



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μερικές Εκκενώσεις Σε Πολυμερή Ηλεκτρομονωτικά Υλικά  
Υπό Κρουστικές Τάσεις Ζεύξης Σε Θερμοκρασία  
Περιβάλλοντος 40<sup>0</sup>C και 80<sup>0</sup>C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνης Ν. Ξενιός

Επιβλέπων : Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2005





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μερικές Εκκενώσεις Σε Πολυμερή Ηλεκτρομονωτικά Υλικά  
Υπό Κρουστικές Τάσεις Ζεύξης Σε Θερμοκρασία  
Περιβάλλοντος 40<sup>0</sup>C και 80<sup>0</sup>C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνης Ν. Ξενιός

**Επιβλέπων :** Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 4<sup>η</sup> Ιουλίου 2005

.....  
Π. Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν. Ι. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος  
Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2005

Αντώνης Ν. Ξενιός  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αντώνης, Ξενιός, 2005  
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.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>2</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>4</b>
1.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ - ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ .....	4
1.2. Η ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ .....	6
1.3. ΤΑ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΜΕ ΤΑ ΣΤΕΡΕΑ ΚΑΙ ΤΑ ΥΓΡΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ .....	9
1.4. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ .....	9
1.5. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΣΤΕΡΕΑ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΜΕΡΙΚΩΝ ΕΚΚΕΝΩΣΕΩΝ .....	16
1.5.1. Το φαινόμενο της πολικότητας.....	17
1.6. Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΚΑΙ Η ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ.....	18
1.7. Η ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ .....	21
1.8. Η ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ .....	21
1.8.1. Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών .....	23
1.8.2. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	30
1.8.3. Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών .....	32
1.8.4. Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	34
1.9. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΓΗΡΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ .....	38
1.10. Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών .....	41
<b>2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ</b> .....	<b>43</b>
<b>3. ΠΙΝΑΚΕΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ</b> .....	<b>44</b>
3.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 1.....	45
3.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 2.....	62
3.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 3.....	78
3.4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 4.....	95
3.5. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 5.....	110
3.6. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 6.....	127
3.7. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 7.....	144
3.8. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 8.....	161
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ</b> .....	<b>178</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>179</b>

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ασφαλώς δε χρειάζεται να πούμε πολλά λόγια για να υποστηρίξουμε ότι κάθε τεχνική κατασκευή και εφαρμογή στη βιομηχανία ή σε οποιονδήποτε άλλο τομέα, προϋποθέτει την χρήση κατάλληλων ηλεκτρομονωτικών υλικών , τόσο από άποψη αντοχής όσο και από άποψη οικονομίας. Αντίστροφα, οι ιδιότητες των διαθέσιμων αυτών υλικών προδιαγράφουν τα όρια των εφαρμογών και τις δυνατότητες για την παραπέρα πρόοδο της τεχνολογίας. Με τις δύο παραπάνω προφανείς διαπιστώσεις γίνεται φανερό ότι αξίζει τον κόπο να ασχοληθούμε με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών, αλλά και τις στατιστικές μετρήσεις διάφορων μεγεθών των μερικών εκκενώσεων. Ανάλογα με τις συσχετίσεις που θα προκύψουν μεταξύ σημαντικών παραμέτρων αλλά και από τις καθεαυτό τιμές τους, θα είναι εφικτό να κατατάξουμε τα ηλεκτρομονωτικά υλικά σε κατηγορίες , να παρατηρήσουμε και να μετρήσουμε τις ιδιότητες που μας ενδιαφέρουν και οι οποίες θα αποδειχθούν χρήσιμες στην περαιτέρω μελέτη μας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ερώτημα από πού προέρχονται οι ιδιότητες αυτές των υλικών. Με την έναρξη της επεξεργασίας των μετρήσεων θα διαπιστώσουμε ότι οι ιδιότητες δεν είναι τυχαία μεγέθη, άσχετα με τα άλλα χαρακτηριστικά του υλικού (όπως είναι οι διαστάσεις τους) και τις συνθήκες στις οποίες βρίσκεται, αλλά αποτελούν μια λογική συνέπεια της δομής του, δηλαδή της χημικής του σύστασης και της διάταξης και αλληλοσύνδεσης των ατόμων , ιόντων ή μορίων που το αποτελούν. Προκειμένου τα παραπάνω σημεία να γίνουν πλήρως αντιληπτά, παρακάτω εξετάζονται τα εξής βασικά θέματα :

Στο πρώτο εισαγωγικό μέρος ερχόμαστε , για πρώτη φορά, σε επαφή με τις βασικές ιδιότητες των βιομηχανικών ηλεκτρομονωτικών υλικών. Οι ιδιότητές τους, μας δίνουν την ικανότητα να κρίνουμε την ποιότητα των μονωτικών υλικών και τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρεται ότι πρέπει να γνωρίζουμε και τα είδη καταπόνησης, με στόχο να αποφύγουμε υλικά , με ροπή προς το αντίστοιχο είδος διάτρησης. Έτσι αναφέρονται ακριβώς και με λεπτομέρειες τα είδη διάτρησης και τα οπτικά φαινόμενα που τα υποκρύπτουν. Τέλος στο ίδιο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι δύο βασικές θεωρίες για την ερμηνεία του φαινομένου της γήρανσης και διάσπασης , η μακροσκοπική θεωρία και η κβαντομηχανική θεωρία. Οι δύο αυτές θεωρίες θα μας βοηθήσουν να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τα φαινόμενα που εμφανίζονται.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρουμε το σκοπό για τον οποίο γίνεται αυτή η εργασία. Το τρίτο και μεγαλύτερο μέρος της διπλωματικής αφορά τις μετρήσεις που ελήφθησαν (πάνω σε διατάξεις που αναφέρονται στην εισαγωγή) και την επεξεργασία τους. Στο ίδιο κεφάλαιο περιλαμβάνονται και κάποιες μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση ηλεκτρικών μεγεθών χρήσιμων για να καταλήξουμε σε συμπεράσματα.

Έτσι παρατείνονται εκτενείς πίνακες που αναφέρονται στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Οι πίνακες αυτοί περιλαμβάνουν τόσο τα απευθείας μετρούμενα μεγέθη (επιβαλλόμενη τάση, φορτία έναρξης και περαίωσης κ.ά.), όσο και αυτά που υπολογίσαμε για να αποφανθούμε για τα διάφορα φαινόμενα. Οι πίνακες συνοδεύονται από χαρακτηριστικές μεγεθών ως προς την επιβαλλόμενη τάση  $U_k$  και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ . Έτσι γίνεται αντιληπτή και οπτικά η μεταξύ τους σχέση, προπαντός όμως παρατηρούμε την εξέλιξη φαινομένων με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης ή πεδιακής έντασης.

Η διπλωματική εργασία κλείνει με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις και τις χαρακτηριστικές.

Δε θα μπορούσα να τελειώσω τον πρόλογο αυτό χωρίς να ευχαριστήσω τους ανθρώπους , οι οποίοι συνέβαλλαν στην περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας . Ευχαριστώ τον καθηγητή μου κ. Π. Μπούρκα για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης της διπλωματικής εργασίας. Χάρη στις υποδείξεις του, έγινε δυνατή η υλοποίηση της. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτωρ κα Αικ. Πολυκράτη για την πολύπλευρη βοήθεια που τόσο πρόθυμα μου πρόσφερε σε όλα τα στάδια σύνθεσης της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου Π. Κωτούλα και Θ. Μπαλκίτζα και κυρίως ην οικογένειά μου για την στήριξη και την βοήθεια που μου παρείχαν ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω αυτόν τον κύκλο στη ζωή μου.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών - Κριτήρια αξιολόγησης

Σκοπός των μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς γη. Με την χρήση μονώσεων απομακρύνουμε την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της διάσπασης.

Με τον όρο διάσπαση εννοεί κανείς την αγώγιμη σύνδεση δύο μεταξύ τους μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης. Όταν η διάσπαση συμβαίνει με εκκένωση στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μονωτικών (π.χ. : αέρας-πορσελάνη, βακελίτης-μονωτικό λάδι), τότε ονομάζεται επιφανειακή διάσπαση (ή υπερπήδηση). Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται διάτρηση. Η διάσπαση σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού ονομάζεται μερική εκκένωση. Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή την επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθίσεις στην επιφάνεια του: σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Οι μερικές εκκενώσεις στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται εσωτερικές μερικές εκκενώσεις και εκείνες στην επιφάνεια του εξωτερικές μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία Corona (στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις)

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

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

Η τιμή  $E_d$  είναι ένα κριτήριο για την επιλογή των διαφόρων ηλεκτρομονωτικών (πίνακας 1.1-1).

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

**Πίνακας 1.1-1 :** διηλεκτρική αντοχή ( $E_d$ ) για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz



Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά ( $\epsilon_r$  : πίνακας 1.1-2), ο συντελεστής απωλειών ( $\text{tg}\delta$ ) και η ειδική αγωγιμότητα ( $\sigma$ ). Για ένα ομοιογενές ηλεκ-τρομονωτικό υλικό σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο ισχύει ότι :

$$\epsilon * \text{tg}\delta = \epsilon_0 * \epsilon_r * \text{tg}\delta = \sigma / \omega \quad (1.1-2)$$

όπου  $\epsilon_0 = 8,857 \text{ pF/m}$  και  $\omega$  η κυκλική συχνότητα. Στον πίνακα 1.1-3 δίνονται τιμές  $\epsilon * \text{tg}\delta$  για ορισμένα υλικά.

Υλικό	$\epsilon_r$	Υλικό	$\epsilon_r$
αέρας (κανονικές συνθήκες)	1,000594	Mikanit	4 - 6
αέρας υγρός	1.5	πάγος	2 - 3
απεσταγμένο νερό	8	Pertinax	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 - 2.5	SF <sub>6</sub>	1.002049
λάστιχο	2.8 - 6.5	στεατίτης	6.4
ξύλο	2.5 - 6.5	γαλαζία	3 - 7
		χαρτί	1,8 - 2,6

**Πίνακας 1.1-2** : Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20<sup>0</sup>C.

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\epsilon * \text{tg}\delta$
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

**Πίνακας 1.1-3** : Τάξη μεγέθους της τιμής  $\epsilon * \text{tg}\delta$  για ορισμένα μονωτικά υλικά στους 20<sup>0</sup>C

Ένα κριτήριο αξιολόγησης για τη διηλεκτρική συμπεριφορά στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών (π.χ. από ξένες επικαθίσεις, ή από μεταβολές της επιφάνειας λόγω θερμικής καταπόνησης, κ.λ.π.) είναι η επιφανειακή ειδική αγωγιμότητα. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν την αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας των στερεών μονωτικών ποικίλουν, η επιφανειακή ειδική

αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες όπως : αντοχή σε ρεύμα διαρροής , αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, κλπ

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρει ιδιαίτερα η μηχανική αντοχή των μονωτικών υλικών, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που εξασκούνται σε αυτά (δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου και μηχανικές δυνάμεις). Στις περιπτώσεις αυτές οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τους κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών. Τυπικό παράδειγμα είναι η αντοχή των μονωτήρων υψηλών τάσεων σε μηχανικές και ηλεκτρικές δυνάμεις (δυναμική καταπόνηση από το ρεύμα βραχυκυκλώσεως).

