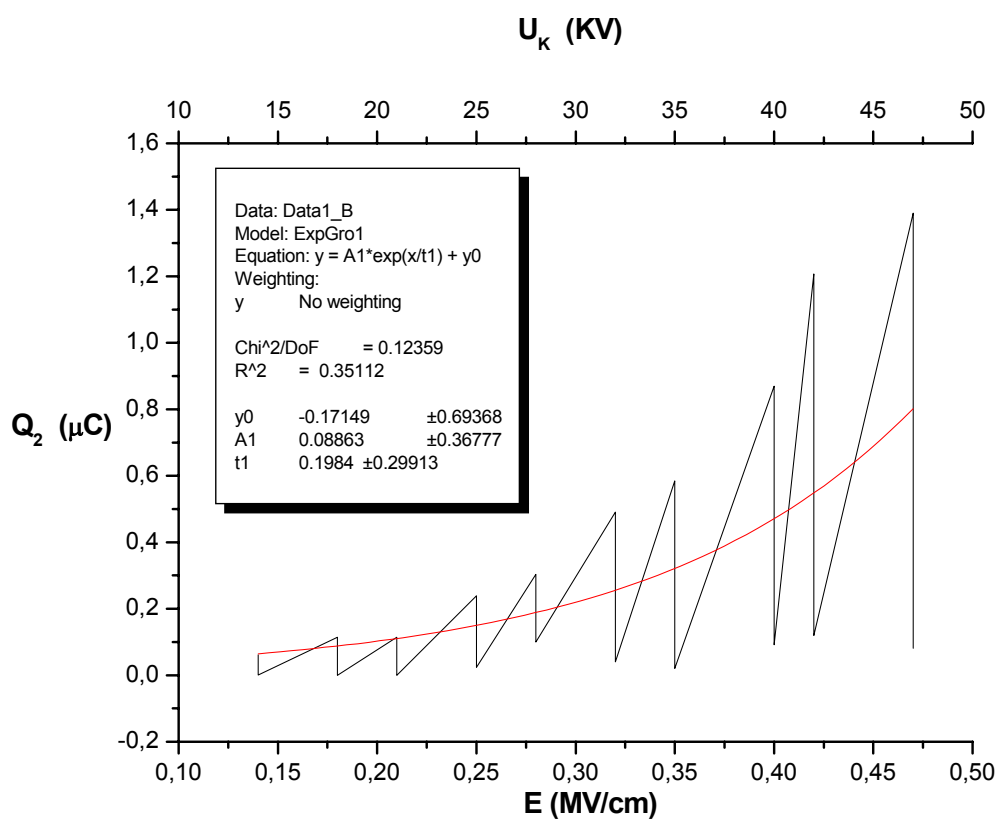
Θετική πολικότητα  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 40^\circ\text{C}$

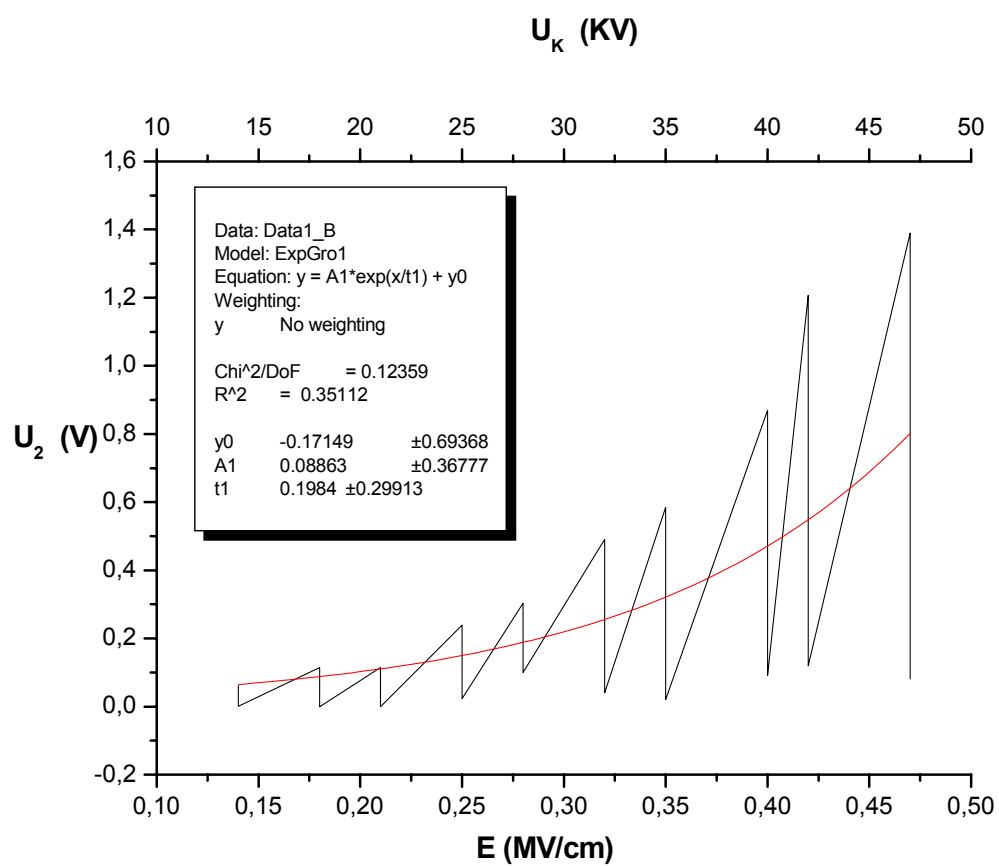
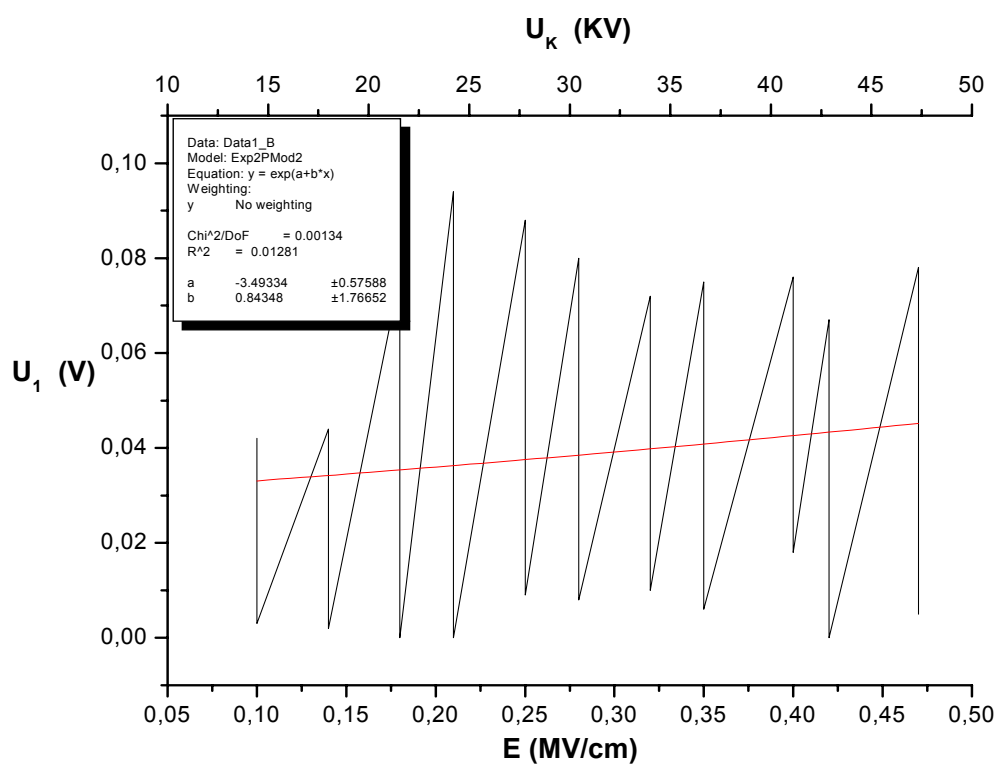


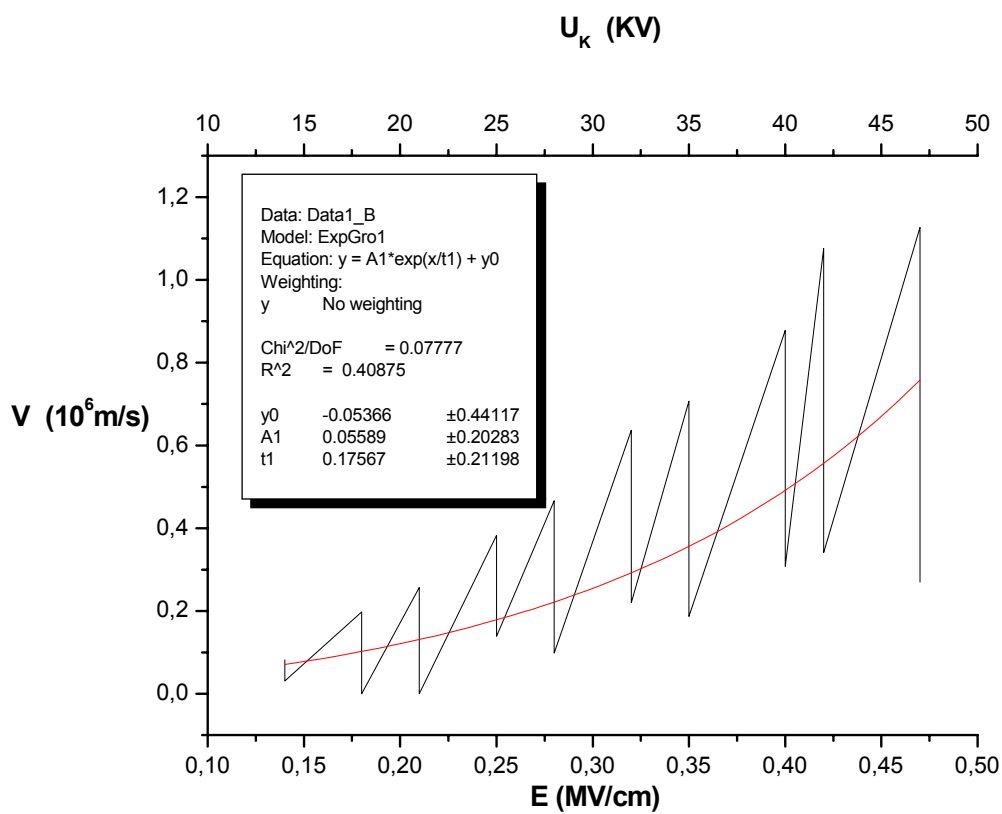
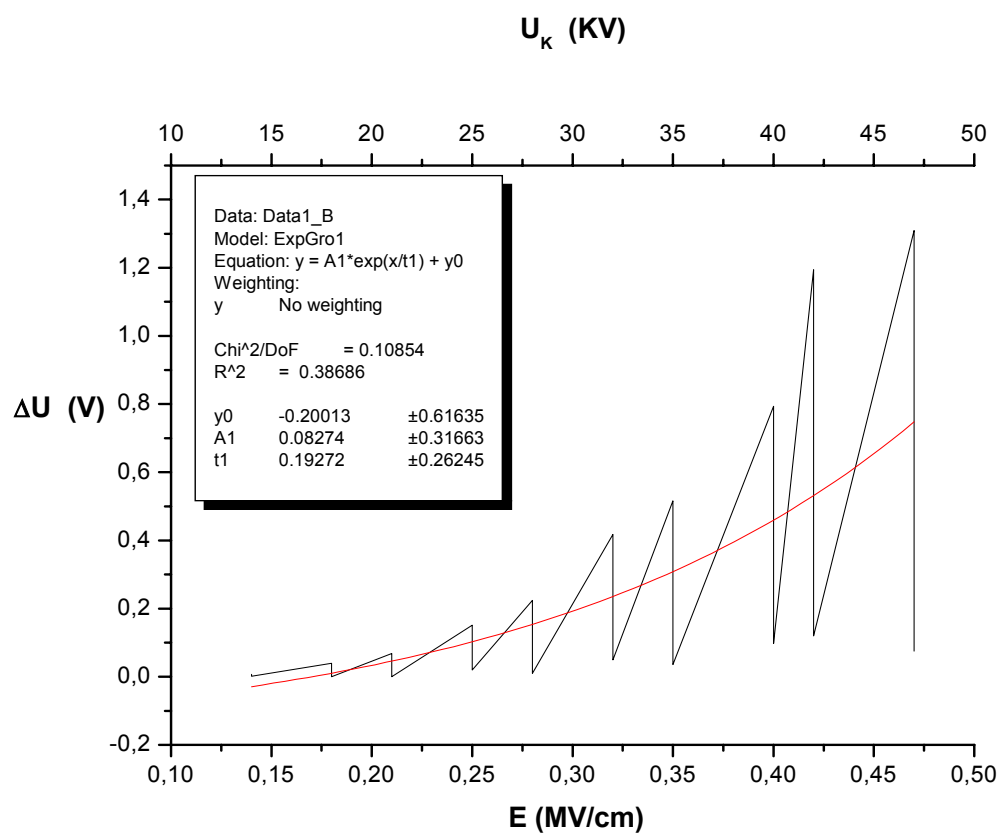


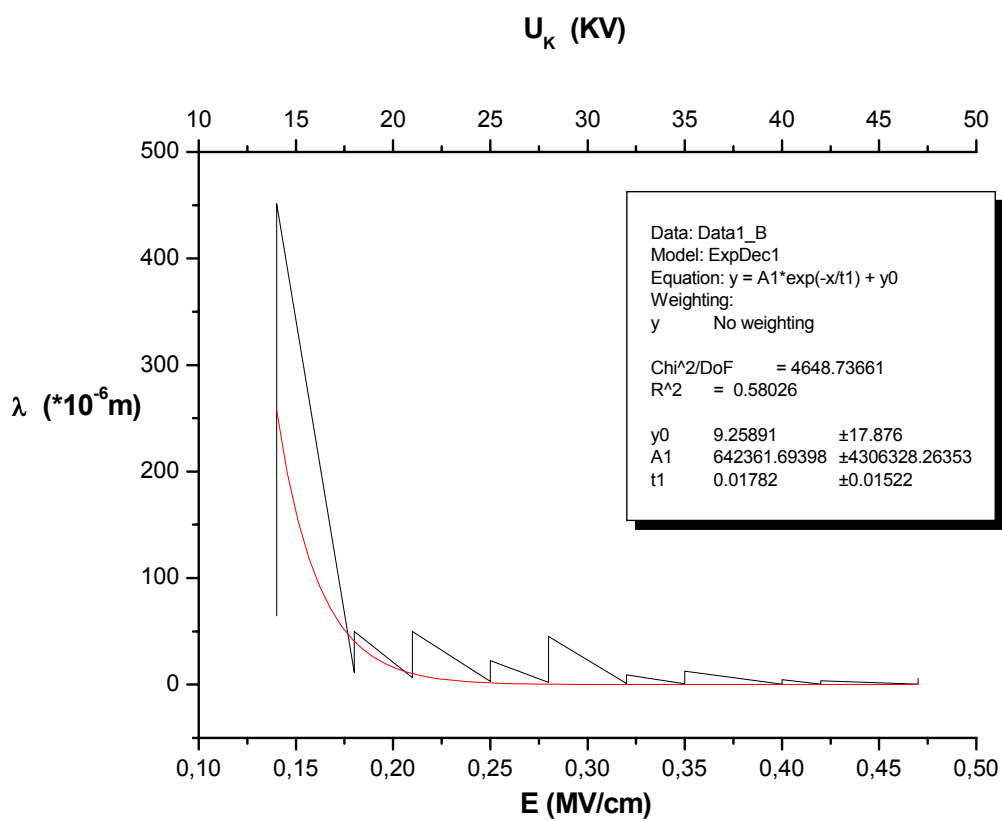
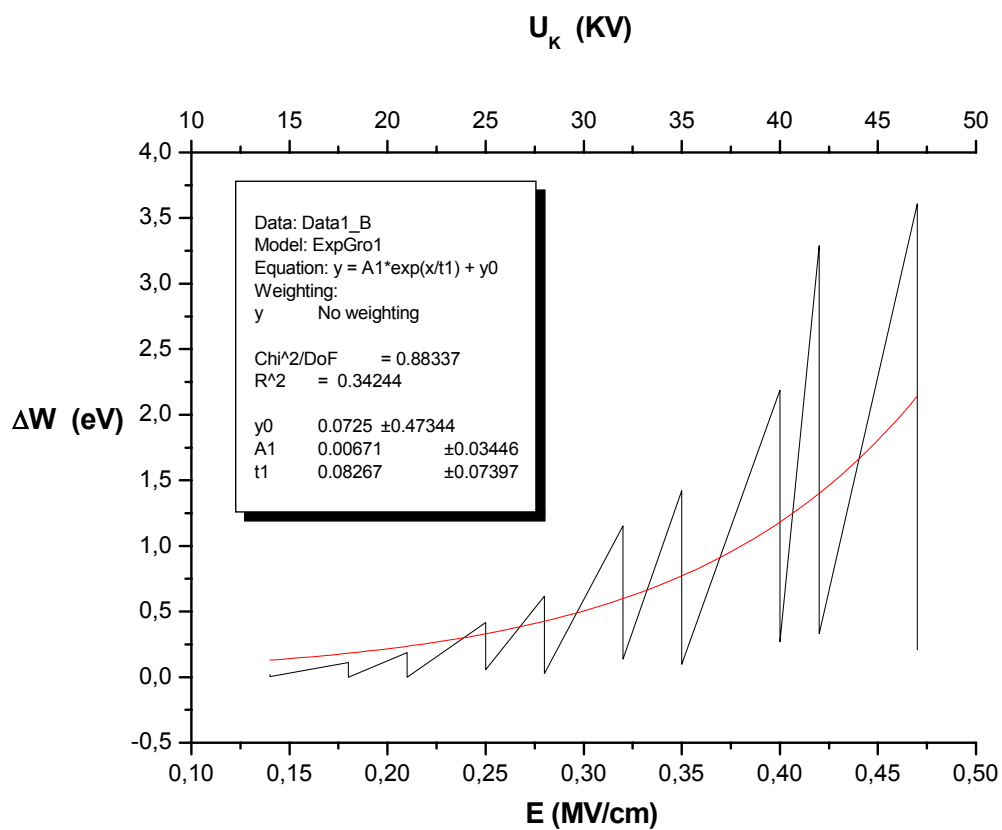


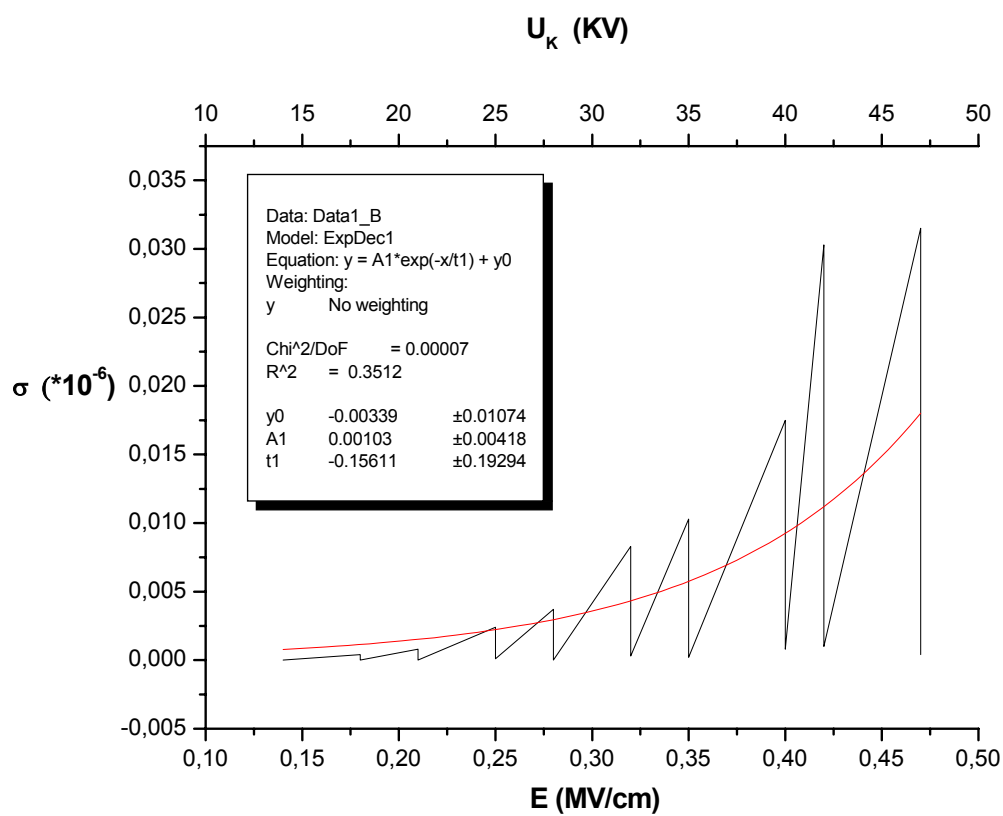




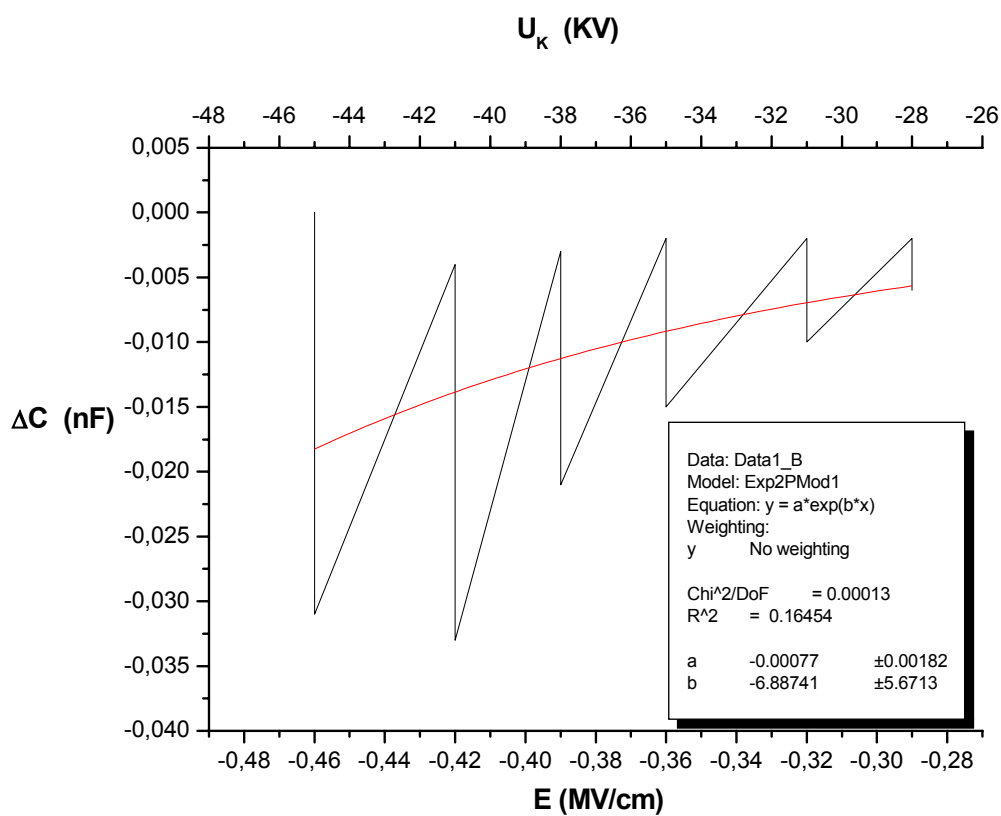
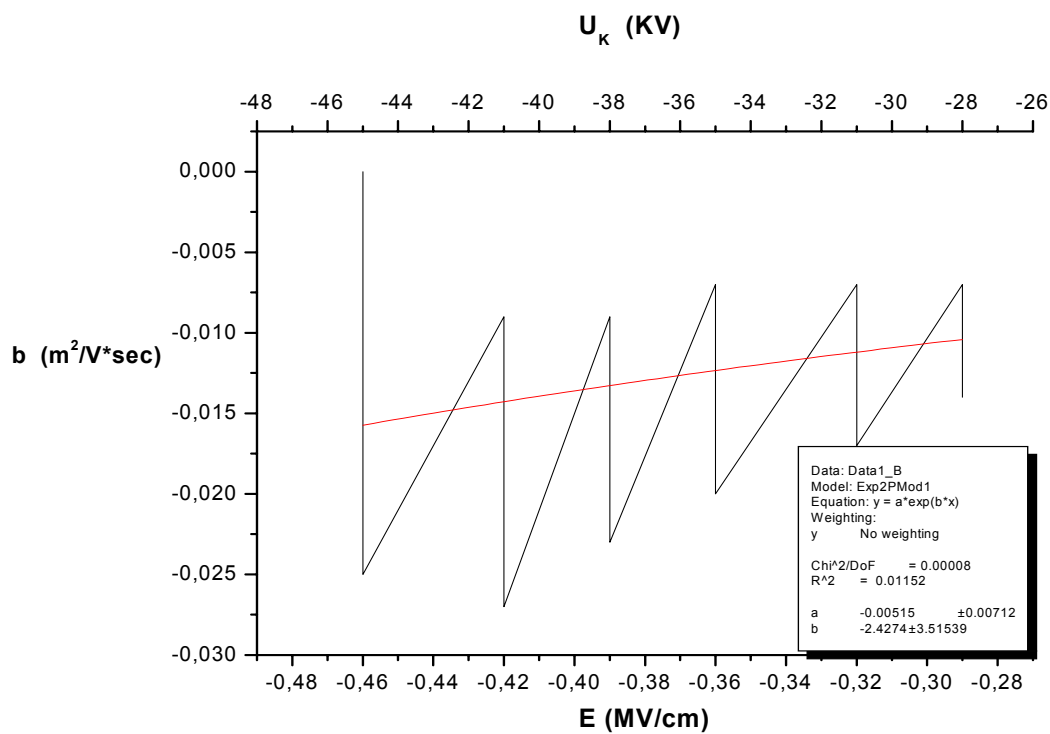


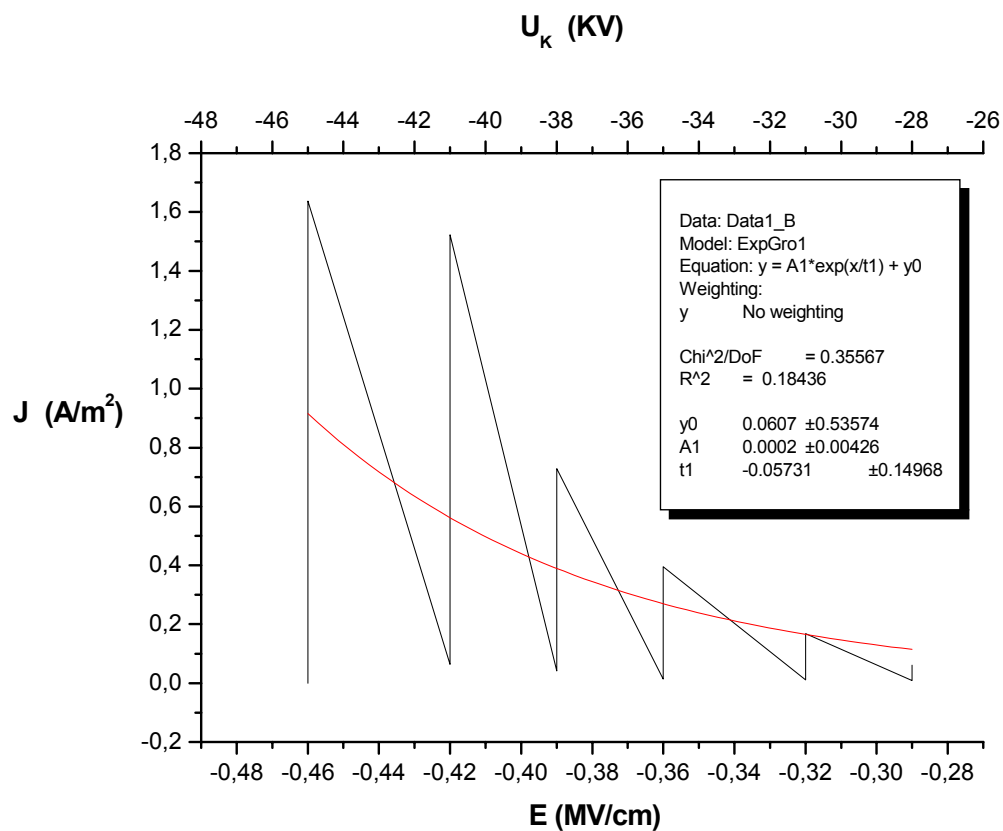
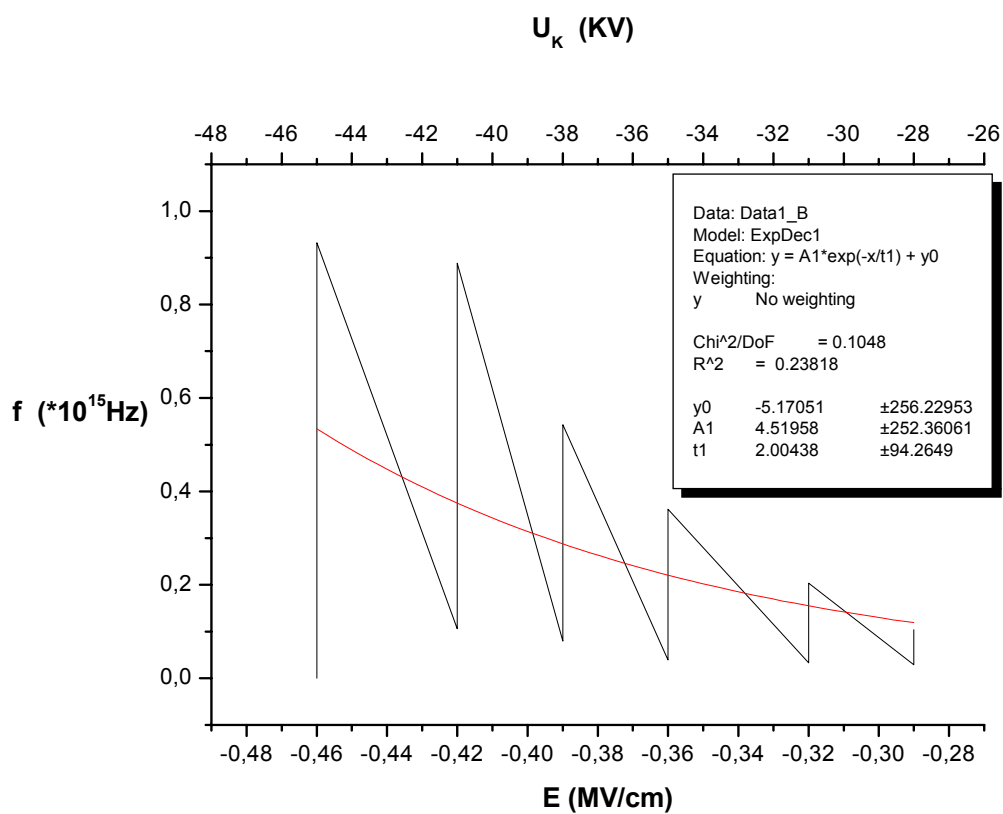


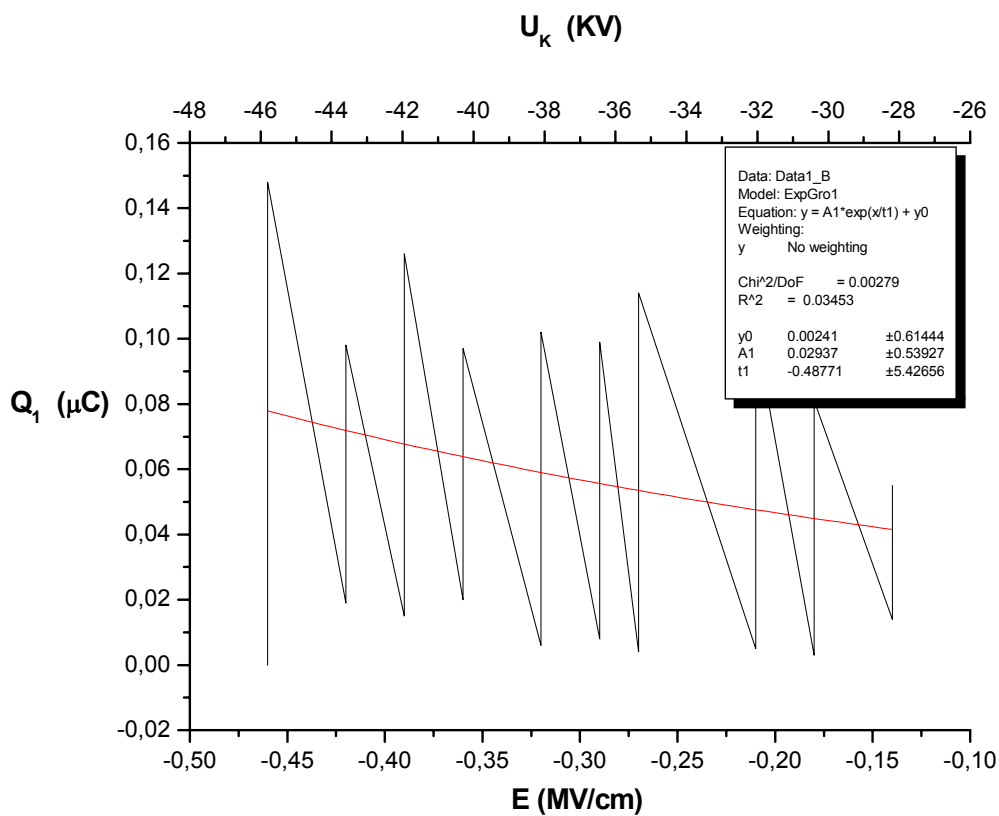
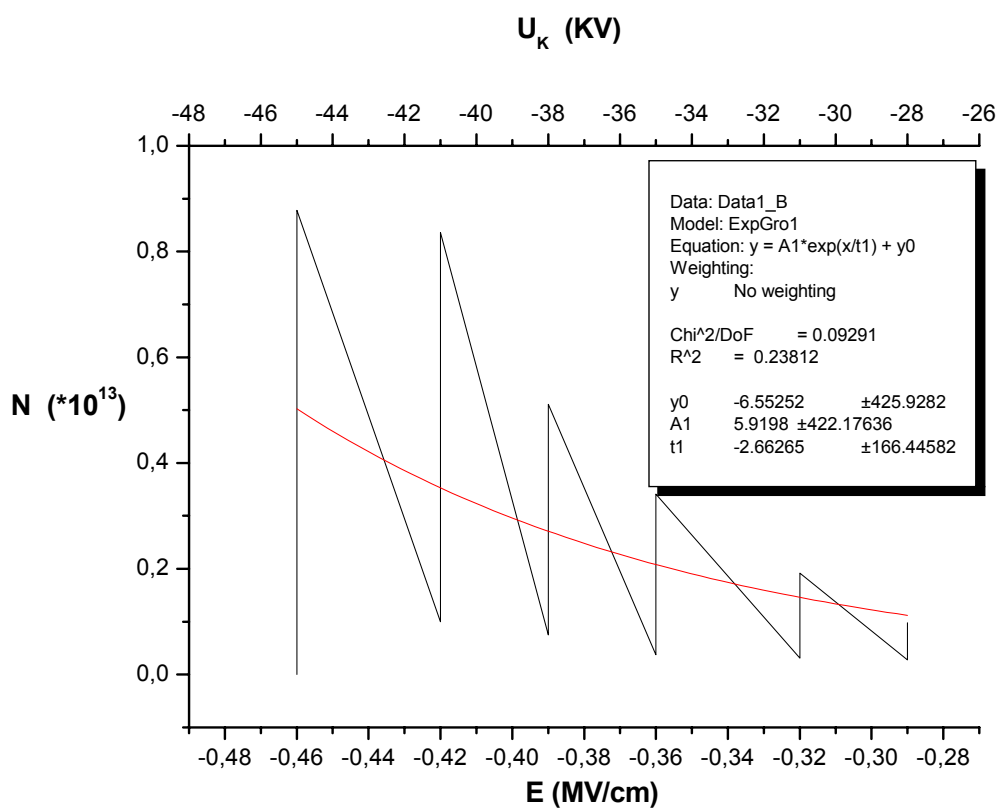