Στα κριτήρια αξιολόγησης των μονωτικών υλικών συγκαταλέγεται και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ( $\lambda$ ). Ισχύει γενικά ο κανόνας ότι όσο πιο καλός μονωτής είναι ένα υλικό τόσο καλύτερες είναι οι θερμομονωτικές του ιδιότητες. Στον πίνακα 1.1-4 δίνονται τιμές του συντελεστή  $\lambda$  για ορισμένα μονωτικά υλικά.

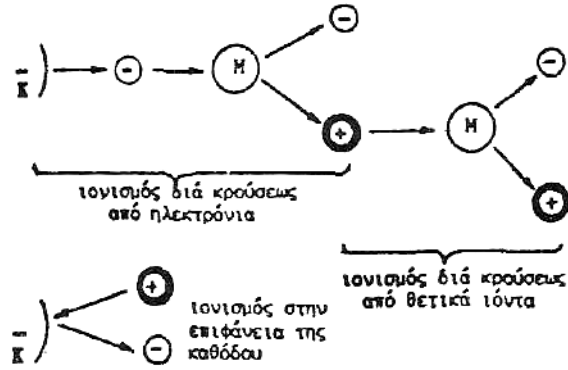
Υλικό	Πάχος μόνωσης σε mm	$\lambda$ σε W cm/ cm <sup>2</sup> grad
πορσελάνη	0,5 – 3	0,008 - 0,015
στεατίτης	0.5 – 3	0.02 - 0.026
γυαλί	< 1	0,0075 - 0,012
ξύλο	< 3	0,001 - 0,002
χαρτόνι	0,3 - 1,5	0,003
σκληρό ελαστικό	<3	0,001
Glimmer	<0,5	0,003
χαρτί στο λάδι	<2	0,014 - 0,03

**Πίνακας 1.1-4 :** Τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ορισμένων μονωτικών υλικών

## 1.2. Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία Thawsend και τον νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thawsend δίνεται στο σχήμα 1.2-1 . Σύμφωνα με αυτό η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού :

- ιονισμός με κρούσεις από ηλεκτρόνια,
- ιονισμός με κρούσεις θετικά ιόντα και
- ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου

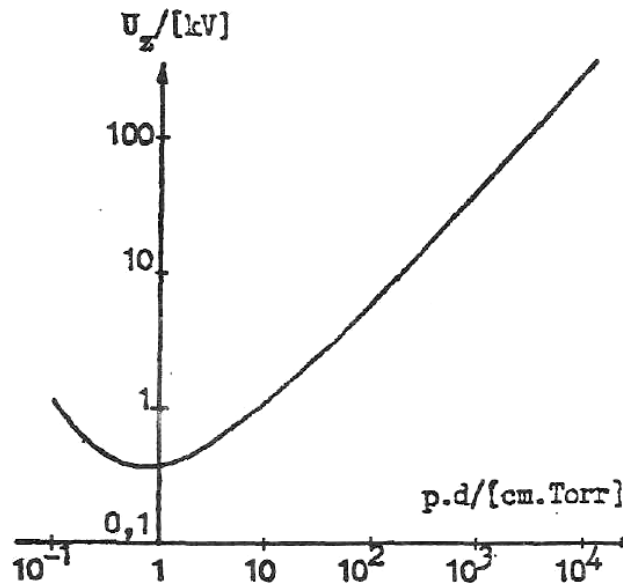


**Σχήμα 1.2-1** : Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Thowsend.  
 K : κάθοδος,  
 - : ηλεκτρόνιο,  
 + : θετικό ιόν,  
 M : Μόριο.

Κατά το νόμο του Paschen η τάση έναυσης ( $U_z$  : τάση αυτοσυντήρησης του ιονισμού) διέπεται από τη σχέση :

$$U_z = f^*(p*d) \tag{1.2-1}$$

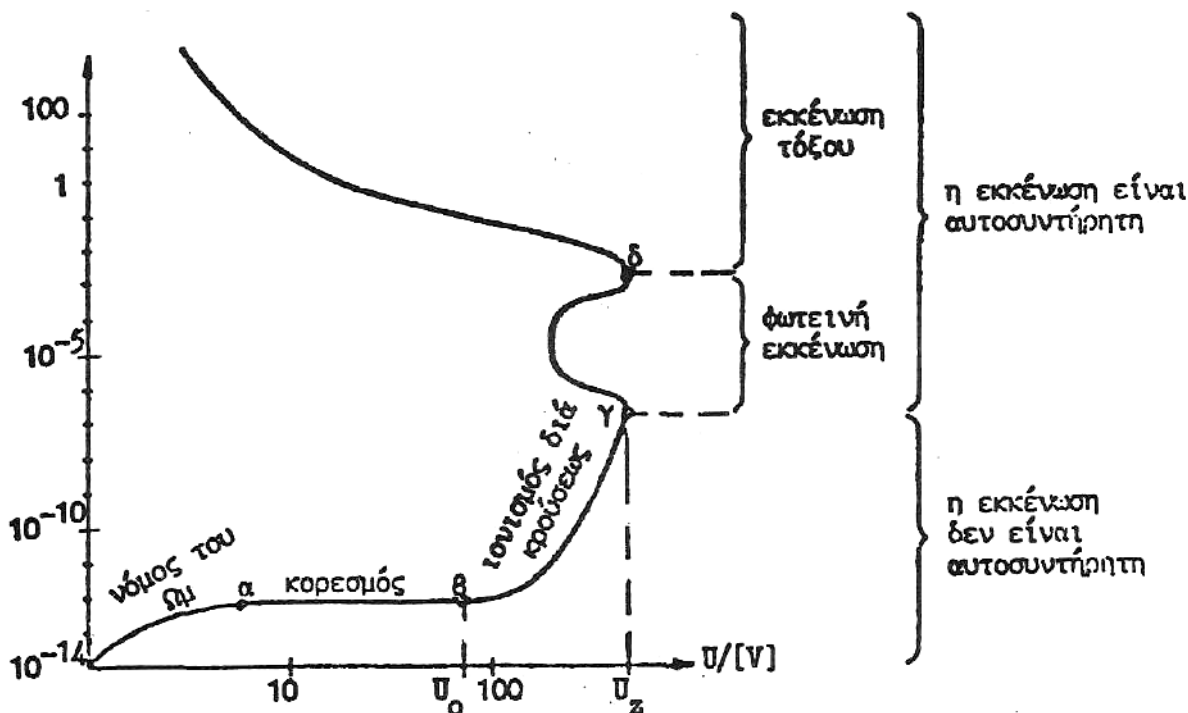
όπου  $p$  η πίεση του αερίου και  $d$  η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα σε ομογενές πεδίο δίνεται στα σχήμα 1.2-2.



**Σχήμα 1.2-2** :  $U_z = f^*(p*d)$  για τον αέρα

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, που 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 (20°C, 760 Torr). Η χαρακτηριστική αυτή δίνεται προσεγγιστικά στο σχήμα 1.2-3 για την πυκνότητα ροής (S), ανάλογα με την ενεργό τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (U). Στην χαρακτηριστική αυτή επισημαίνονται οι διάφορες περιοχές ανάλογα με το είδος της εκκένωσης.

Ο μηχανισμός διάσπασης μεγάλων διακένων αποδίδεται στη δημιουργία διαδοχικών οχητών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχητούς βασίζεται στον ιονισμό, που εκδηλώνεται αρχικά στην περιοχή της ανόδου με αποτέλεσμα να προκαλείται πρακτικά μείωση της απόστασης του διακένου και να διευκολύνεται η εκδήλωση διαδοχικών οχητών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



**Σχήμα 1.2-2:** Χαρακτηριστική "τάσης-πυκνότητας ροής" των αερίων, υπό κανονικές συνθήκες, κατά G. Oberdorffer.

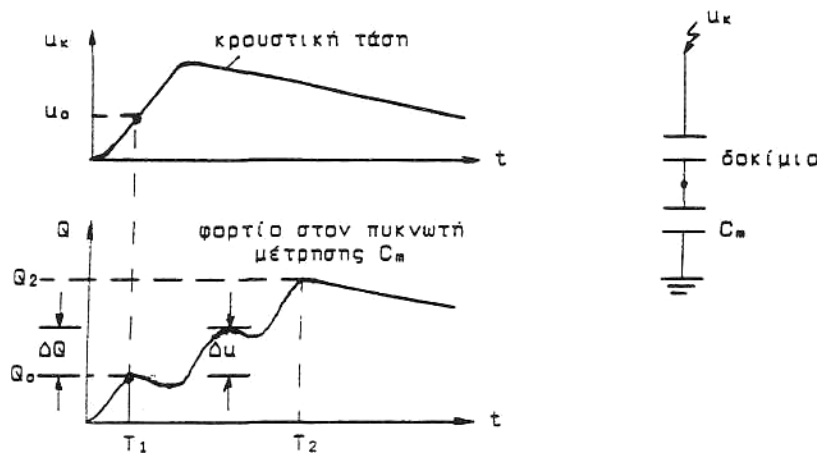
- $U_0$ : αρχική τάση
- $U_Z$ : τάση έναυσης
- $S$ : πυκνότητα ροής

### 1.3. Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού των αερίων μονωτικών με τα στερεά και τα υγρά μονωτικά

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.

### 1.4. Στατιστικές μετρήσεις 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 π.χ. στο σχήμα 1.4-1 για μετρήσεις με κρουστικές τάσεις. Με παρόμοιες σκέψεις, μπορεί κανείς να καθορίσει μεγέθη για τη μελέτη των μερικών εκκενώσεων κατά την καταπόνηση με άλλες μορφές τάσεων, καθώς και με άλλα τετράπολα μέτρησης (συνήθως ωμική αντίσταση, αντί του πυκνωτή, ή συνδυασμός των δύο αυτών στοιχείων μέτρησης, σχήμα 1.4-2). Στο σχήμα π.χ. 1.4-3 δίνεται ένα παράδειγμα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων, υπό ημιανορθωμένη τάση καταπόνησης.