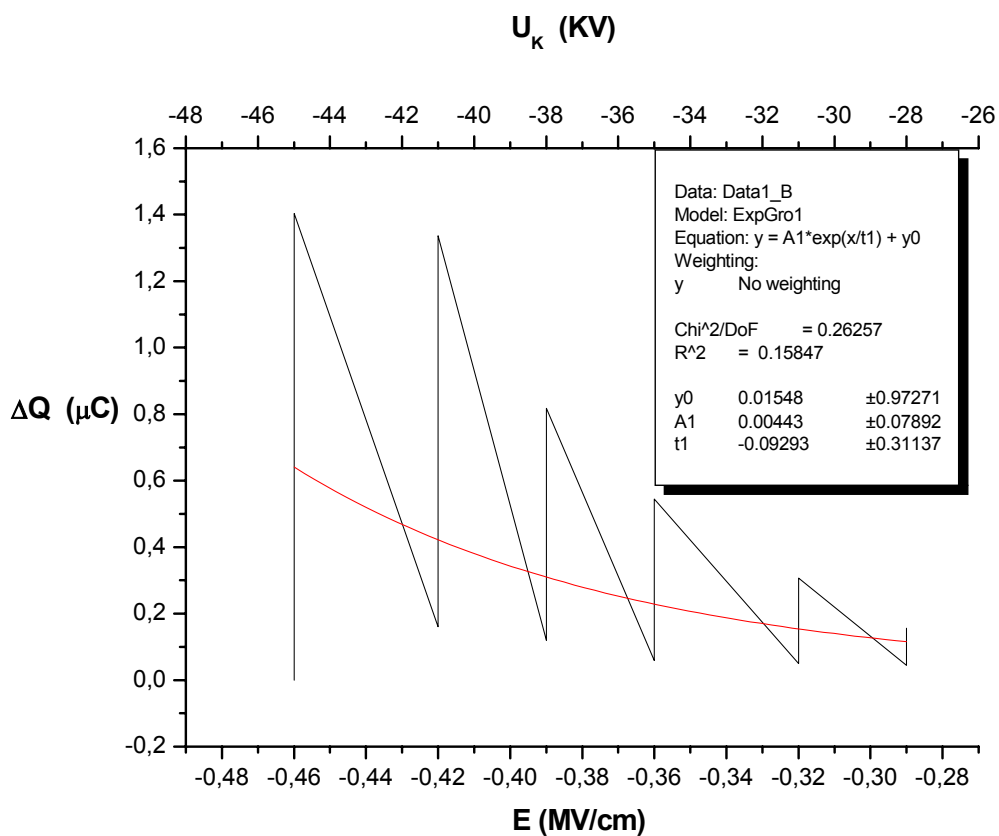
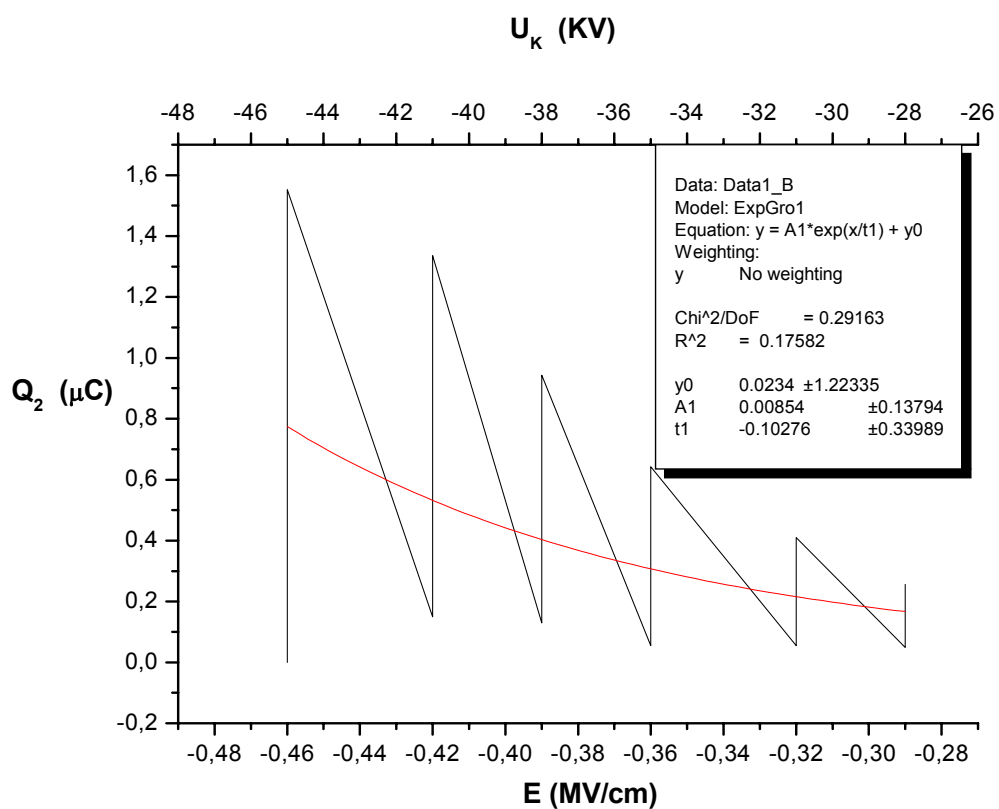
Αρνητική πολικότητα  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 40^\circ\text{C}$

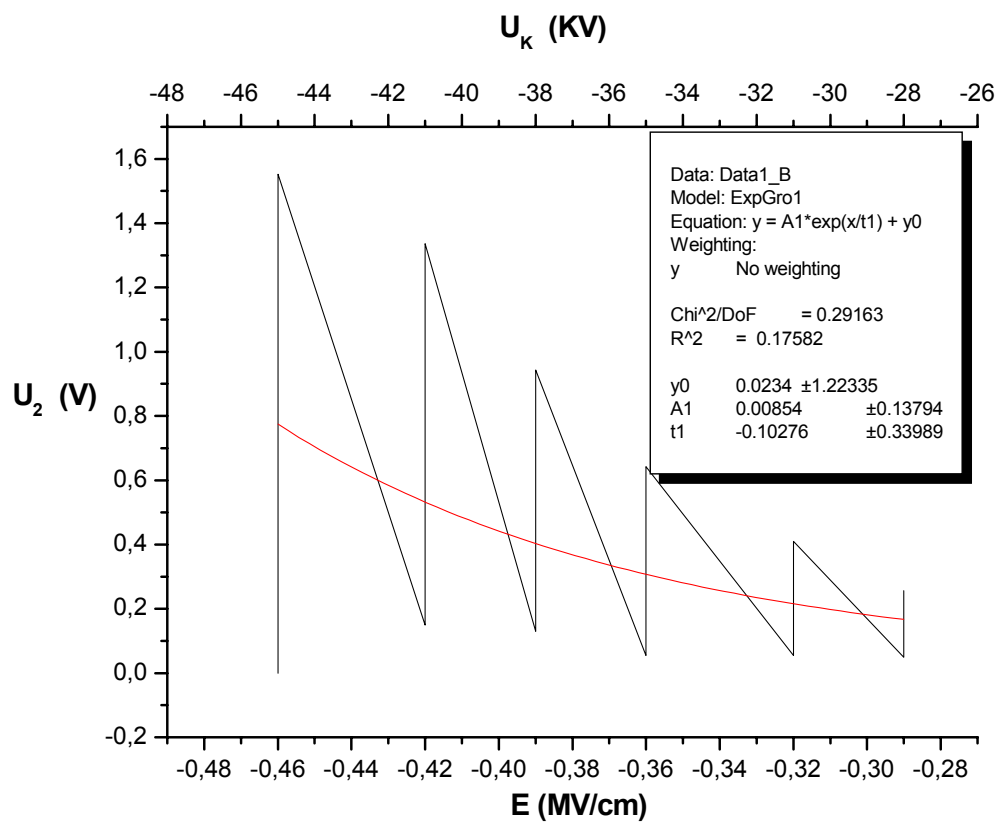
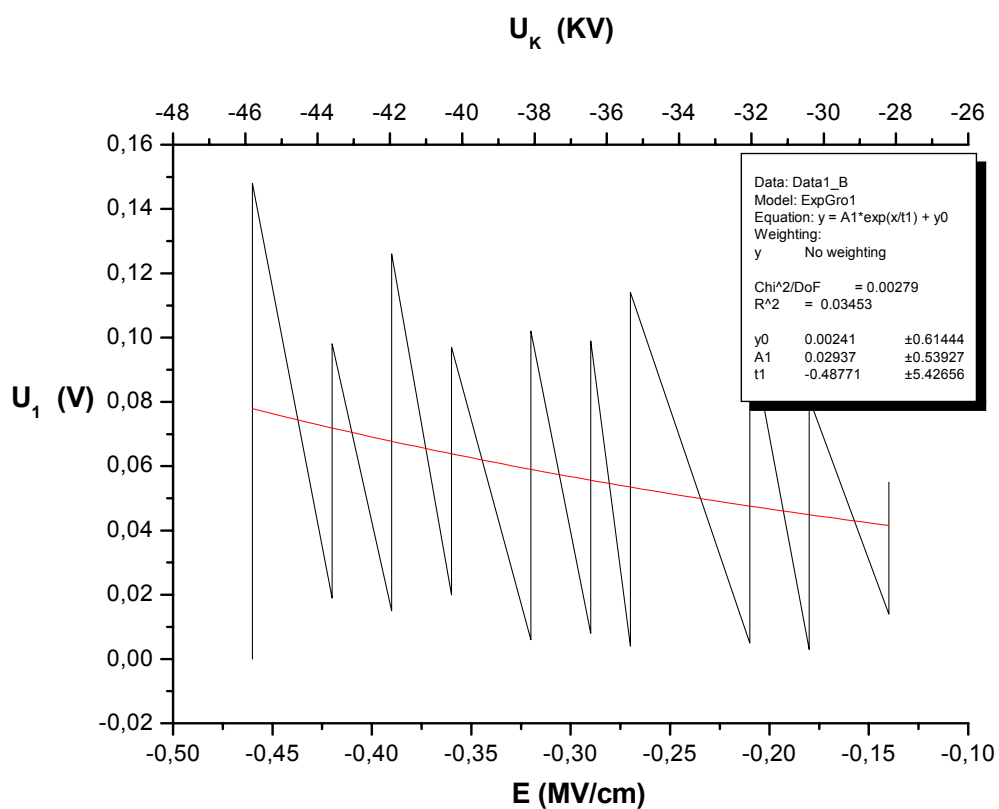


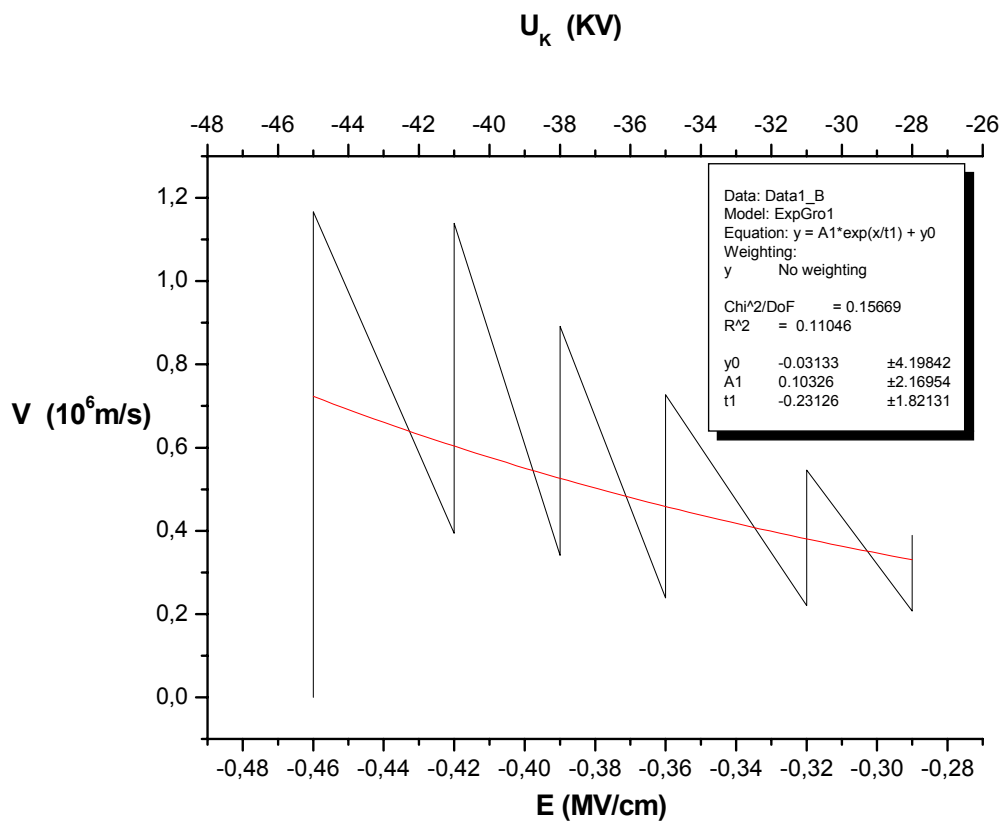
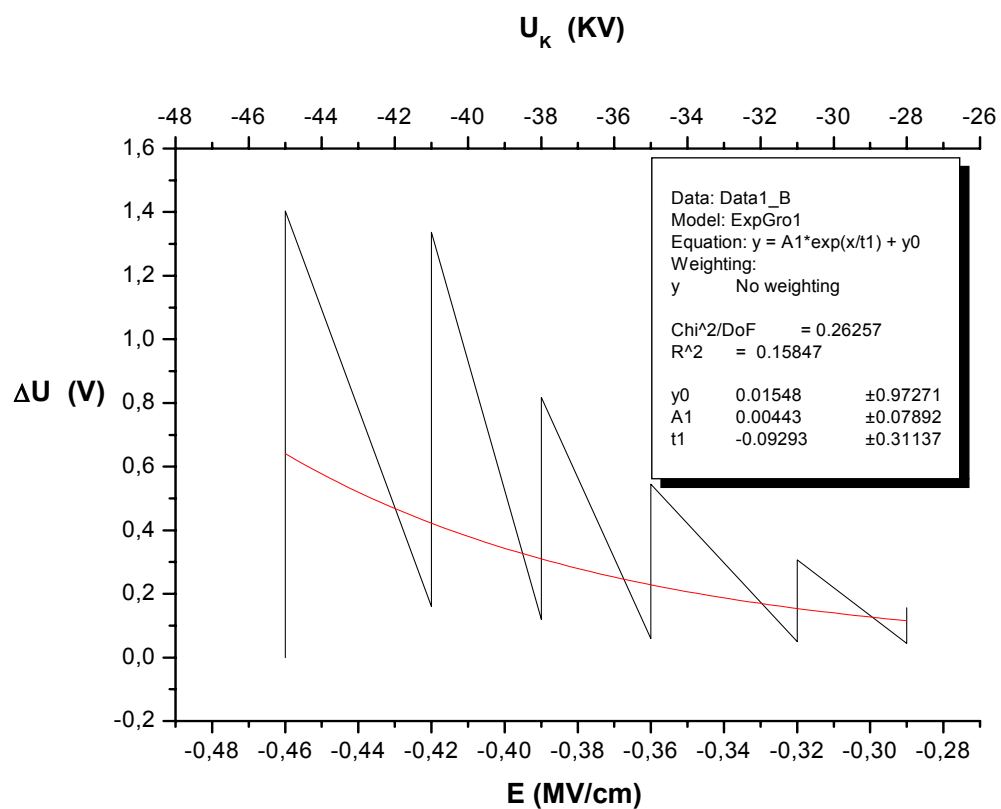


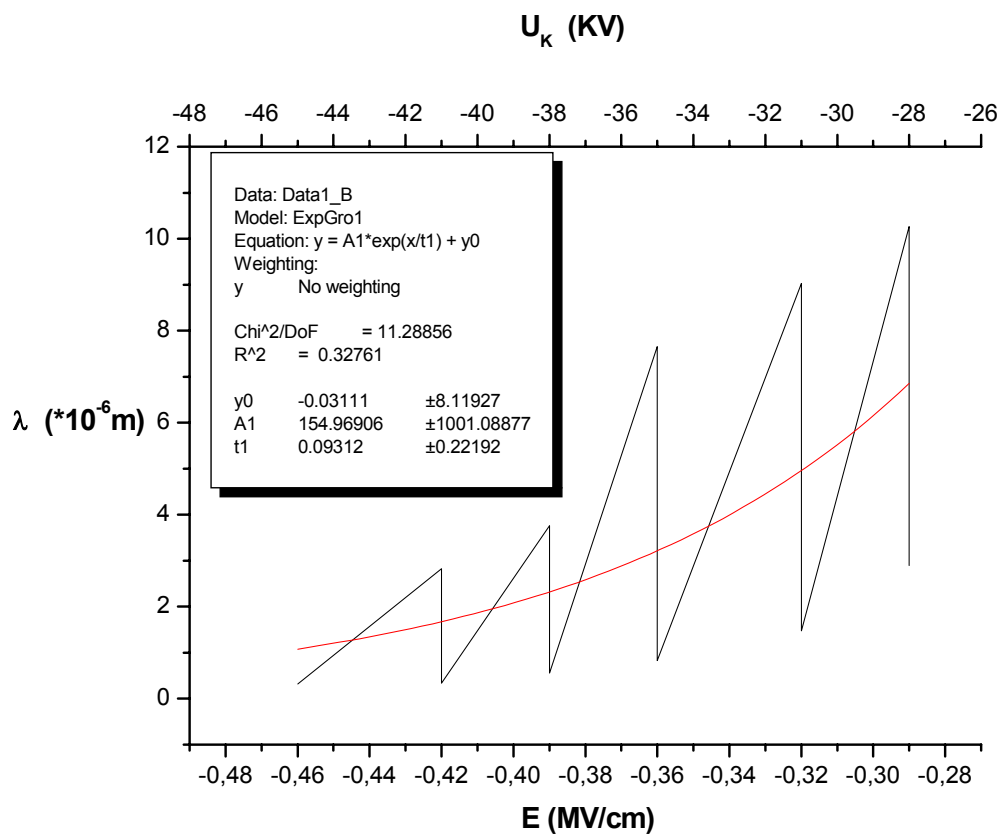
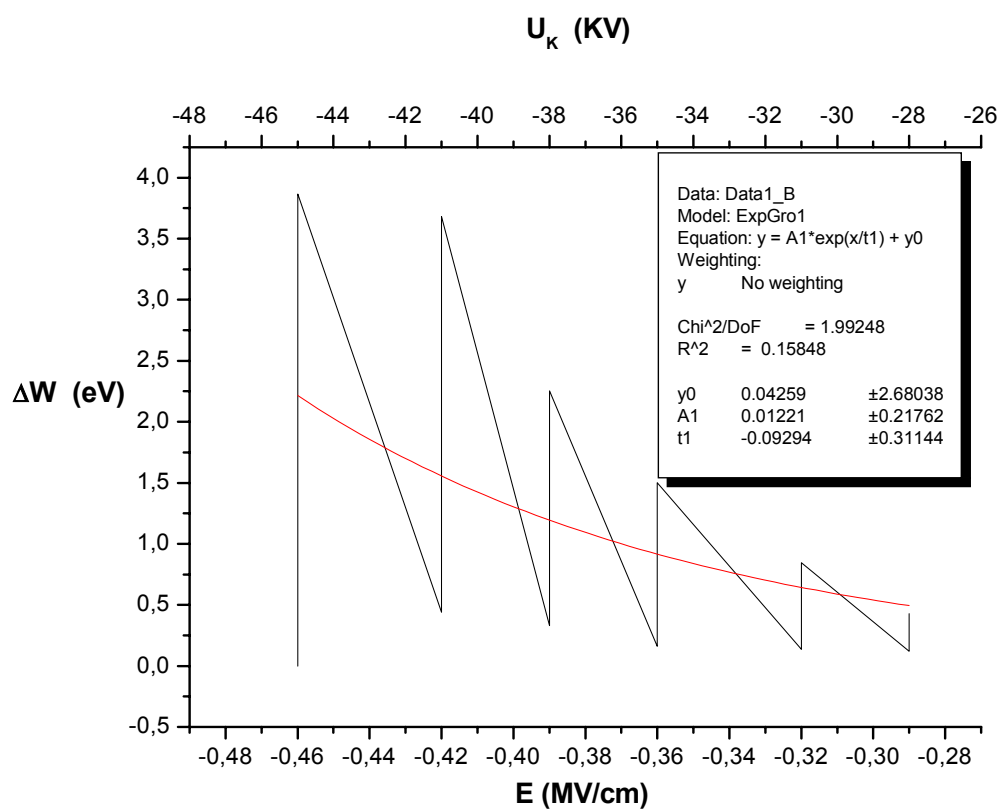


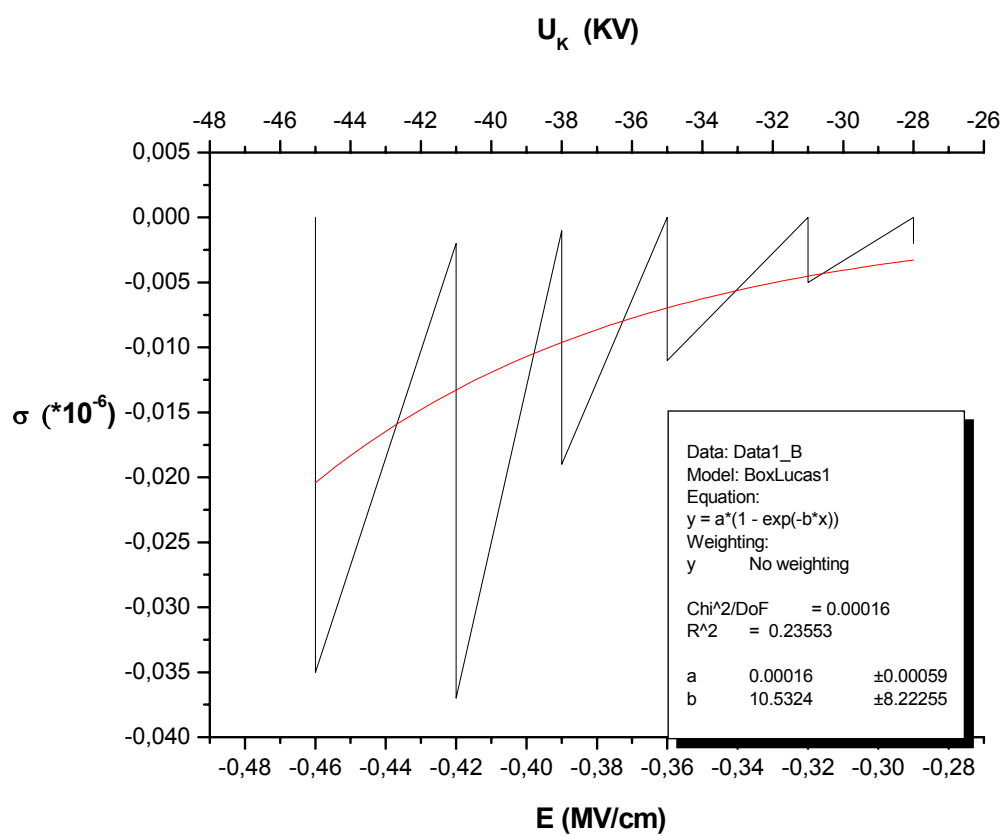




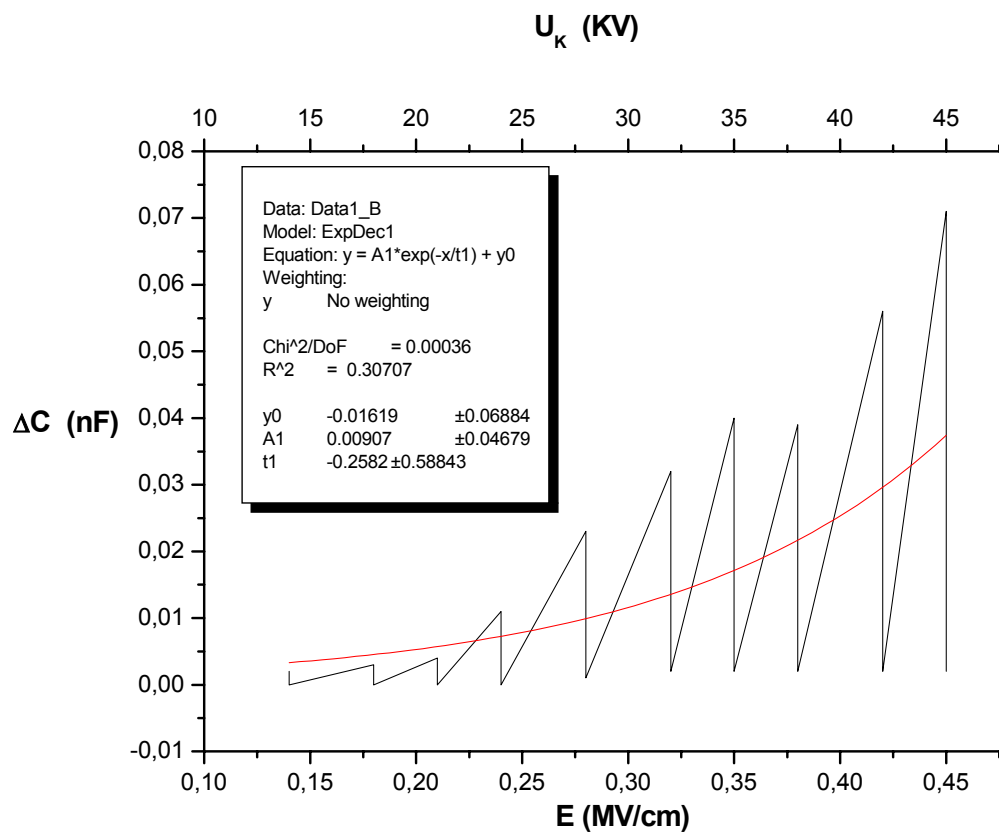
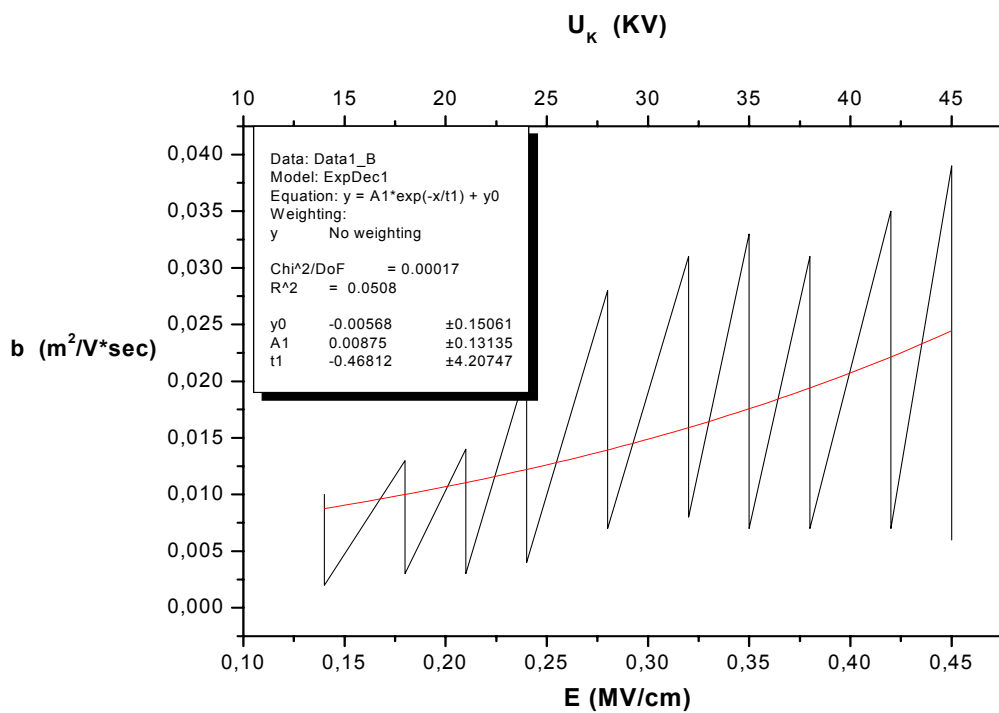


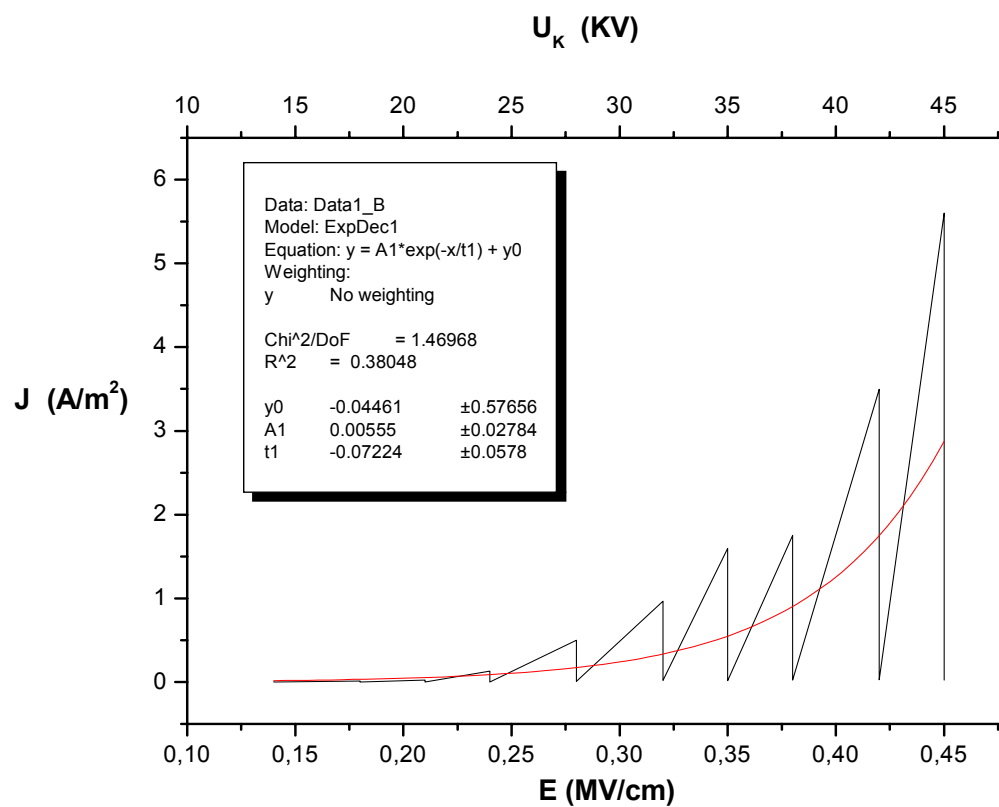
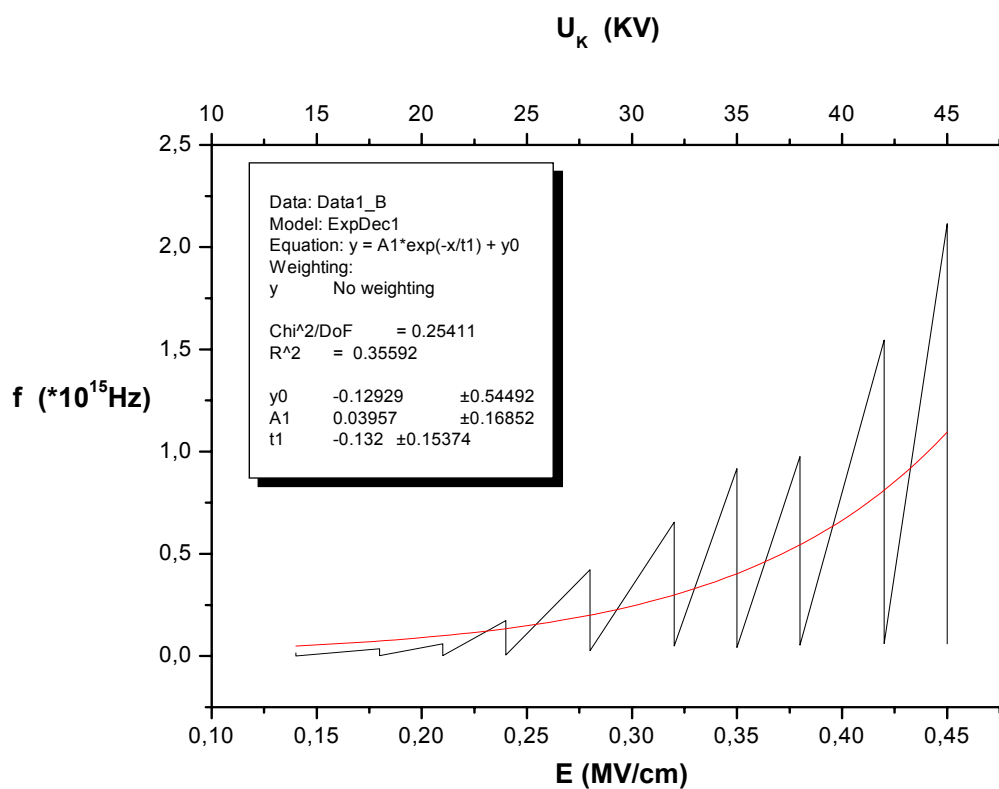