**Σχήμα 1.4-1 :** Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για τη στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό κρουστικές τάσεις 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.

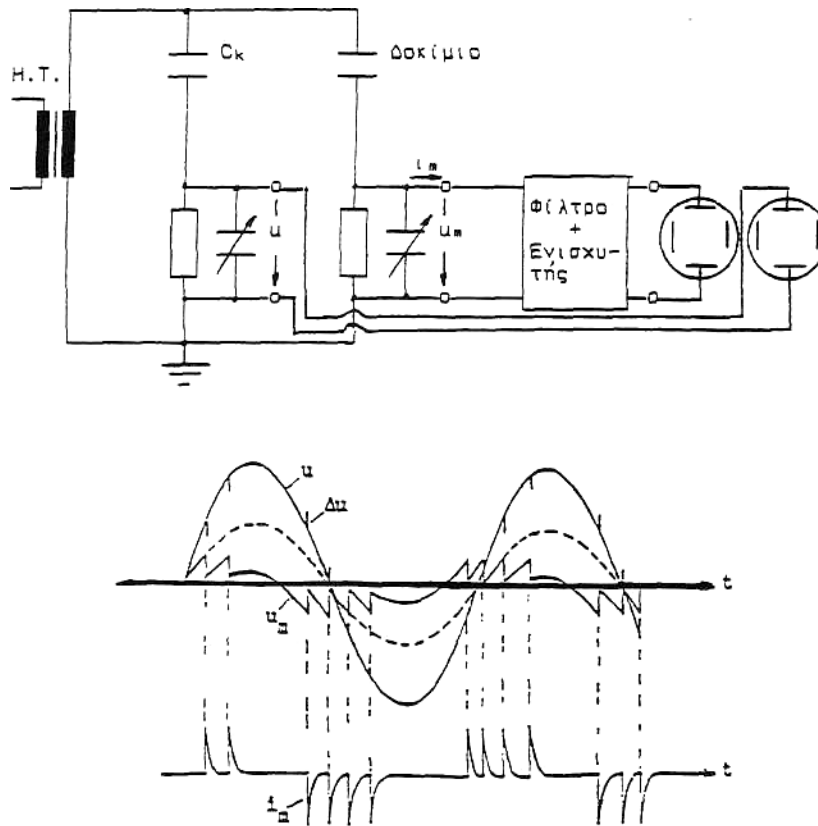
$\Delta Q$  : Αύξηση φορτίου.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως η χαρακτηριστική  $Q = f(|\hat{U}k|)$ , 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 ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα 1.4-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής 1,2/50μs ή 10/200μs, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα 1.4-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90<sup>η</sup> κρούση, ως προς την 60<sup>η</sup>. 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 (θραύσματα) στην επιφάνεια του μονωτικού.

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 στερεό μονωτικό. Έχει διαπιστωθεί ότι:

- 1) οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή μηδενισμού της τάσης ή γενικότερα στην περιοχή της μέγιστης χρονικής μεταβολής της.
- 2) οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στην περιοχή όπου δεν μηδενίζεται η τάση.

Τα παραπάνω σημαίνουν π.χ. για καταπονήσεις με κρουστικές τάσεις, ότι : οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του μετώπου της κρουστικής τάσης, ενώ οι εξωτερικές μερικές εκκενώσεις κατά τη διάρκεια της ουράς της κρουστικής τάσης.



**Σχήμα 1.4-2 :** Απλοποιημένο κύκλωμα μέτρησης των μερικών εκκενώσεων μέσω "ωμικού χωρητικού" τετράπολου μέτρησης, κατά την καταπόνηση του δοκιμίου με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

$C_k$  : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

$u$  : Στιγμαία τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (η οποία μετράται σε ένα ωμικό-χωρητικό τετράπολο).

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

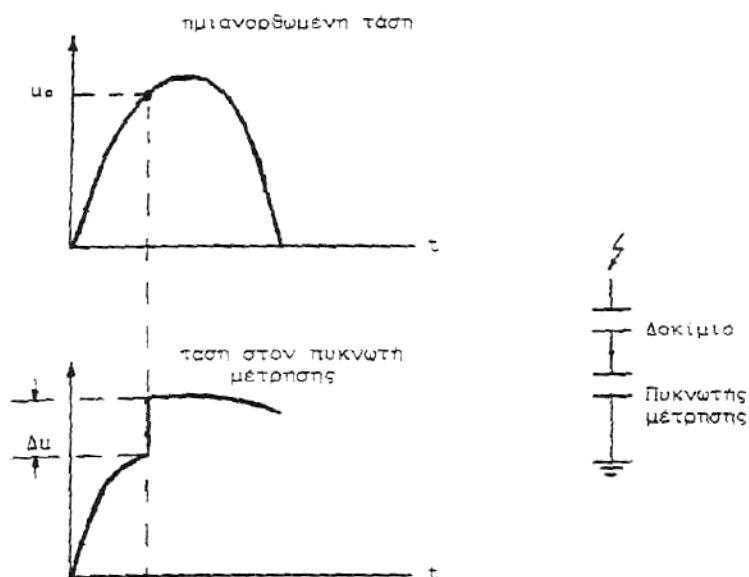
$i_m$  : Στιγμαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

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

Μία πειραματική προσέγγιση του παραπάνω διαχωρισμού, μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, έχει δοθεί από παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού σε στερεά οργανικά μονωτικά, με κρουστικές τάσεις διαφόρων μορφών (σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα), που συνδυάστηκαν με ταυτόχρονες οπτικές παρατηρήσεις της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών κατά το σχήμα 1.4-3. Στον πίνακα 1.4-1 δίνονται αποτελέσματα των στατιστικών αυτών μετρήσεων, που αφορούν

οργανικά στερεά μονωτικά με  $\epsilon_r \approx 2,5-4,5$ , από τα οποία συμπεραίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Φαίνεται επίσης, ότι οι κρουστικές τάσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (τάσεις χειρισμών) προκαλούν κυρίως εσωτερικές μερικές εκκενώσεις (ενισχύοντας έτσι τη γήρανση των στερεών μονωτικών υλικών), ενώ οι κεραυνικές τάσεις (μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50μs) σχετίζονται περισσότερο με εξωτερικές μερικές εκκενώσεις.



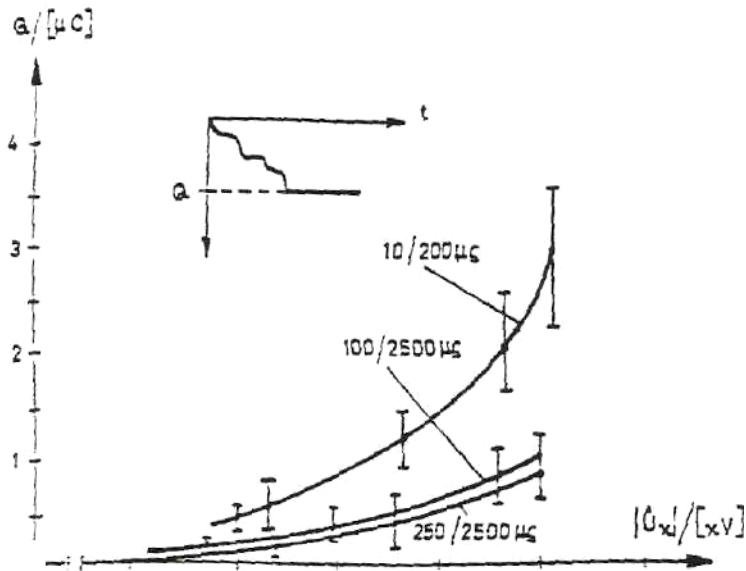
**Σχήμα 1.4-3 :** Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

$T_1$  : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.

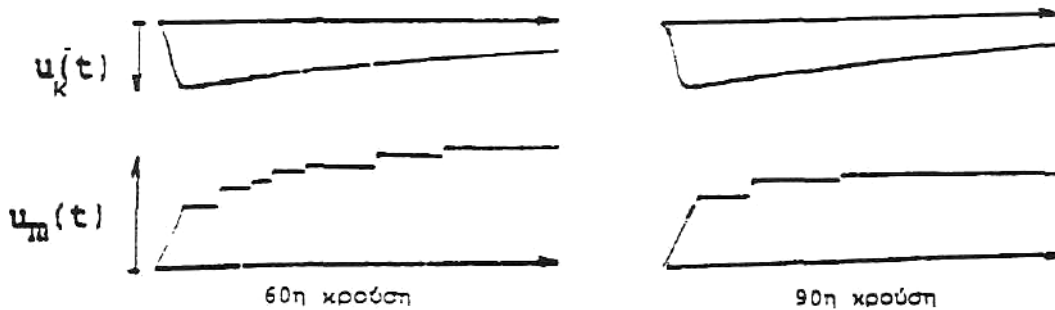
$U_0$ : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).

$\Delta u$  : άλμα δυναμικού





**Σχήμα 1.4-4 :** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k)$  για τον βακελίτη (πάχους 2mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs, 100/2500μs και 250/2500μs.  
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα  
 $C_m$ : 1000nF

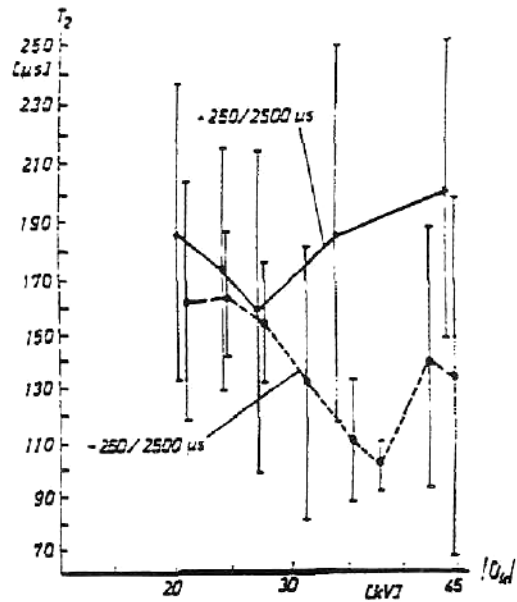
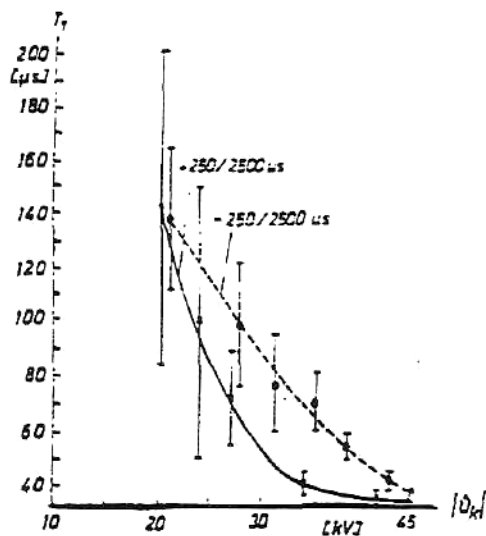
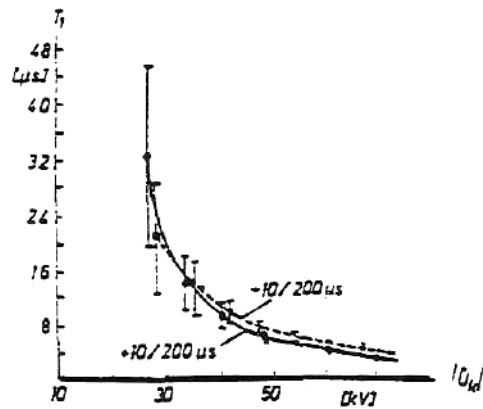
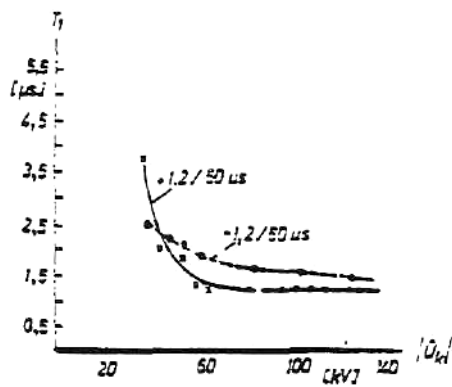


**Σχήμα 1.4-5 :** Άλλατα δυναμικού κατά την 60η και την 90η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm).  
 Μορφή τάσης : 1,2/50μs ( $U_k = 99,7KV$ ).  
 Περιβάλλον μέσο: μονωτικό λάδι.  
 Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.  
 $C_m$  : 210nF.

Μορφή τάσης σε $\mu\text{s}$	Δενδρίτης	Εικόνα επιφανειακών διαταραχών	Άλματα Δυναμικού	Συμπεράσματα για τις μερικές εκκενώσεις
1,2/50	ΝΑΙ	ΝΑΙ	στην ουρά	εξωτερικές μερικές εκκενώσεις
10/200	ΝΑΙ (αλλά μικρότερος από εκείνον κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 $\mu\text{s}$ )	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 $\mu\text{s}$ )	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

**Πίνακας 1.4-1 :** Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

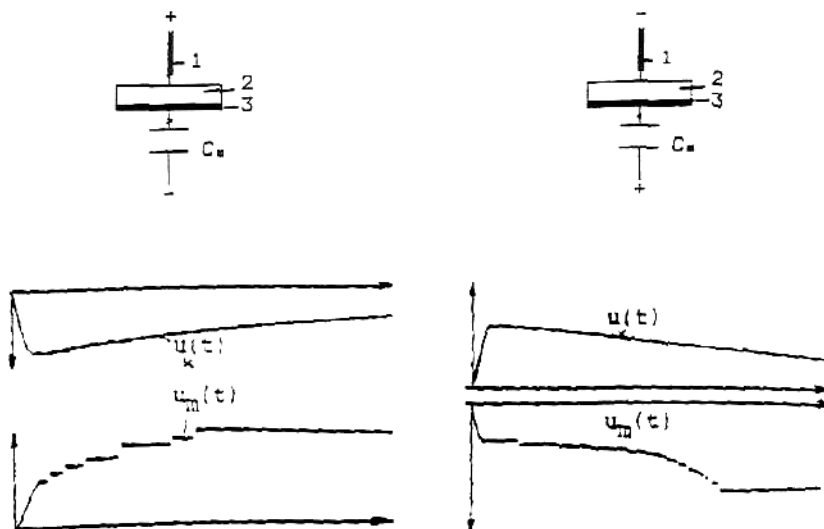
Μία άλλη πειραματική προσέγγιση του διαχωρισμού μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων, ως προς τον χρόνο εκδήλωσης τους (υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης), έχει βασιστεί σε χαρακτηριστικές  $T_1=f(U_K)$  και  $T_2=f(U_K)$  και σε συνδυασμό με οπτικές παρατηρήσεις για την εικόνα των επιφανειακών διαταραχών. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ο χρόνος έναρξης ( $T_1$ ) των μερικών εκκενώσεων (στα μονωτικά υλικά και το είδος της καταπόνησης, που προαναφέρθηκαν), καθώς και ο χρόνος περαίωσης των μερικών εκκενώσεων ( $T_2$ ), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 $\mu\text{s}$ ), ώστε σε συνδυασμό με τις παρατηρήσεις του πίνακα 1.4-1 για την εικόνα των επιφανειακών, να καταλήγει κανείς στο ίδιο συμπέρασμα.



**Σχήμα 1.4-6:** 1) Χαρακτηριστική  $T_1=f(U_k)$  κατά την καταπόνηση στερεών οργανικών μονωτικών (πάχους 2mm και  $\epsilon_r=2,5-4,5$ ) με κρουστικές τάσεις 1,2/50 $\mu s$ , 10/200 $\mu s$  και 250/2500 $\mu s$ .  
 2) Χαρακτηριστική  $T_2=f(U_k)$  κατά την καταπόνηση των υλικών αυτών με κρουστικές τάσεις 250/2500 $\mu s$ .  
 Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι.  
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα πλάκα  
 1: 2 φορές η τυπική απόκλιση.

## 1.5. Το φαινόμενο της πολικότητας σε πολυμερή στερεά μονωτικά κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων

Από την μέση καμπύλη των χαρακτηριστικών του σχήματος 1.4-6 γίνεται επίσης φανερή η εκδήλωση του φαινομένου της πολικότητας (βλέπετε παράγραφο 1.5.1), όπως και κατά τη διάτρηση (βλέπετε πίνακα 1.5-1). Οι επικαλύψεις τιμών, που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στη διαφορετική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο (τα οργανικά στερεά μονωτικά είναι ανομοιογενή και δεν είναι δυνατό να υπάρχει συμμετρική κατανομή των θέσεων διαταραχής από δοκίμιο σε δοκίμιο). Πάντως, το φαινόμενο της πολικότητας γίνεται φανερό στα άλματα δυναμικού από την κύρτωση (παρέκκλιση) της  $u_m(t)$  προς τον άξονα του χρόνου (σχήμα 1.5-1).



**Σχήμα 1.5-1** : Τυπικά παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις της μορφής  $1,2/50\mu s$ .  
(1: Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2: Δοκίμιο, 3: Ηλεκτρόδιο πλάκα,  
 $C_m$ : Πυκνωτής μέτρησης).

d [mm]	Κρουστική τάση Μορφή (μs) πολικότητα		$U_k$ 50% [kV]	περιοχή τιμών $U_k$ για τη διάσπαση [kV]
1	1,2/50 1,2/50	θετική	80	78...90
		αρνητική	86	81...95
	10/200 10/200	θετική	74	69...78
		αρνητική	77	71...79
250/2500 250/2500	θετική	66	63...69	
	αρνητική	68	65...70	
2	1,2/50 1,2/50	θετική	135	126... 151
		αρνητική	148	132...165
	10/200 10/200	θετική	74	69...80
		αρνητική	70	67,5...71

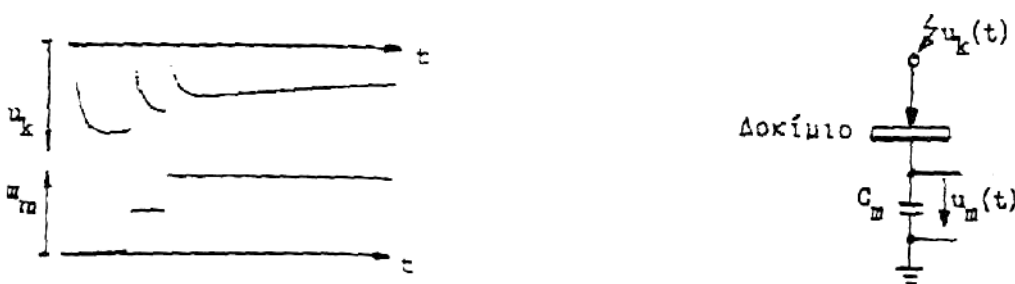
**Πίνακας 1.5-1:** Τιμές της τάσης διάσπασης του στερεού μονωτικού pertinax H1270 (πάχους 1mm και 2mm) κατά την καταπόνηση του με διάφορες μορφές κρουστικών τάσεων σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών. Διάμετρος δοκιμίων: 150 mm. Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα. Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας: R=0,9 mm

### **1.5.1. Το φαινόμενο της πολικότητας**

Η τιμή της τάσης για τη διάσπαση εξαρτάται από την πολικότητα της ακίδας. Ισχύει ο κανόνας ότι η τάση διάσπασης έχει μεγαλύτερη τιμή κατά την θετική πολικότητα της ακίδας, ως προς την αρνητική πολικότητα της. Μία ερμηνεία του φαινομένου αυτού μπορεί να δοθεί ως ακολούθως : Ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας συγκεντρώνονται μπροστά της ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς αντίθετης πολικότητας. Επειδή όμως οι θετικοί φορείς είναι στο σύνολο τους περισσότερο δυσκίνητοι από τους αρνητικούς και επομένως εξουδετερώνονται δυσκολότερα, είναι φανερό ότι στην περίπτωση της αρνητικής ακίδας απαιτείται μεγαλύτερη τάση για την διάσπαση. Η συγκέντρωση γενικά αυτή των δυσκίνητων θετικών ιόντων προ της αρνητικής ακίδας φαίνεται ότι είναι ο λόγος της μικρότερης τιμής του αρχικού πεδίου, ως προς εκείνη κατά τη θετική πολικότητα. Για τους λόγους, που προαναφέρθηκαν, το φαινόμενο της πολικότητας ισχύει επίσης για τα υγρά και τα στερεά μονωτικά.