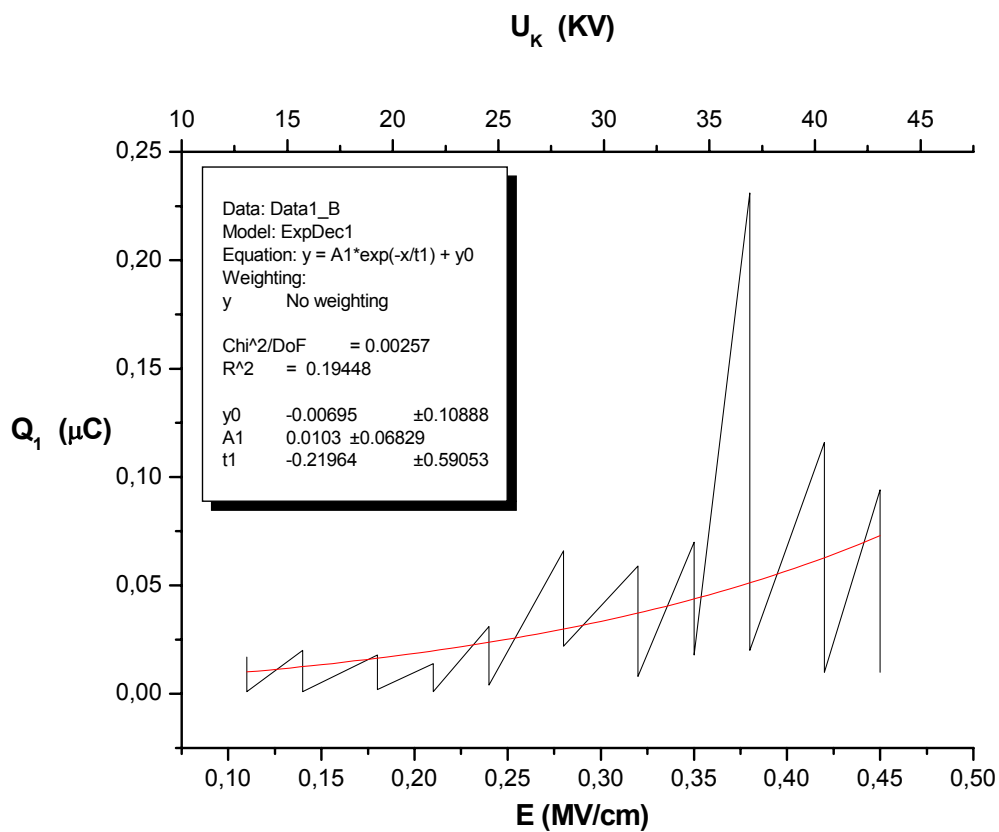
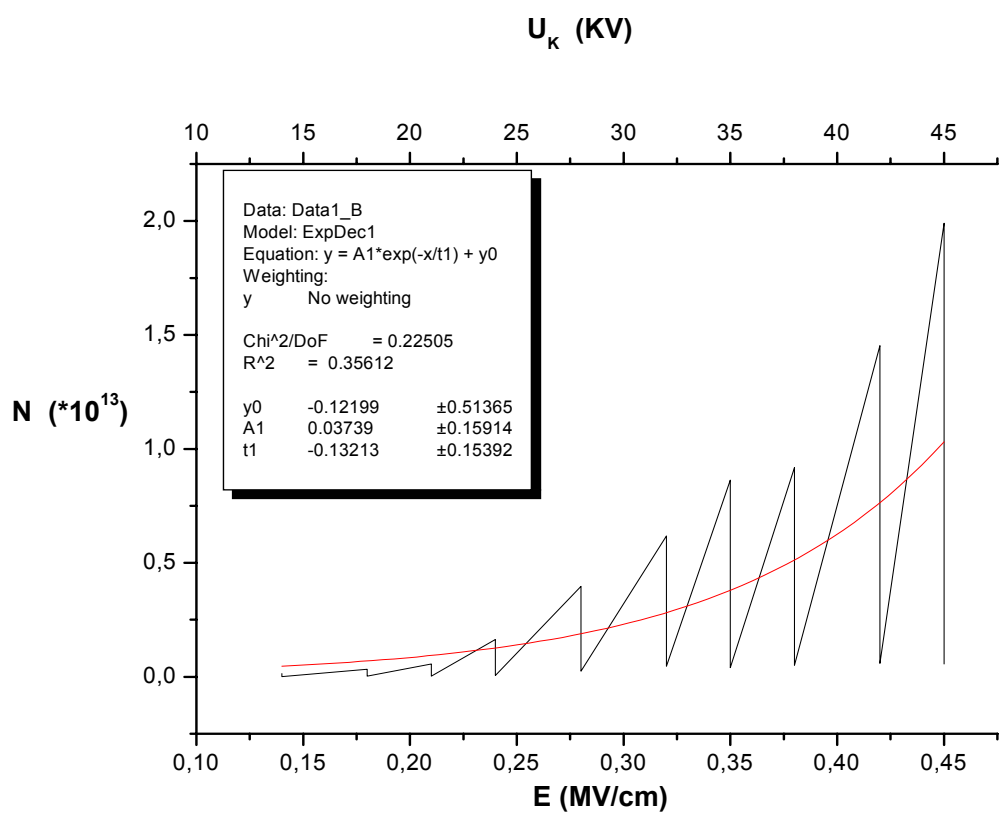




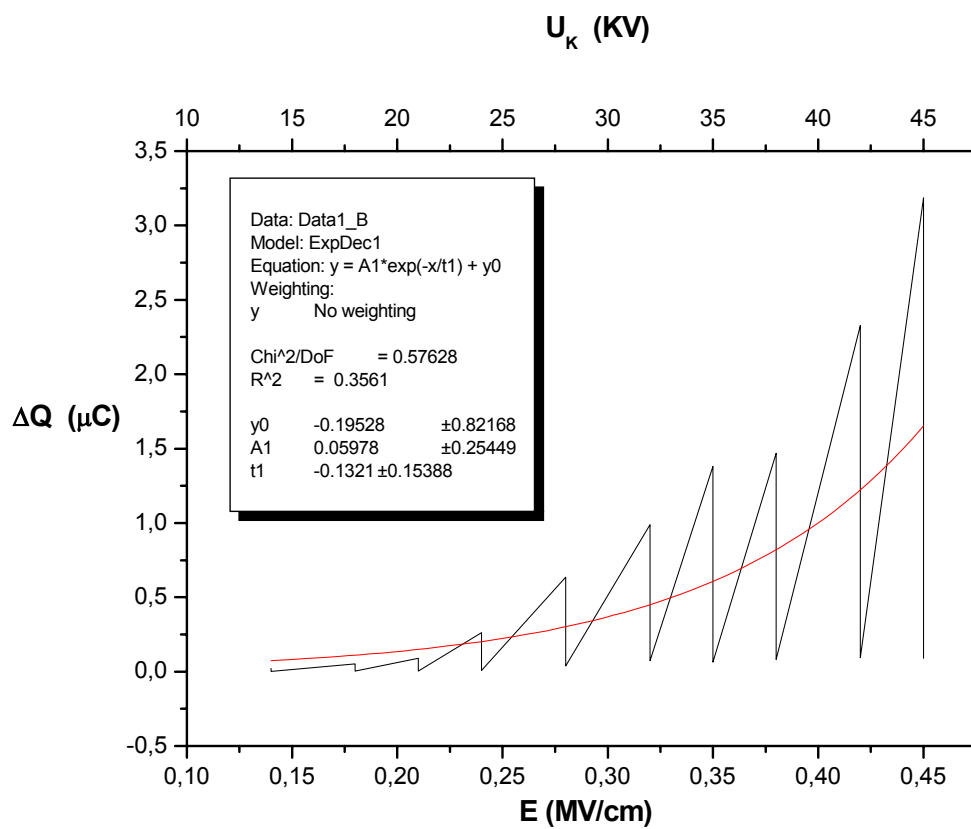
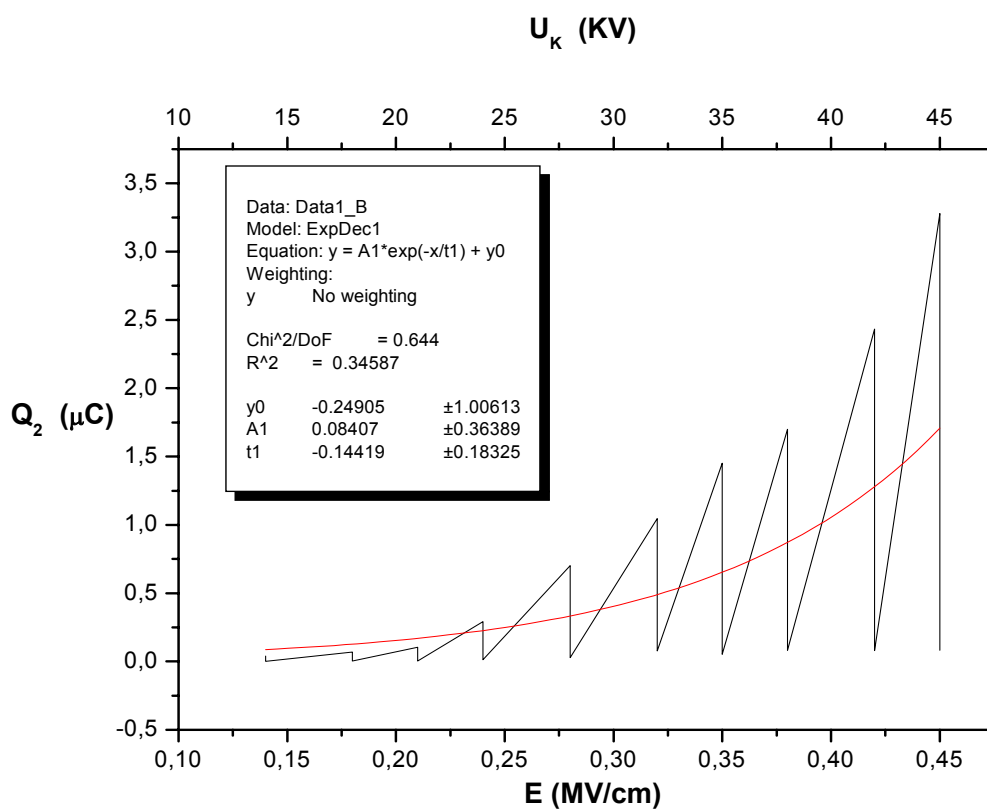
Θετική πολικότητα  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 80^\circ\text{C}$

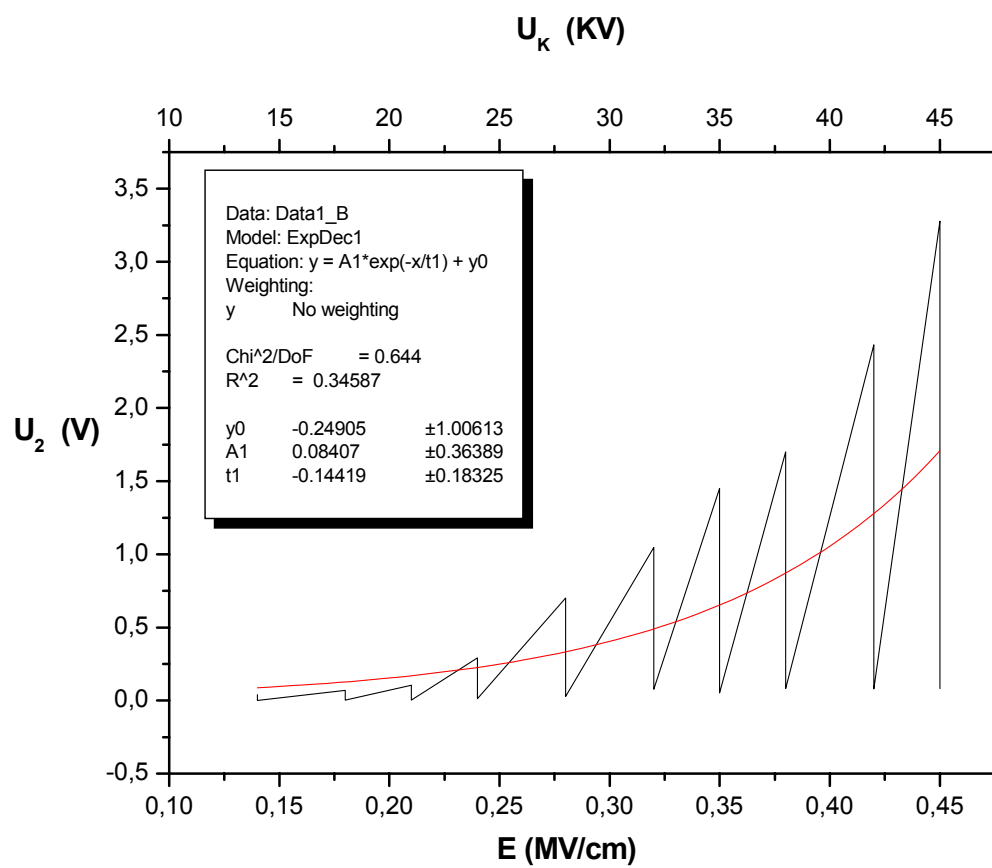
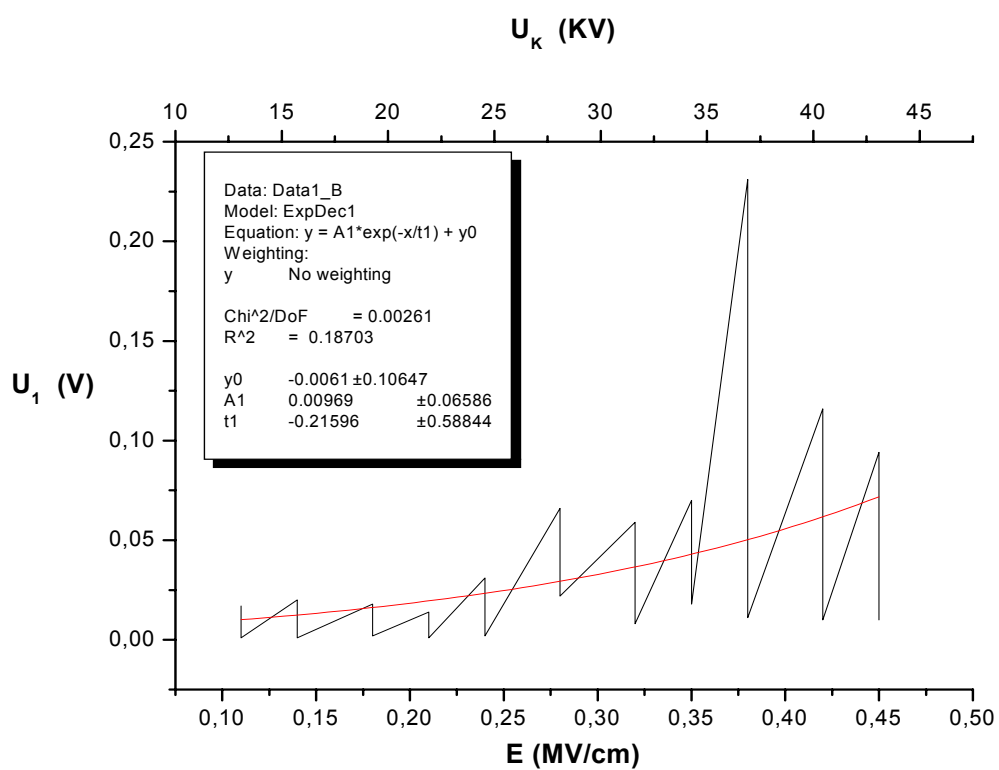