## 1.6. Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

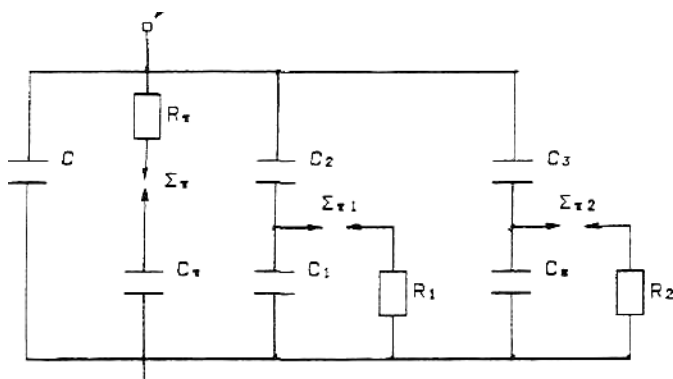
Η εκδήλωση των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στη διαχωριστική επιφάνεια του συνδυασμού "στερεό μονωτικό-αέριο μονωτικό" ή του συνδυασμού "στερεό μονωτικό-υγρό μονωτικό" θα οδηγήσει σε επιφανειακή διάσπαση, όταν μία ομάδα ελεύθερων ηλεκτρονίων (η οποία, με βάση τις οπτικές παρατηρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μία 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 του (υπερπήδηση).



**Σχήμα 1.6-1 :** Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.  
 $C_m$ : 1835nF,  $U_k$ : 70kV.

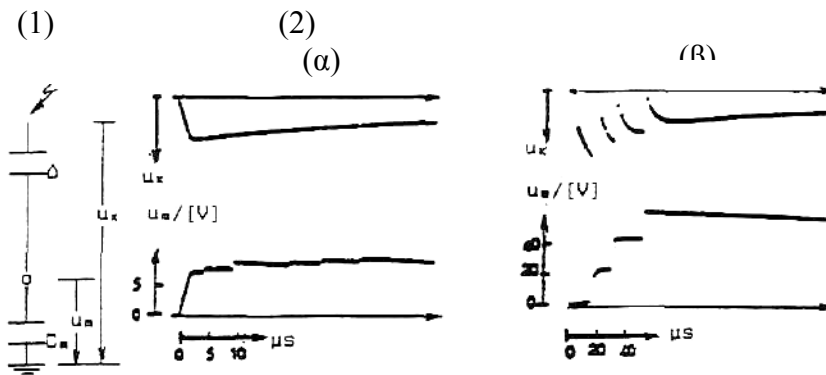
Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30Å. Έτσι, εκτός από τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις (οι οποίες οφείλονται σε ξένες επικαθίσεις και έχουν συνήθως τον κυρίαρχο ρόλο στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στην επιφάνεια) μπορεί κανείς να υποθέσει ότι εκδηλώνονται και οι άλλοι παράγοντες (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος), όπως κατά τη διάτρηση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί, ότι ισχύει το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.6-2, όπου όμως οι μερικές εκκενώσεις στο επιφανειακό φιλμ (δηλαδή στο συνδυασμό "επιφάνεια του στερεού μέχρι βάθος 30Å-περιβάλλον μέσο") είναι συνήθως ο κυρίαρχος παράγοντας για την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση.

Πειραματικές έρευνες σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών με κρουστικές τάσεις, δείχνουν ότι υπάρχει ομοιότητα των παλμογραφημάτων της διάτρησης ως προς εκείνα της επιφανειακής διάσπασης, με τη διαφορά ότι η επιφανειακή διάσπαση εκδηλώνεται στην ουρά της κρουστικής τάσης (συγκρίνατε το παλμογράφημα του σχήματος 1.6-1 με εκείνα των σχημάτων 1.6-3 και 1.6-4).



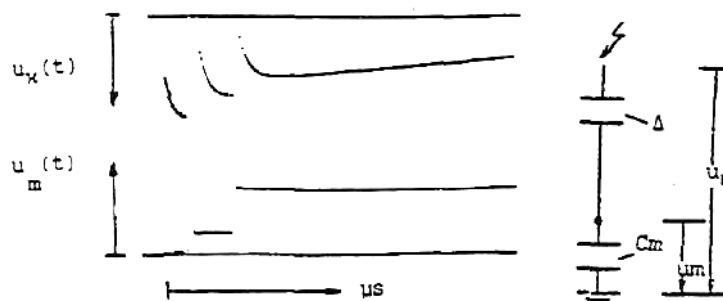
**Σχήμα 1.6-2 :** Βελτίωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff, ώστε να αποδίδεται από αυτό η γήρανση και η ηλεκτρομηχανική διάτρηση.

- $C$  : Ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.
- $C_1$  : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εσωτερικές θέσεις διαταραχών (κυρίως φυσαλίδες αερίων).
- $C_2$  : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του στερεού μονωτικού.
- $C_\epsilon$  : Χωρητικότητα, που παριστάνει τις εξωτερικές θέσεις διαταραχών.
- $C_3$  : Χωρητικότητα, που παριστάνει το υπόλοιπο υγιές τμήμα του επιφανειακού φιλμ.
- $C_\pi$  : Χωρητικότητα, που παριστάνει την πόλωση του υλικού για τη διάτρηση από τις δυνάμεις του πεδίου.
- $R_1$  : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$ .
- $R_2$  : Αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_2$ .
- $R_\pi, \Sigma\pi$  : Διαδρομή εκκένωσης κατά τη διάσπαση του  $C_\pi$  ( $R_\pi$  αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi$ ).



**Σχήμα 1.6-3 :** Τυπικά παλμογραφήματα κατά τη γήρανση και διάσπαση στερεών οργανικών μονωτικών

- 1) απλοποιημένη διάταξη μέτρησης ( $u_k$  : 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 1,11MV/cm,  $U_K=77,5kV$ ,  $C_m=210nF$ , υλικό: βακελίτης)
  - (β) διάτρηση : (τιμή πεδίου 1,20MV/cm,  $U_K =85kV$ ,  $C_m=210nF$ , υλικό: pertinax)



**Σχήμα 1.6-4 :** Διάτρηση του βακελίτη (πάχους 1mm) με κρουστική τάση της μορφής 10/200 $\mu$ s.  $U_k =72kV$ .



## **1.7. Η μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάτρηση των**

### **στερεών μονωτικών**

Όπως προαναφέρθηκε, τα στερεά μονωτικά αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες προ της διάσπασης και καταστρέφονται κατά τη διάτρηση. Η ανάγκη για να δοθεί μία εξήγηση στις παραπάνω αλλαγές των υλικών (προ και κατά τη διάτρηση), οδήγησε στην αναζήτηση των διαφόρων παραγόντων, που τις προκαλούν. Έτσι, από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορα στερεά μονωτικά (κυρίως μετρήσεις της τάσης διάσπασης σε σχέση με το χρόνο και τη μορφή της τάσης), οι οποίες έχουν συνδυαστεί με παρατηρήσεις σχετικά με την αλλαγή της μοριακής δομής, που προκαλείται στα υλικά αυτά, θεωρείται ότι υπάρχουν οι παρακάτω βασικοί παράγοντες μείωσης της σταθερότητας των μορίων τους :

- α) οι απώλειες Joule,**
- β) οι δυνάμεις Coulomb,**
- γ) οι μερικές εκκενώσεις και**
- δ) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.**

Οι αντίστοιχες προς τους παραπάνω παράγοντες θεωρητικές μορφές της διάτρησης είναι:

- α) η θερμική διάτρηση,**
- β) η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και την ηλεκτρομηχανική),**
- γ) η ηλεκτροχημική διάτρηση (ή γήρανση) και**
- δ) η θερμοχημική διάτρηση.**

Στην πράξη βέβαια συνδυάζονται οι παράγοντες αυτοί και υποβοηθούνται από διάφορες ειδικές συνθήκες που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο κλπ), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

## **1.8. Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των**

### **στερεών μονωτικών**

Σύμφωνα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, η γήρανση και η διάσπαση των στερεών μονωτικών οφείλονται σε τέσσερις βασικούς παράγοντες (απώλειες Joule, μερικές εκκενώσεις, δυνάμεις Coulomb και θερμότητα του περιβάλλοντος). Οι παράγοντες αυτοί δεν περιλαμβάνουν όμως στοιχεία για φαινόμενα, που δεν μπορεί κανείς να ακούσει ή να παρατηρήσει, όπως :

- ο ιονισμός με κρούσεις, που πιστεύεται ότι εκδηλώνεται στα στερεά μονωτικά και
- το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η συσχέτιση του με φωτεινά φαινόμενα και καταπονήσεις, που παρατηρούνται στο υλικό (θερμικές ή μηχανικές ή και τα δύο), που θα έδινε περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής.

Οι πληροφορίες αυτές, καθώς και άλλες, δόθηκαν με κβαντομηχανική ερμηνεία των

φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, η οποία βασίζεται κυρίως:

- στις μετρήσεις των αλμάτων δυναμικού κατά την καταπόνηση στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις (δηλαδή από παλμογραφήματα όπως εκείνα των σχημάτων : 1.6-3, 1.4-1 και 1.5-1),
- στις κρούσεις φορτίου, που είναι η κυματομορφή (το παλμογράφημα) της πτώσης τάσης σε ένα ωμικό τετράπολο μέτρησης (ως στοιχείο μέτρησης χρησιμοποιήθηκε δηλαδή μία αντίσταση αντί του πυκνωτή μέτρησης: βλέπετε σχήμα 1.8.1-5),
- στην ανίχνευση του μη ορατού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που εκπέμπεται κατά τη γήρανση και τη διάσπαση)
- στην ικανοποιητική πειραματική και θεωρητική ταύτιση του μηχανισμού παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων

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 τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα από τη θεωρία αυτή είναι:

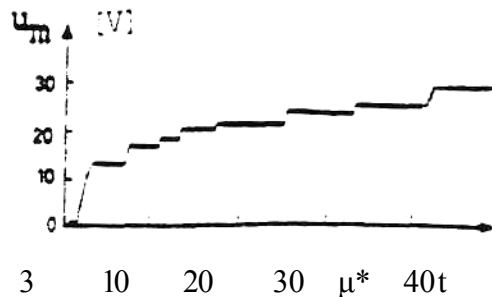
- 1) Η γήρανση και η διάσπαση, σχετίζονται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται στο υλικό. Έχει διαπιστωθεί, ότι:
  - α) το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη γήρανση μπορεί να είναι από ακουστικά κύματα μέχρι υπεριώδεις ακτίνες.
  - β) το φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας κατά τη διάσπαση είναι δυνατό να επεκταθεί σε τιμές της ιονίζουσας περιοχής του (η εκπομπή του φάσματος αυτού προκαλεί την απεικόνιση αντικειμένων στη φωτογραφική πλάκα)
- 2) Καθοριστικός παράγοντας για την δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων είναι η τιμή του πεδίου. Από μετρήσεις σε οργανικά στερεά μονωτικά (με σχετική διηλεκτρική σταθερά 2,5-4,5) έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης, αρχίζουν σε τιμή πεδίου περίπου 0,2MV/cm.
- 3) Για τιμές του πεδίου μέχρι περίπου 0,5 MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση :
$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$$
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται πολύ περισσότεροι και δεν ισχύει η παραπάνω σχέση. 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. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση τους στα ηλεκτρόδια.

### 1.8.1. Φαινόμενα προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών

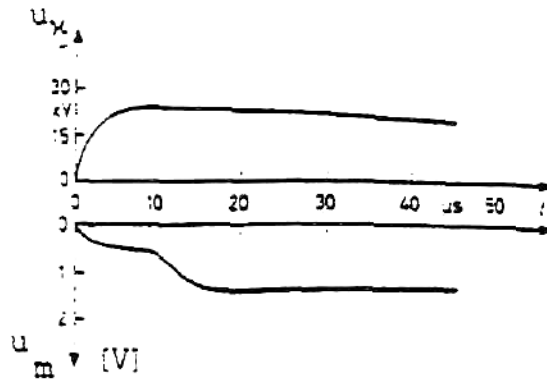
Ένα τυπικό παράδειγμα κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης και διάσπασης σε στερεά μονωτικά των πρακτικών εφαρμογών είναι το παρακάτω :

Στα σχήματα 1.8.1-1 έως και 1.8.1-3 δίνονται ενδεικτικά παλμογραφήματα της τεχνητής γήρανσης στερεών πολυμερών μονωτικών με κρουστικές τάσεις σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου και στο σχήμα 1.8.1-4 ένα παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Η διάταξη μέτρησης έχει σχεδιαστεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.8.1-5. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις αυτές διαπιστώθηκε ότι:

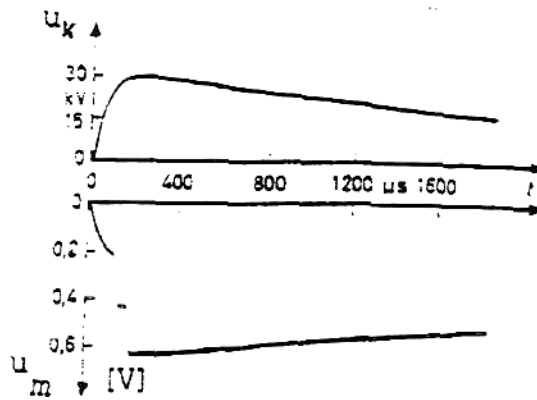
- α) μετά από μία τιμή  $U_k = 45\text{KV}$  , κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις  $1,2/50\mu\text{s}$  ή  $10/200\mu\text{s}$ , εκδηλώνεται επιφανειακός денδρίτης, στα ίχνη του οποίου παρατηρείται στην επιφάνεια του μονωτικού μόνιμη αλλαγή της μοριακής δομής(σχ. 1.8.1-6). Υπό σταθερή τιμή της τάσης ο денδρίτης, καθώς και η αντίστοιχη προς αυτόν αλλαγή της μοριακής δομής, έχουν μικρότερες διαστάσεις
- β) κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις  $250/2500\mu\text{s}$  δεν παρατηρήθηκε, υπό σταθερή τιμή της τάσης (που δεν οδηγεί στη διάσπαση), η εκδήλωση του παραπάνω денδρίτη, ούτε προκλήθηκε αλλαγή της μοριακής δομής



**Σχήμα 1.8.1-1:** Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση  $1,2/50\mu\text{s}$ .  $U_k: 100\text{kV}$ .  $E: 0,8\text{MV/cm}$ .  $C_m: 210\text{nF}$ .



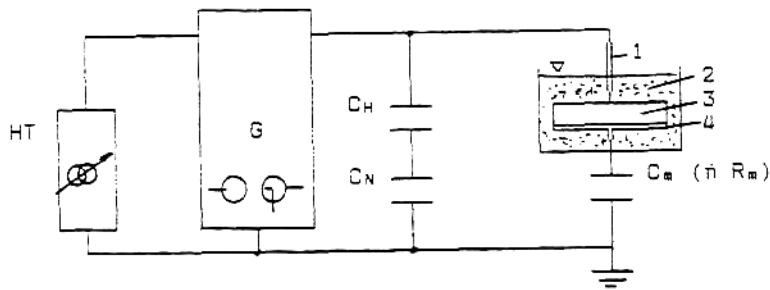
**Σχήμα 1.8.1-2 :** Πρώτο άλμα δυναμικού υπό κρουστική τάση 10/200μs.  
 $U_K$ : 26,6kV.  
 $E$ : 0,38MV/cm.  
 $C_m$ : 210nF.



**Σχήμα 1.8.1-3 :** Άλματα δυναμικού υπό κρουστική τάση 250/2500μs.  
 $U_K$ : 32 kV.  $E$  : 0,31MV/cm.  $C_m$ : 1000nF.



**Σχήμα 1.8.1-4 :** Κρούσεις φορτίου υπό κρουστική τάση 10/200μs. Κλίμακα χρόνου : 5 μs/div. Κλίμακα ρεύματος : 1,3 A/div.  
 $U_K$  : 81kV,  $E$  : 0,86 MV/cm.



**Σχήμα 1.8.1-5 :** Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ή των κρούσεων φορτίου σε στερεά μονωτικά, υπό κρουστικές τάσεις καταπόνησης.

H.T. : Μετασχηματιστής υψηλής τάσης.

G : Γεννήτρια κρουστικών τάσεων.

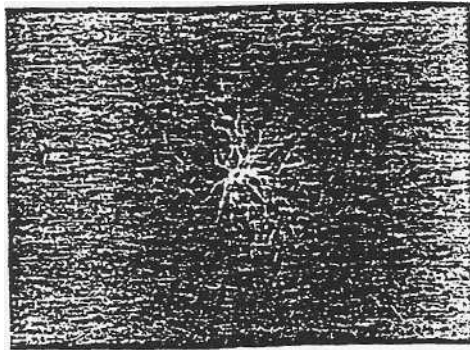
$C_H$  και  $C_N$  : Καταμεριστής για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης.

1 : Ηλεκτρόδιο ακίδα, 2 : Μονωτικό λάδι

3 : Δοκίμιο (πάχος 2mm), 4: Ηλεκτρόδιο πλάκα

$C_m$  : πυκνωτής μέτρησης των αλμάτων δυναμικού

$R_m$  : αντίσταση μέτρησης των κρούσεων φορτίου (δηλαδή του ρεύματος).



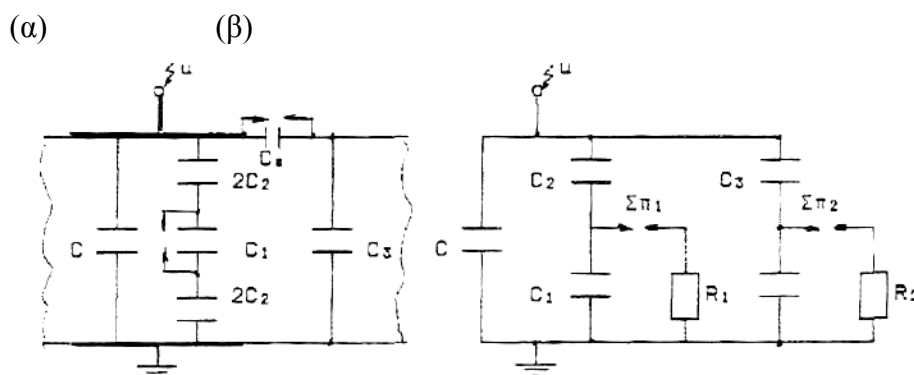
**Σχήμα 1.8.1-6 :** Εικόνα επιφανειακών διαταραχών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.

$U_K$  : 85kV,  $E$  : 0,8MV/cm.

Για λόγους σύγκρισης των συμπερασμάτων, μεταξύ μακροσκοπικής και κβαντομηχανικής ερμηνείας των φαινομένων γήρανσης στα στερεά μονωτικά, εξετάζονται (με τα παραπάνω δεδομένα) και οι δύο αυτές περιπτώσεις :

### α) Μακροσκοπική ερμηνεία

Αν οι παραπάνω μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις ερμηνευτούν με τη μακροσκοπική θεωρία, τότε καταλήγει κανείς στα συμπεράσματα του πίνακα 1.4-1. Η εκδήλωση των αλμάτων δυναμικού (ή των κρούσεων φορτίου) κατά τη θεωρία αυτή ερμηνεύονται από το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (σχήματα 1.8.1-7 έως 1.8.1-9).



**Σχήμα 1.8.1-7:** Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής

$\alpha$  : σχηματική παράσταση

$\beta$  : ισοδύναμο κύκλωμα

$C$  : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

$C_1$  : χωρητικότητα της φυσαλίδας

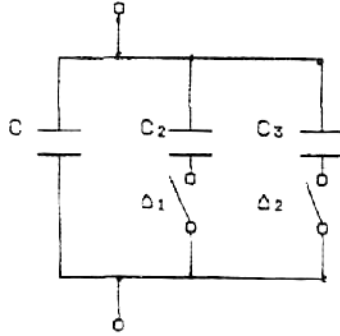
$C_e$  : χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

$C_2$  : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού)

$C_3$  : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

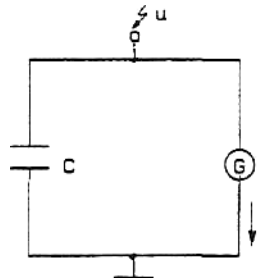
$R_1$  : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_1$

$R_2$  : αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή  $\Sigma\pi_2$



**Σχήμα 1.8.1-8:** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff)

- C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- C<sub>2</sub>: χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού
- C<sub>3</sub>: χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού
- Δ<sub>1</sub> και Δ<sub>2</sub> : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.



**Σχήμα 1.8.1-9 :** Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

- C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης
- G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

### **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 πυκνωτή μέτρησης C<sub>m</sub> ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση :

$$W = 0,5 \cdot q_e \cdot \Delta u \tag{1.8.1-1}$$

όπου: q<sub>e</sub> το φορτίο του ηλεκτρονίου και Δu το άλμα δυναμικού

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

$$\tau = R \cdot C_m \quad (1.8.1-2)$$

οπότε η τιμή της ενέργειας δίνεται από την σχέση :

$$W = (0,5 \Delta u) / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \text{ σε eV} \quad (1.8.1-3)$$

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

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

$$f = 1 / (1 - e^{-t/(R \cdot C_m)}) \quad (1.8.1-4)$$

δίνεται στον πίνακα 1.8.1-1, για χωρητικά τετράπολα μέτρησης, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις αυτές. Για τους πυκνωτές του πίνακα αυτού και για  $R = 0,5 \Omega$ , ισχύει επομένως :

$C_m$ σε nF	10	20	210	1000	1835
F	1	1	162	551	9,6

**Πίνακας 1.8.1-1** : Τιμές του συντελεστή f για  $R = 0,5 \Omega$

$$W = 0,5 \cdot f \cdot \Delta u \text{ σε eV} \quad (1.8.1-5)$$

όπου  $\Delta u$  σε V.