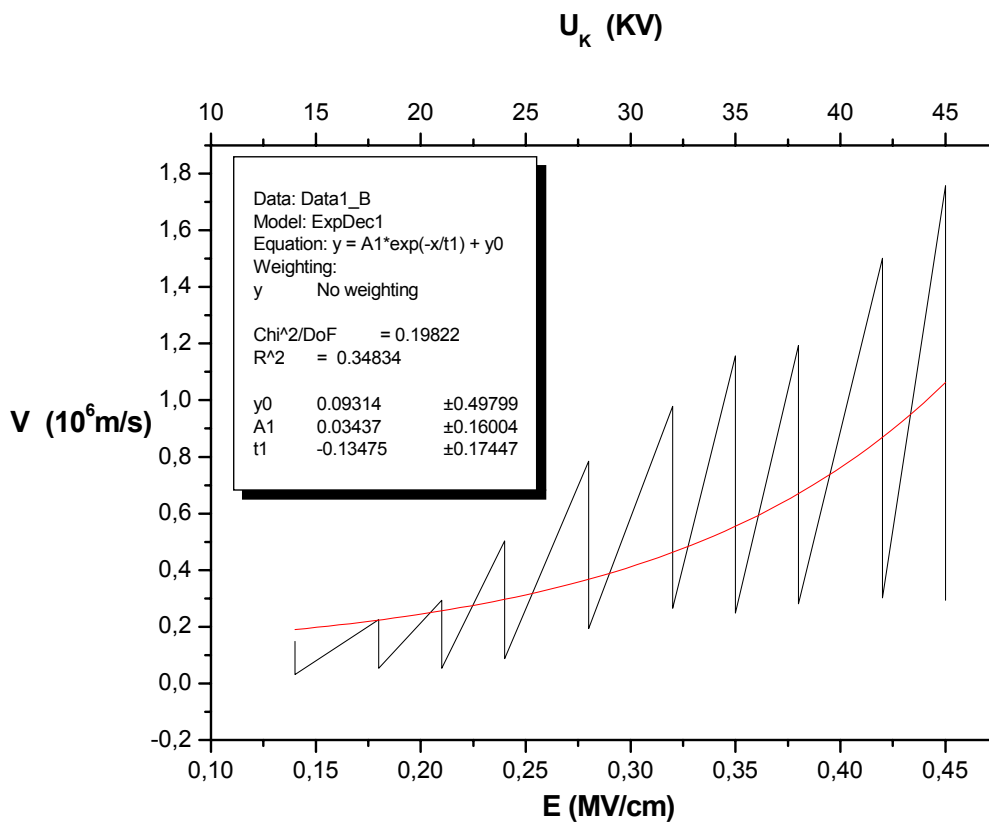
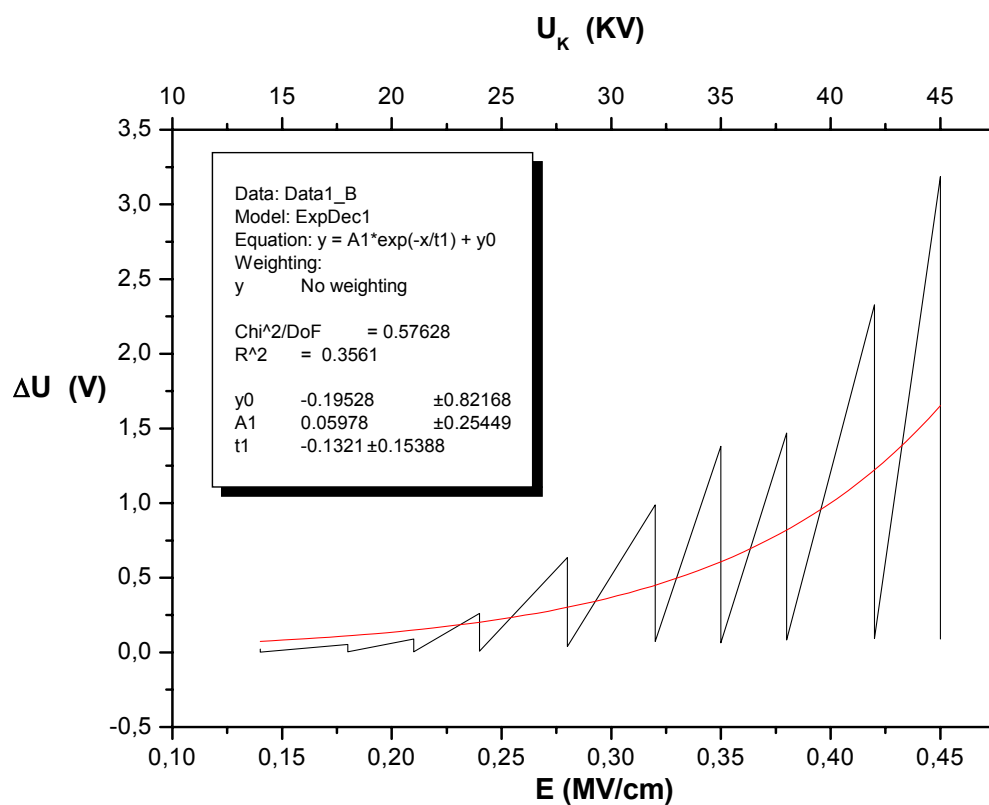


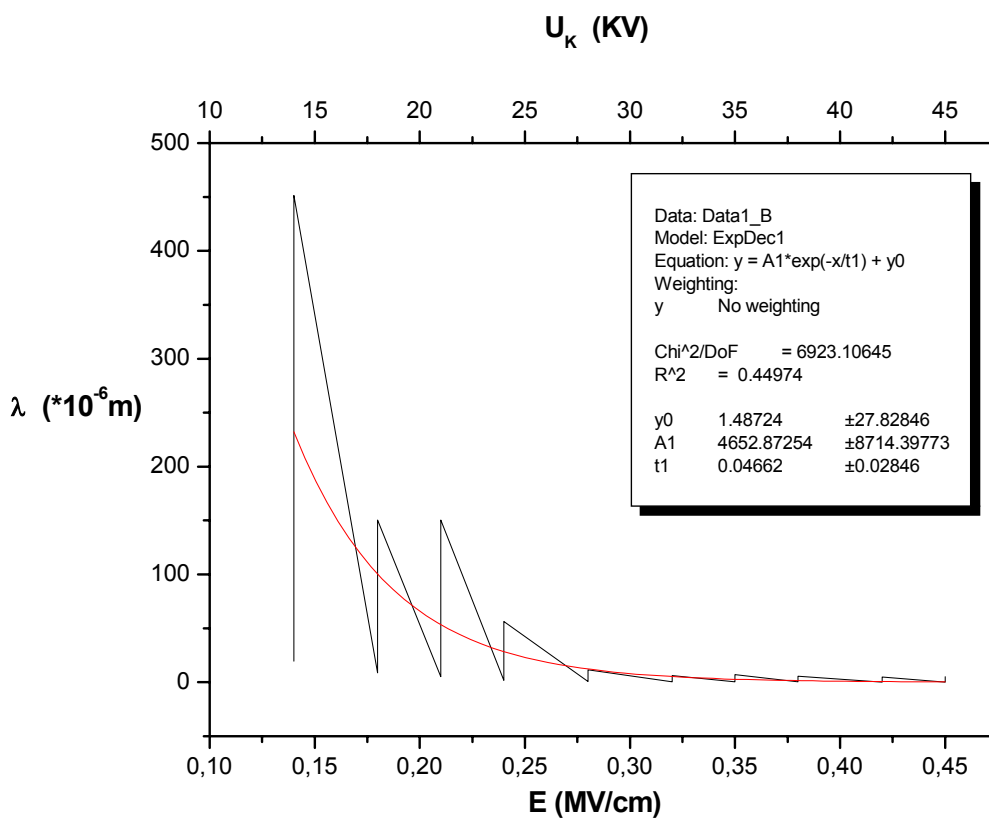
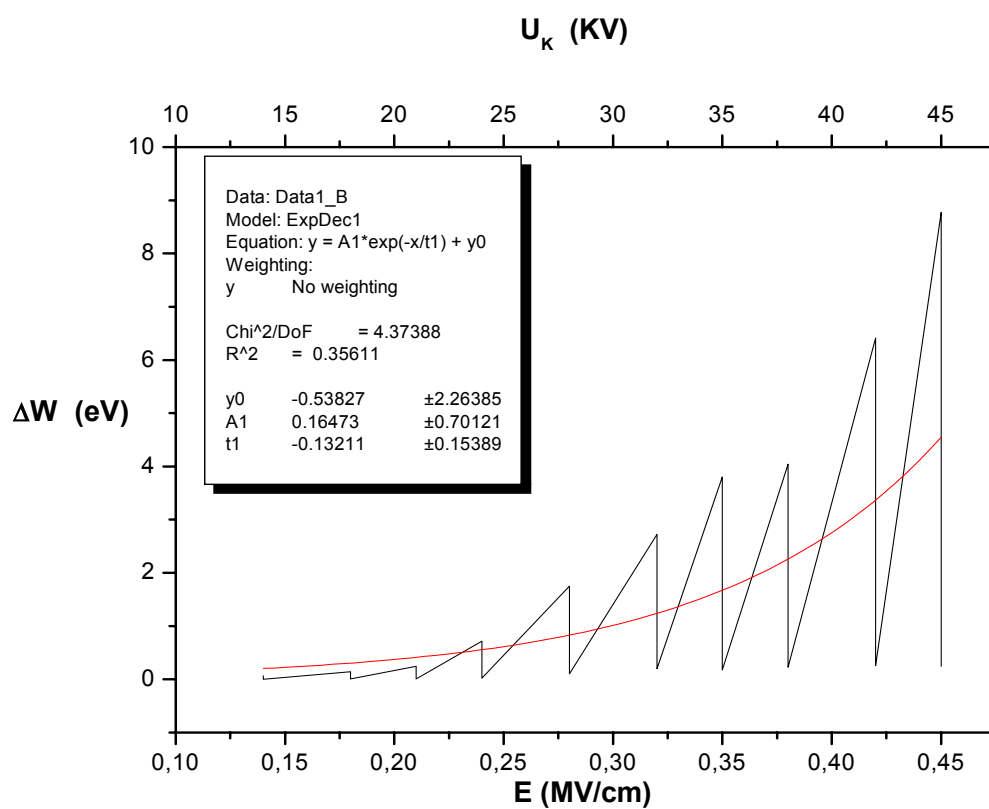


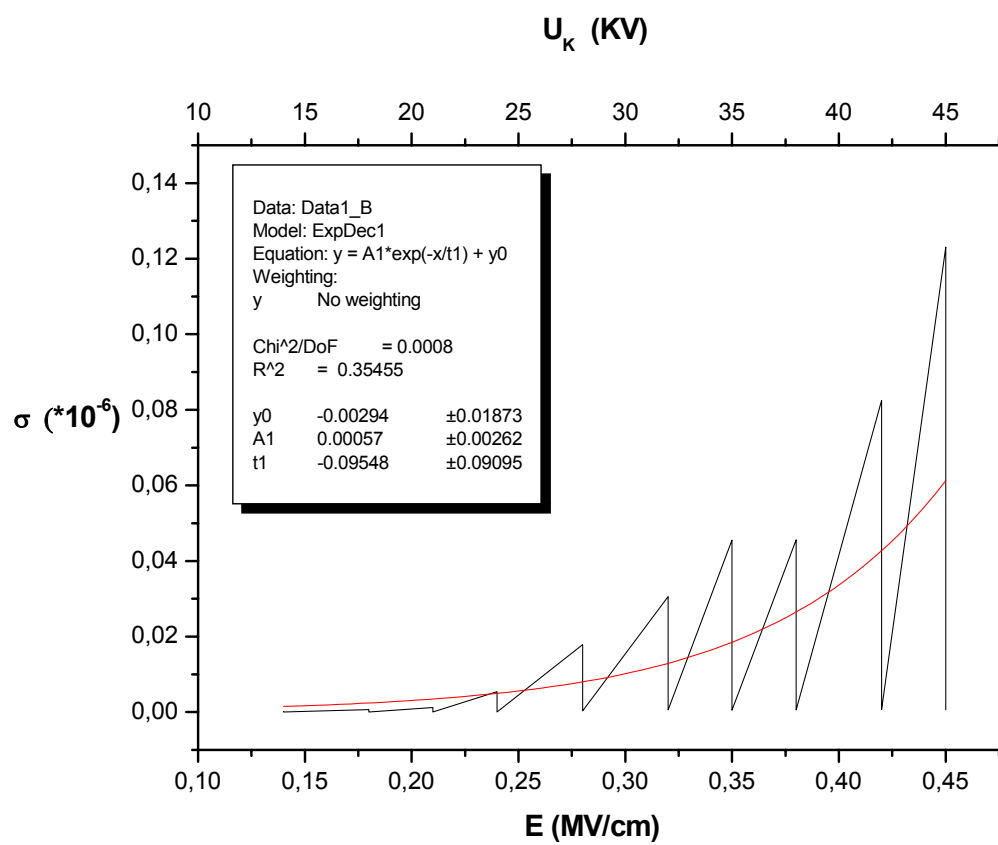




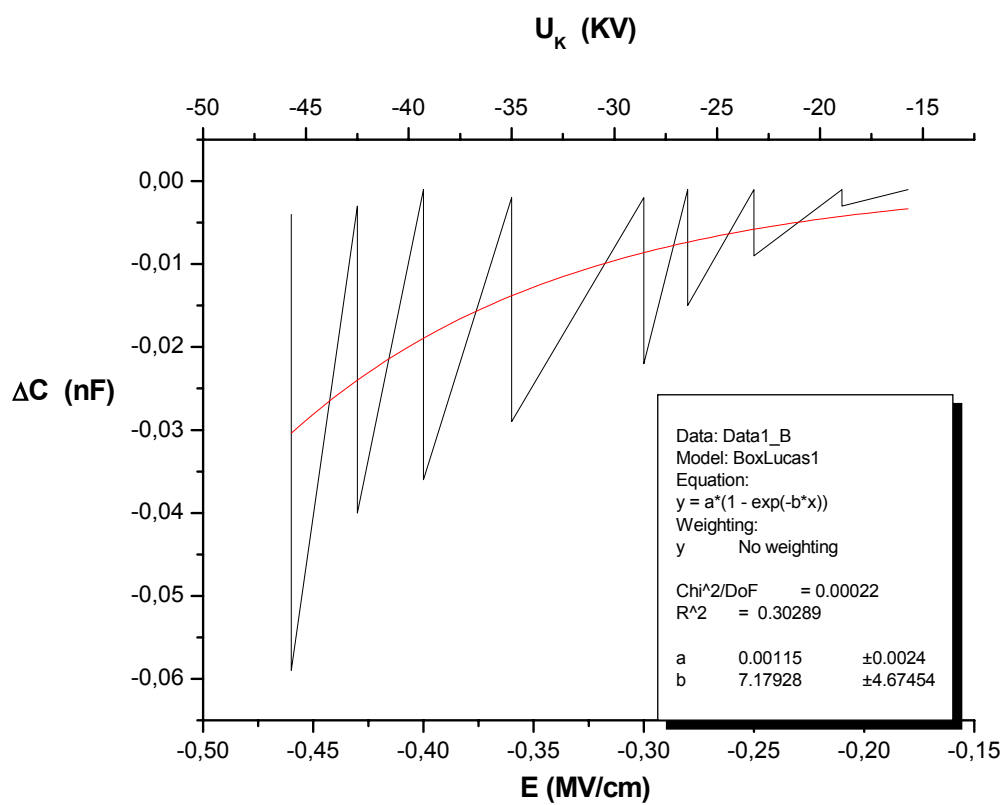
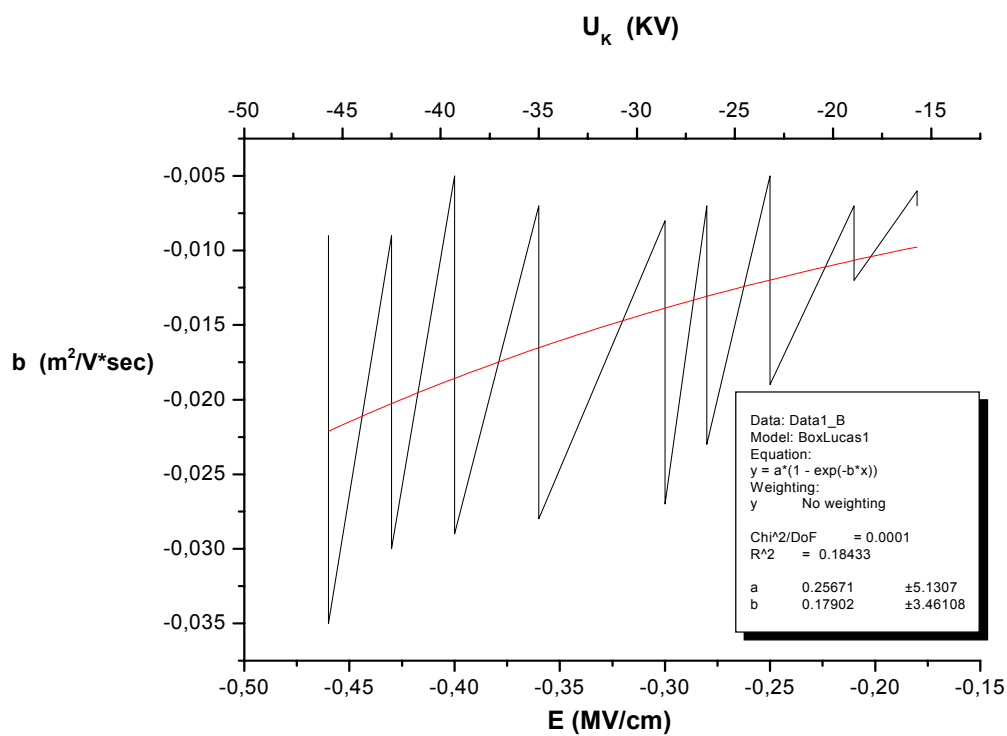