Στον πίνακα 1.8.1-2 έχουν υπολογιστεί με την παραπάνω σχέση οι τιμές της ενέργειας W για το πρώτο άλμα δυναμικού των παλμογραφημάτων των σχημάτων 1.8.1-1, 1.8.1-2 και 1.8.1-3. Από τις τιμές αυτές φαίνεται, ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών σχετίζεται με την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που μπορεί να περιλαμβάνει υπεριώδεις ακτίνες και υπέρυθρες ακτίνες. Έτσι:

- 1) από τις τιμές της ενέργειας κατά τον πίνακα 1.8.1 -2,
- 2) τη φωτεινή ακτινοβολία, που παρατηρείται στην πράξη σε αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης μερικών εκκενώσεων (και η οποία με υπολογισμό της ενέργειας W εύκολα διαπιστώνεται σε άλματα δυναμικού του παλμογραφήματος του σχήματος 1.8.1-1), και
- 3) τις ραδιοφωνικές παρεμβολές και τα ακουστικά κύματα, που συχνά προκαλούν οι μερικές εκκενώσεις,

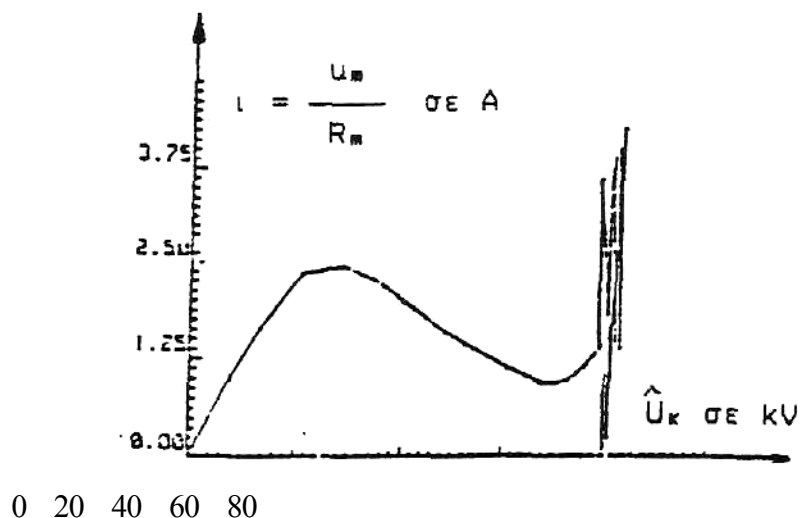


μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η γήρανση των στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών σχετίζεται με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται σε αυτά, το φάσμα της οποίας είναι: από ακουστικά κύματα μέχρι και υπεριώδεις ακτίνες.

Μορφή τάσης	Σχήμα	W σε eV
1,2/50μs	1.7.1-1	=10,50
10/200μs	1.7.1-2	=1,60
250/2500μs	1.7.1-4	=0,16

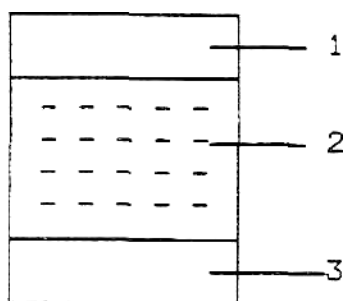
**Πίνακας 1.8.1-2 :** Τιμές ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά το πρώτο άλμα δυναμικού

Περισσότερες πληροφορίες για το μηχανισμό γήρανσης έχουν δοθεί από παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου. Πράγματι από το παλμογράφημα του σχήματος 1.8.1-5 φαίνεται ότι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την άνοδο υπό μορφή ομάδων, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν σε ιονισμό με κρούσεις. Έτσι, όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια φτάνουν στην άνοδο, εξαναγκάζονται σε επιβράδυνση αποδίδοντας το περίσσειμα της ενέργειας τους (ανάλογα με την ενεργειακή στάθμη που είχαν) σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία(πίνακας 1.8.1-2). Ο δενδρίτης επομένως, που παρατηρείται, είναι το ορατό φάσμα της παραπάνω ακτινοβολίας. Μπορούμε, να υποθέσουμε, ότι αντίστοιχες δενδροειδούς μορφής εκπομπές συμβαίνουν και σε άλλες περιοχές του φάσματος της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου (σχήμα 1.8.1-5) φαίνεται επίσης, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης (κατά την αύξηση της τάσης παρατηρείται μείωση του ρεύματος). Η αντίσταση αυτή, που προηγείται του ιονισμού με κρούσεις, δίνεται αναλυτικότερα στην χαρακτηριστική "ρεύματος-τάσης" του σχήματος 1.8.1-10.



**Σχήμα 1.8.1-10 :** Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης κατά το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου του σχήματος 1.8.1-4

Από τα παραπάνω μπορεί να καταλήξει κανείς στο συμπέρασμα ότι μία διαδρομή της δένδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξη τους στην άνοδο προκάλεσαν εκπομπή του ίδιου μήκους κύματος). Μπορούμε να υποθέσουμε, λόγω του εύρους της παραπάνω ακτινοβολίας, ότι υπάρχουν στο υλικό διάφορες ενεργειακές στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη, που είναι καθοριστικής σημασίας για την εκδήλωση του ιονισμού (σχήμα 1.8.1-11). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα 1.8.1-7). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



**Σχήμα 1.8.1-11 :** Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

- 1 : ζώνη αγωγιμότητας
- 2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη
- 3: ζώνη σθένους

Από πρόσφατες έρευνες, που έχουν γίνει κατά τη γήρανση στερεών μονωτικών των πρακτικών εφαρμογών, υπό εναλλασσόμενη (ή συνεχή) τάση καταπόνησης, διαπιστώνεται επίσης η εκπομπή του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που έχει προαναφερθεί για την τεχνητή γήρανση με κρουστικές τάσεις. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καταπόνησης ο υπολογισμός της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (πάνω από την ενέργεια Fermi) μπορεί να γίνει, κατά την εκδήλωση αλμάτων δυναμικού, με την σχέση 1.8.1-3.

### **1.8.2. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση**

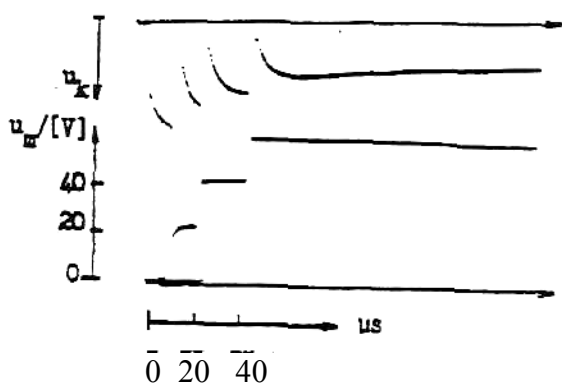
Η διάτρηση έχει διερευνηθεί με καταπονήσεις στερεών μονωτικών με σχετική διηλεκτρική σταθερά περίπου 2,5-4,5 (διάφορα χαρτιά μετασηματιστών, πεπιεσμένο χαρτί, βακελίτης, pertinax, πανίτης κλπ). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs κλπ). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Παρακάτω εξετάζεται ένα παράδειγμα με κρουστικές τάσεις, ώστε να υπάρχουν συγκρίσιμες

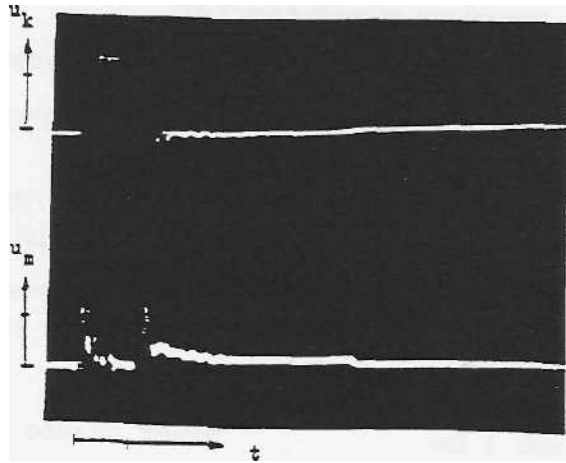
μετρήσεις με εκείνες της γήρανσης κατά την προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, οι μετρήσεις έγιναν σύμφωνα με τη διάταξη πειραματισμού του σχήματος 1.8.1-5. Τυπικά παλμογράφημα του φαινομένου δίνονται στα σχήματα 1.8.2-1 και 1.8.2-2. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων ( $W$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 1.8.1-3, όπως και κατά την γήρανση. Έτσι, για το πρώτο π.χ. άλμα δυναμικού και  $R=0,5\Omega$  (που ήταν η αντίσταση από τον πυκνωτή μέτρησης μέχρι και το ηλεκτρόδιο γείωσης) η τιμή  $W$  υπολογίζεται ότι είναι περίπου  $105eV$ . Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτινών  $X$ .

Από το παλμογράφημα των κρούσεων φορτίου παρατηρεί κανείς την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης. Ο αριθμός των κρούσεων περιορίζεται ως προς εκείνον κατά τη γήρανση, αλλά η τιμή του ρεύματος αυξάνει σημαντικά (συγκρίνατε με το παλμογράφημα του σχήματος 1.8.1-3). Μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι ο μηχανισμός της διάτρησης έχει τα ίδια γνωρίσματα με εκείνον της γήρανσης.

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



**Σχήμα 1.8.2-1** : Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους  $1mm$ ) εντός μονωτικού ελαίου. Κρουστική τάση :  $1,2/50\mu s$ .  $R$  της ακίδας  $1mm$ .  $U_K$  :  $85kV$ .  $E$  :  $1,2MV/cm$ .  $C_m$  :  $1835nF$ .