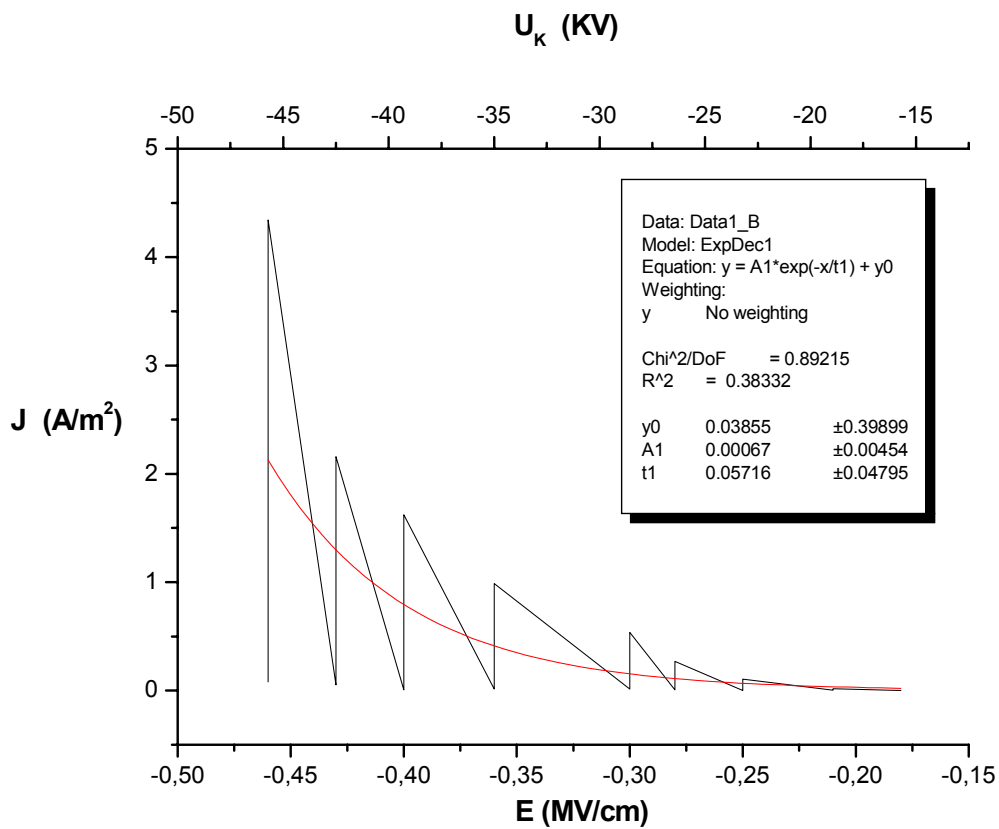
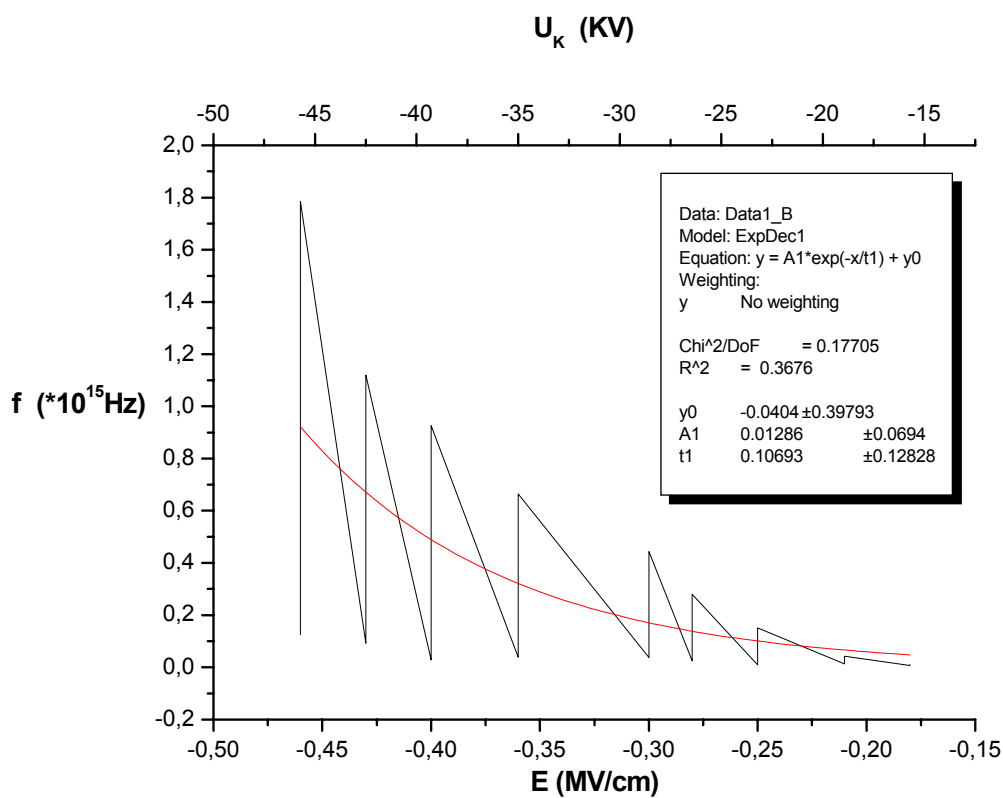


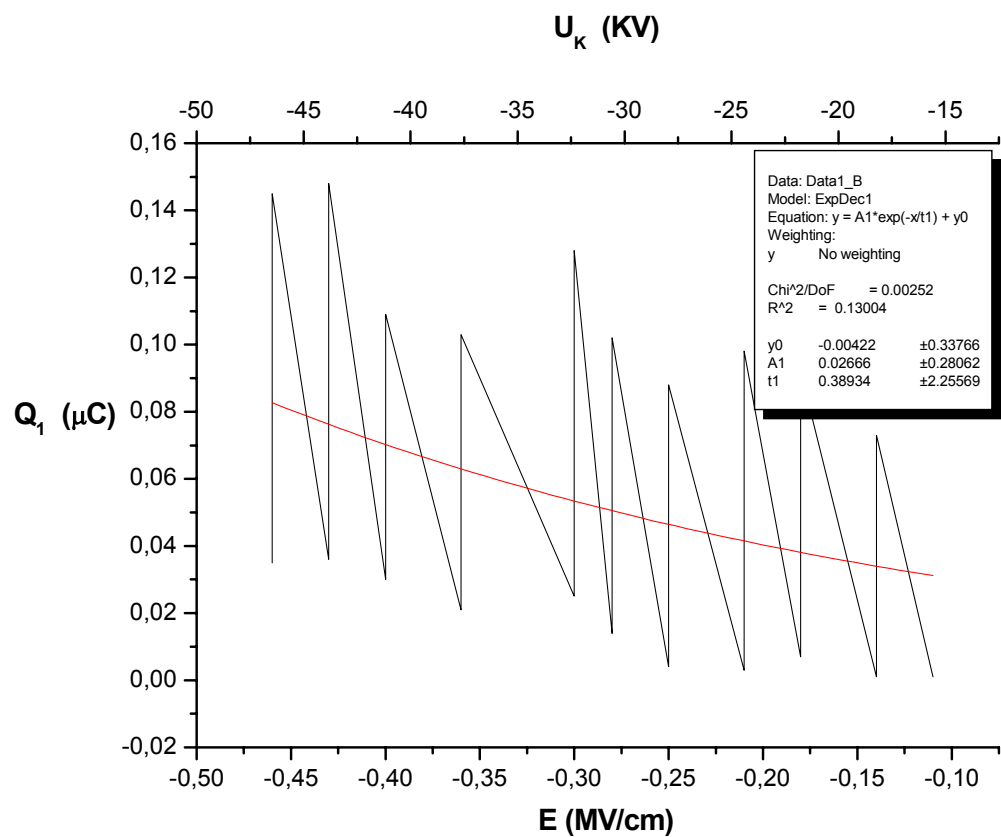
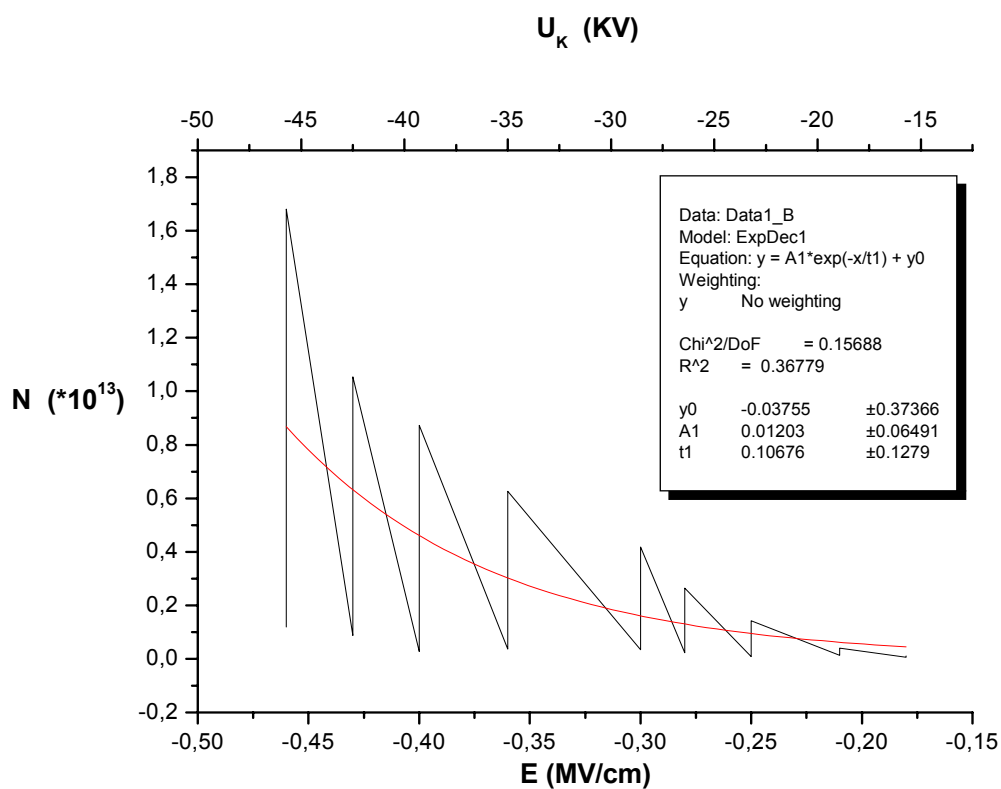




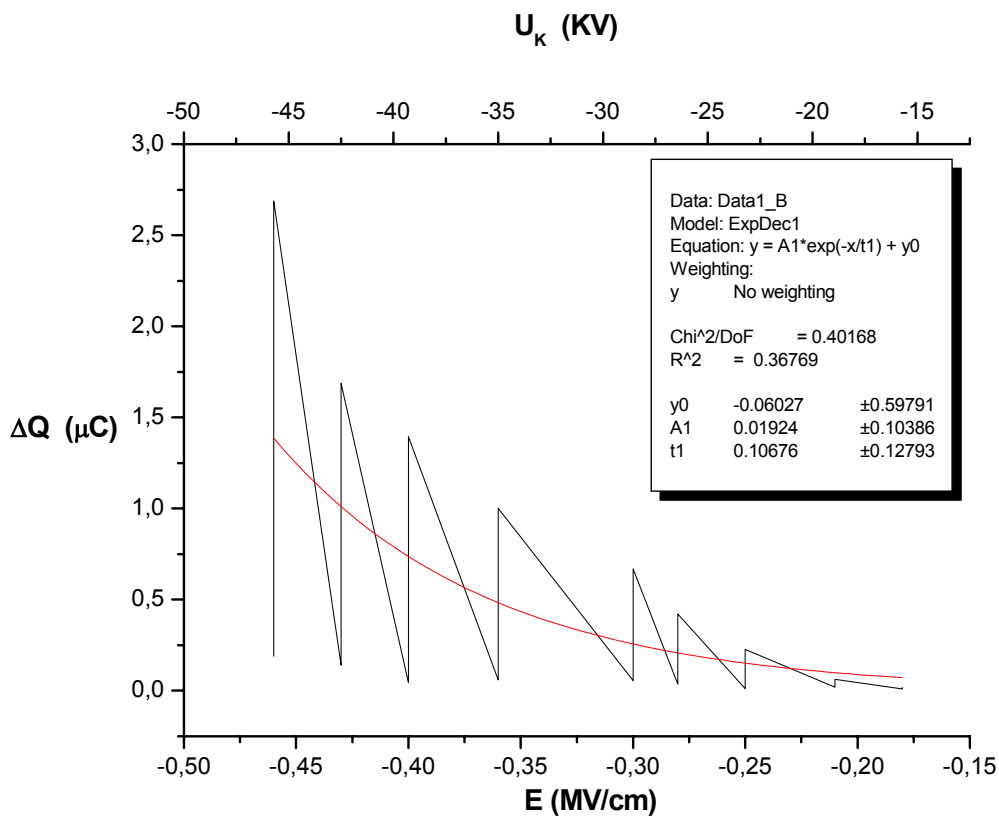
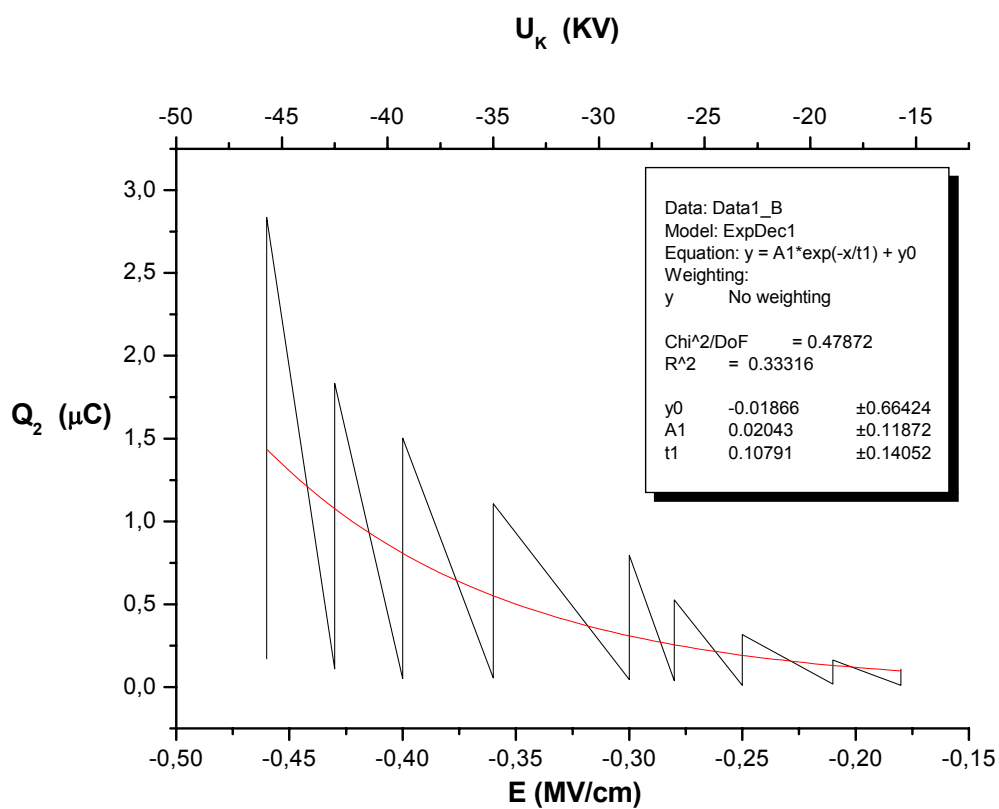
Αρνητική πολικότητα  $d = 2 \text{ mm}$   $\theta = 80^\circ\text{C}$

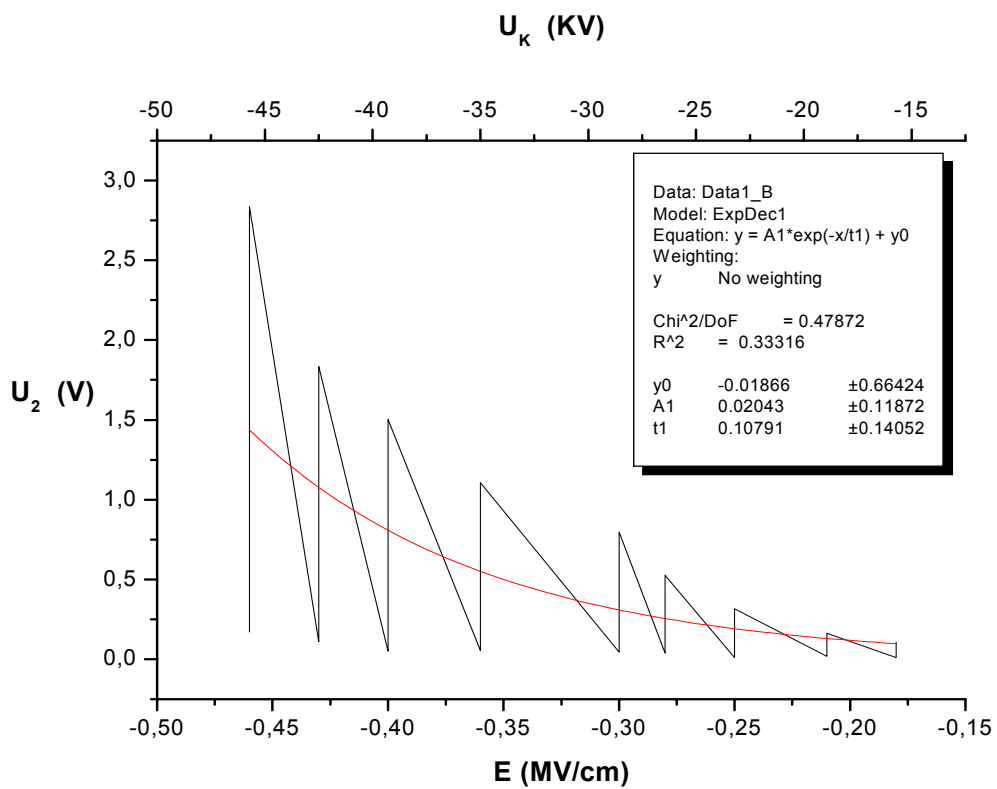
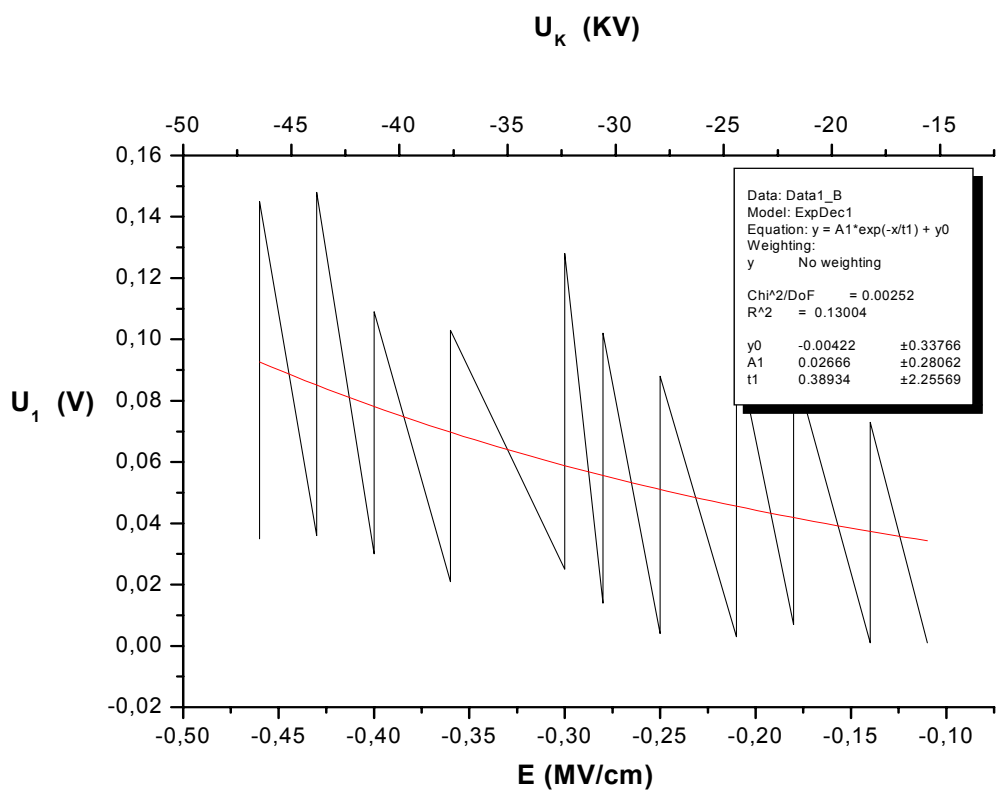


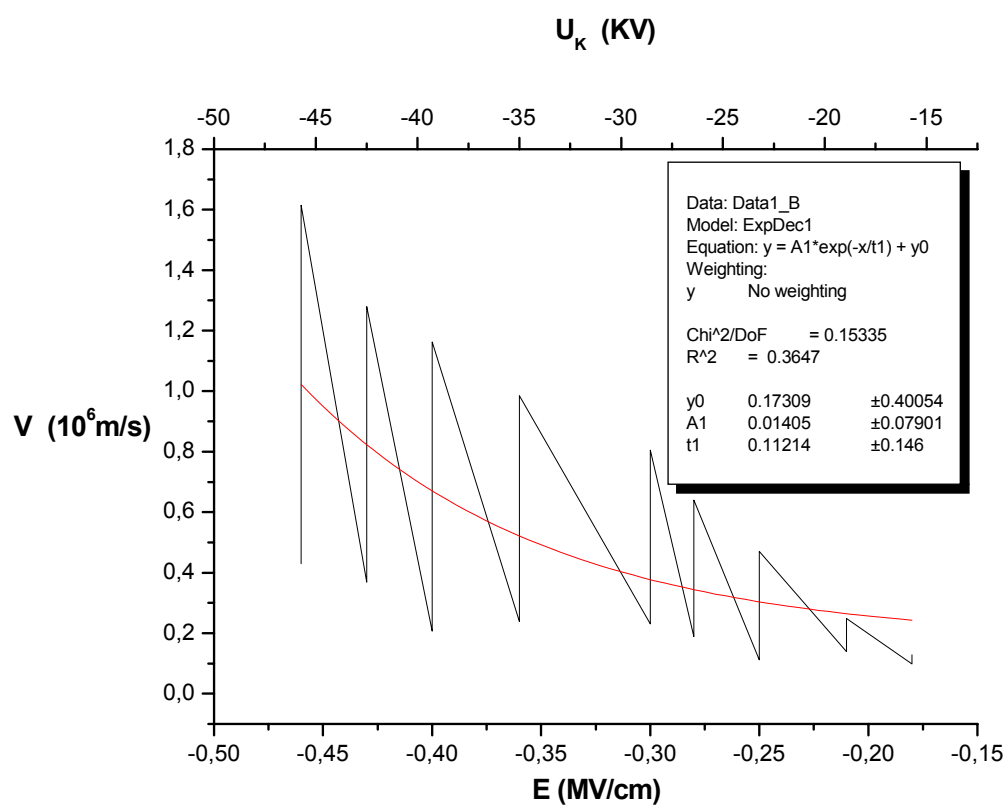
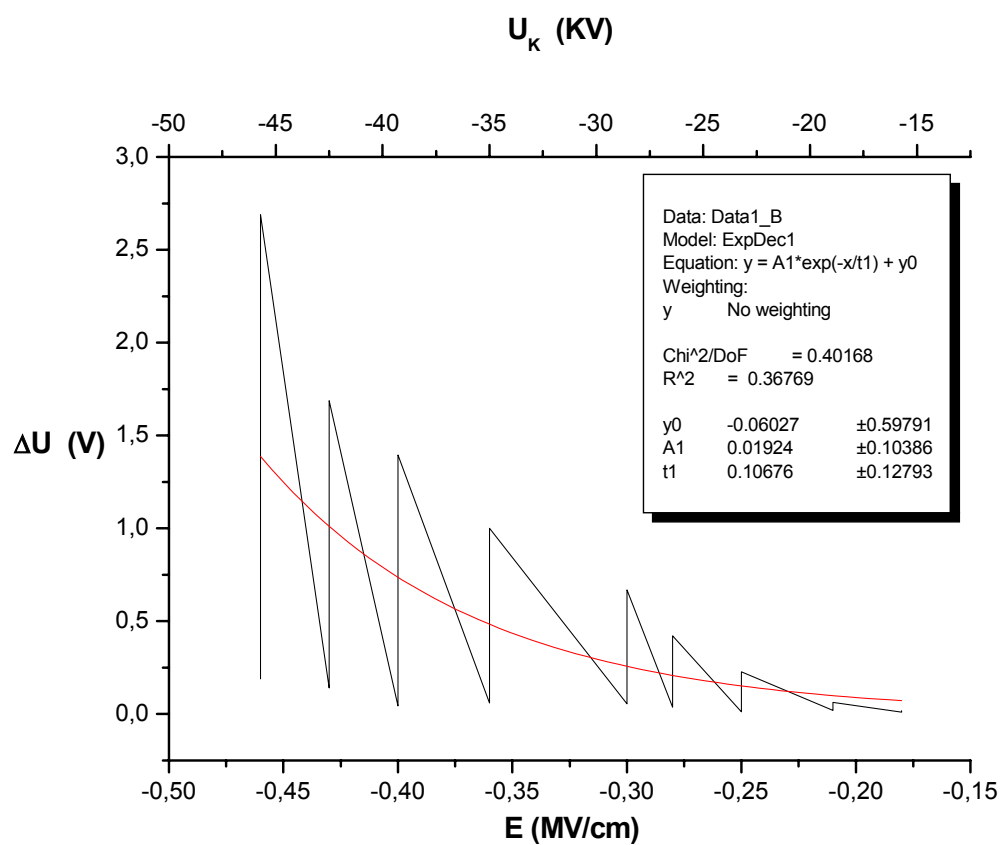


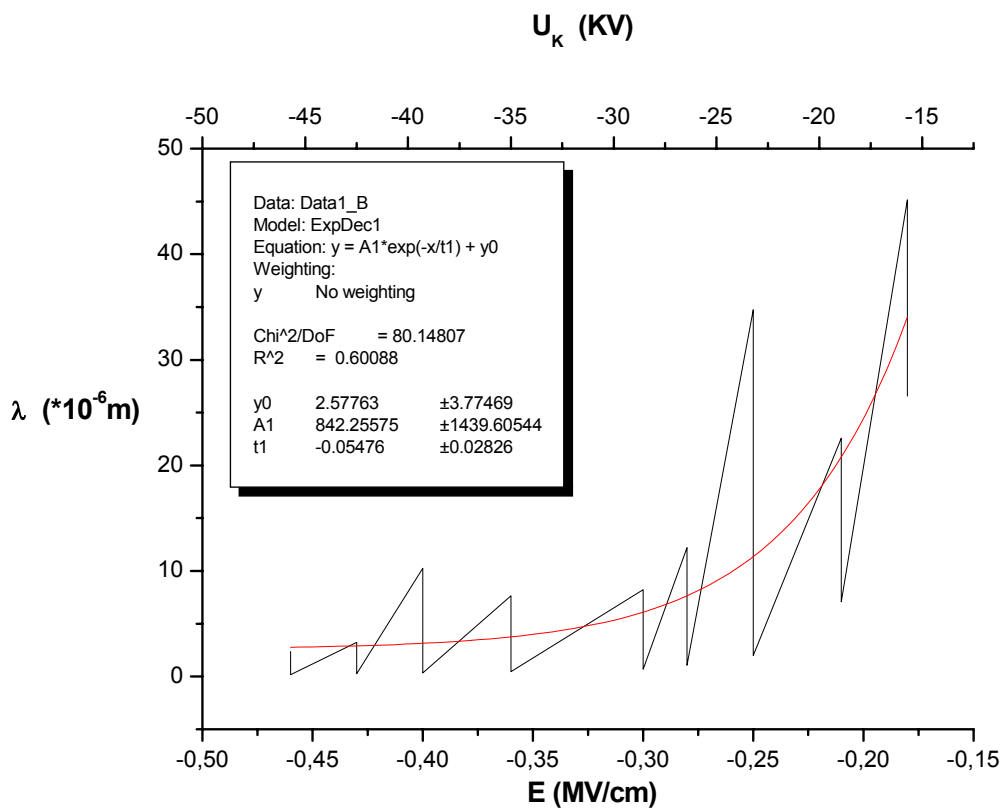
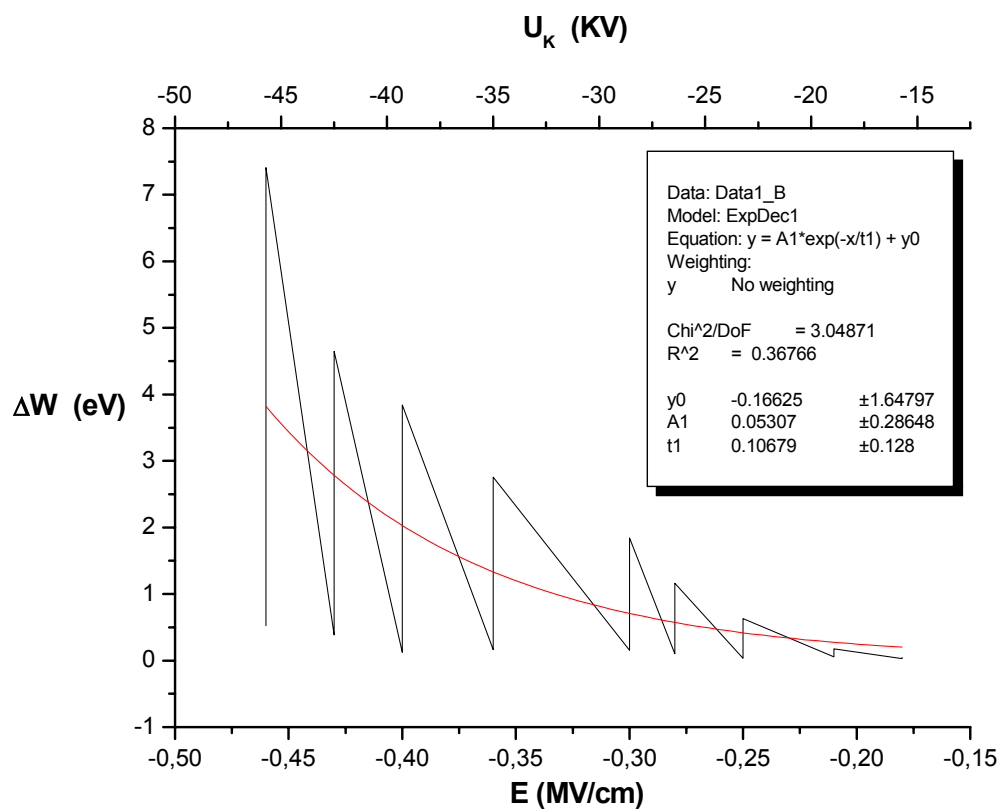


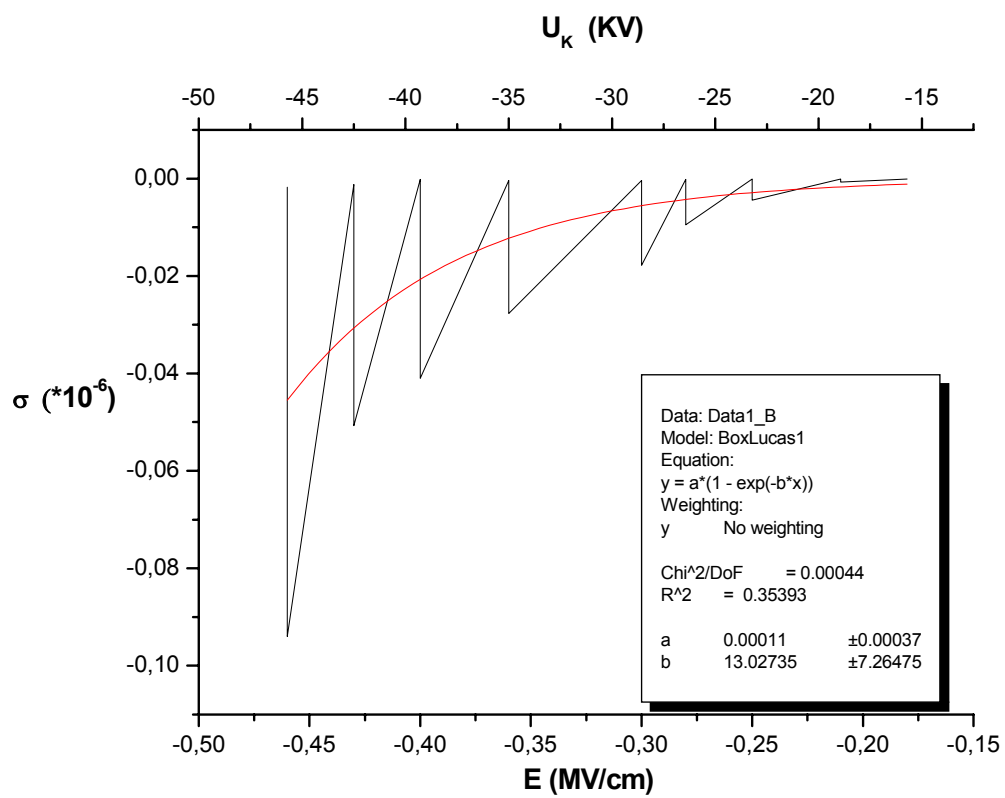












## 6.9 Συμπεράσματα - Σχόλια

Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας γίνεται προσέγγιση των καμπυλών από μαθηματικής πλευράς. Στα σχήματα φαίνονται οι πραγματικές καμπύλες, οι προσεγγιστικές καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι για ορισμένες καμπύλες η προσέγγιση ίσως αποδίδεται καλύτερα με πολυωνυμική ή άλλη συνάρτηση. Όμως επειδή σύμφωνα με την παρούσα βιβλιογραφία (κυρίως Μπούρκας) τα φαινόμενα πριν και κατά την διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών αποδίδονται κατά κύριο λόγο στον ιονισμό με κρούσεις, έγινε εκθετική προσέγγιση των χαρακτηριστικών του φορτίου συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (ή του ηλεκτρικού πεδίου). Γενικά οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες ώστε :

α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στην παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών πεδίων

β) να εναρμονίζονται οι μετρήσεις με τα παραδεκτά όρια λειτουργίας του μονωτικού ελαίου των μετασχηματιστών, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη.

Οι διακυμάνσεις των μετρήσεων περί την εκθετική θεωρητική μορφή οφείλονται στην στατιστικότητα του φαινομένου επειδή το υλικό είναι ανομοιογενές. Ισχύει δηλαδή ότι το φαινόμενο εξελίσσεται κάθε φορά από θέση σε θέση του υλικού (όπου δεν είναι ακριβώς το ίδιο). Κάποιες μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης περί την εκθετική μορφή (όπως π.χ. στην σελ. 148) δείχνουν ότι το υλικό παράγαγε πολύ φορτίο και ακολούθως καταπονήθηκε μηχανικά, για να ξεκινήσει πάλι η εκδήλωση των μερικών εκκενώσεων.

Τέλος από τις καμπύλες  $\Delta Q = f(U_{ev}, E_{ev})$  και  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο δοκίμιο πάχους 2 mm τα άλματα δυναμικού που προέρχονται από τις μερικές εκκενώσεις που λαμβάνουν χώρα, δεν είναι το ίδιο έντονα με αυτά του δοκιμίου πάχους 1 mm. Αυτό προφανώς οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το δοκίμιο των 2 mm έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από το δοκίμιο πάχους 1 mm.

### **Βιβλιογραφία**

-Π.Δ. Μπούρκας-Κ.Γ. Καραγιάννης :  
«Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά» Αθήνα 2003

-Κ.Θ.Δέρβος :  
«Μονωτικά υλικά υψηλών τάσεων» Αθήνα 2006