**Σχήμα 1.8.2-2** : Τυπικό παλμογράφημα κρούσεων φορτίου κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση. R της ακίδας 1 mm. Μορφή τάσης 1,2/50μs.  $U_k=85KV$ .  $E=1,2MV/cm$   $R_m=150\Omega$ .  $u_m$  : 20V/div .  $t$  : 2μs/div

### **1.8.3. Θεωρητική προσέγγιση του ιονισμού με κρούσεις προ και κατά τη διάτρηση στερεών μονωτικών**

Ένα σημαντικότατο συμπέρασμα, από την θεωρητική μελέτη του ιονισμού με κρούσεις στα στερεά μονωτικά δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$Q = Q_0 e^{A(E \cdot E - E_0 \cdot E_0) / E_0 \cdot E_0} \quad (1.8.3-1)$$

όπου (κατά το σχήμα 1.4-2):

- $E_0$  η πεδιακή ένταση έναρξης των μερικών εκκενώσεων ( $E > 0,2MV/cm$ ) και  $Q_0$  το φορτίο κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων.
- $E$  η εφαρμοζόμενη πεδιακή ένταση, λόγω της οποίας το φορτίο αποκτά την τιμή  $Q$ .
- $A$  ένας συντελεστής του υλικού, που εξαρτάται από τον χρόνο.

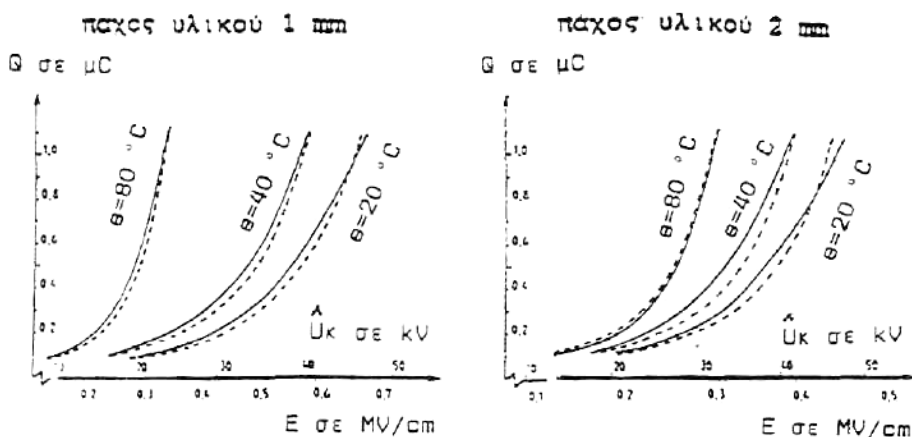
Με βάση την σχέση αυτή έχει γίνει μία προσέγγιση πειραματικών χαρακτηριστικών  $Q = f(\hat{U}k)$  κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm ή 2mm) με κρουστικές τάσεις χειρισμών (μορφή 250/2500μs), η οποία (ως γνωστό από τον πίνακα 1.4-1) προκαλεί μόνο εσωτερικές μερικές εκκενώσεις. Η διάταξη, που έγιναν τα πειράματα, έχει δοθεί απλοποιημένα στο σχήμα 1.8.1-5. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20°C, 40°C και 80°C), ώστε :

α) να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση της θερμοκρασίας στη παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, και

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

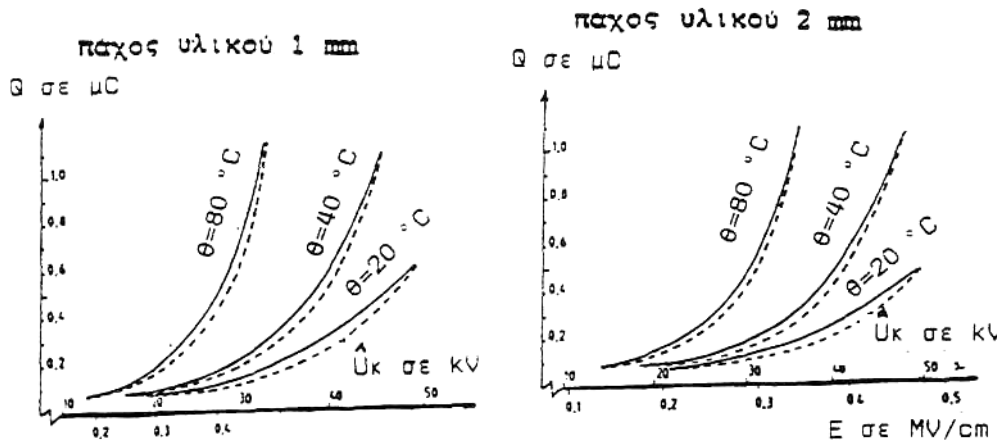
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι πειραματικές χαρακτηριστικές για δύο μονωτικά καθώς και οι θεωρητικές χαρακτηριστικές κατά την σχέση 1.8.3-1, (με προσδιορισμό του συντελεστή A για κάθε υλικό). Όπως φαίνεται, υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ θεωρίας και πειραμάτων. Η θεωρητική προσέγγιση έδειξε ότι:

- 1) οι μερικές εκκενώσεις αρχίζουν σε τιμές πεδίου περίπου  $E = 0,2 \text{ MV/cm}$ .
- 2) για τιμές πεδίου περίπου μέχρι  $0,5 \text{ MV/cm}$  η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$ .
- 3) για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως ισχύει η σχέση 1.8.3-1, με αποτέλεσμα να μπορεί να υποθέσει κανείς, ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις.
- 4) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ενισχύει σημαντικά τα φαινόμενα ιονισμού. Φαίνεται ότι η σχέση, που διέπει τον συνδυασμό των μερικών εκκενώσεων με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος φαίνεται στο σχήμα 1.8.3-1.



**Σχήμα 1.8.3-1** : Χαρακτηριστικές  $Q=f\{U_K\}$  για το pertinax εντός μονωτικού ελαίου), υπό κρουστικές τάσεις 250/2500 . Διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα.  $A=0,48$ .

Από την μεγάλη αύξηση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων με τη θερμοκρασία του μονωτικού ελαίου, που στη πράξη γίνεται αντιληπτή σε συνδυασμούς "στερεό-υγρό μονωτικό" με την αρκετά μεγάλη  $tg\delta$ , φαίνεται ότι θα πρέπει να γίνει μία βελτίωση των προδιαγραφών ως προς τη δοκιμή υπερθέρμανσης. Με τυπικό παράδειγμα τους μετασχηματιστές ελαίου (και ιδιαίτερα τους μετασχηματιστές έντασης του δικτύου μεταφοράς, που ως γνωστό από την πράξη παρουσιάζουν προβλήματα κατά την αύξηση της  $tg\delta$ ), κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιούνται οι διηλεκτρικές δοκιμές αμέσως μετά το πέρας της δοκιμής υπερθέρμανσης (ή δοκιμής ανύψωσης της θερμοκρασίας). Κατά τον τρόπον αυτόν θα συνεξετάζεται δηλαδή η πιθανή εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στα ανεκτά όρια της θερμοκρασιακής κατάστασης του μετασχηματιστή ( $80^\circ\text{C}$ ).

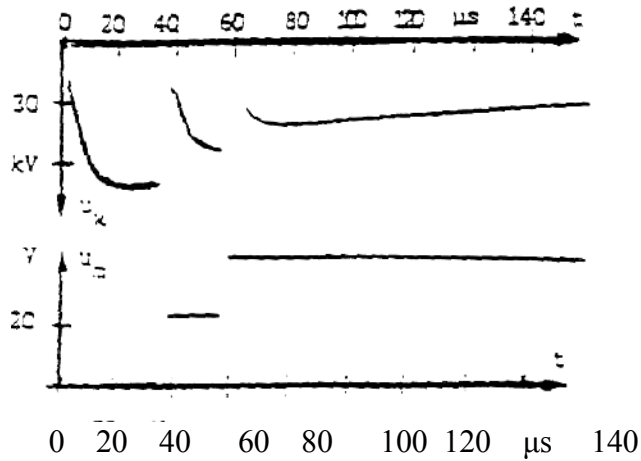


**Σχήμα 1.8.3-2** : Χαρακτηριστικές  $Q=f(U_k)$  για τον βακελίτη εντός μονωτικού ελαίου.

#### **1.8.4. 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 ισχύει ότι και προηγουμένως για τον μηχανισμό της γήρανσης και της διάτρησης. Παρακάτω εξετάζεται (για λόγους σύγκρισης με τη διάτρηση) ένα τυπικό παράδειγμα επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών πάχους 2mm σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, υπό κρουστικές τάσεις 10/200 $\mu\text{s}$  και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα (βλέπετε σχήμα 1.8.1-5). Δεν θα γίνει αναφορά στα παλμογραφήματα της γήρανσης, γιατί είναι προφανές ότι τα φαινόμενα δεν εξαρτώνται, με το αν θα ακολουθήσει η διάτρηση ή η επιφανειακή διάσπαση. Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος 1.8.4-1 υπολογίζεται με την σχέση 1.8.1-3 η ενέργεια  $W$  των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Η ενέργεια αυτή για το πρώτο και το τελευταίο άλμα δυναμικού είναι αντίστοιχα : 122eV και 96,5eV. Όπως φαίνεται η επιφανειακή διάσπαση σχετίζεται (όπως και η διάτρηση) με την εκπομπή μαλακών ακτίνων X.

Αν τελικά συμβαίνει εκπομπή ακτίνων X κατά τη διάτρηση και την επιφανειακή διάσπαση, τότε θα πρέπει να προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και να απεικονίζονται αντικείμενα (όπως π.χ. συμβαίνει με τις λυχνίες των ακτινολογικών μηχανημάτων). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας (τουλάχιστον σε τιμές πεδίου πλησίον της διάσπασης, όπου αυτή να είναι αρκετά eV). Από πειράματα που έγιναν για τον σκοπό αυτό, φαίνεται ότι προσβάλλεται το φωτογραφικό φιλμ και απεικονίζονται αντικείμενα, καθώς και βιολογικοί οργανισμοί. Στα σχήματα 1.8.4-2, 1.8.4-3 και 1.8.4-5 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές. Επίσης, στα σχήματα 1.8.4-4 και 1.8.4-5 δίνονται φωτογραφίες επιφανειακών δενδριτών, που αφορούν αντίστοιχα τη γήρανση και τη διάσπαση. Οι παραπάνω φωτογραφίες αφορούν την επιφανειακή διάσπαση δοκιμίων (πάχους 1 έως 2mm και διαμέτρου 150mm), υπό κρουστικές τάσης 1,2/50 $\mu\text{s}$  σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα. Οι φωτογραφίες στο σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου, καθώς και εκείνες της διάτρησης (στον αέρα ή στο λάδι), οδηγούν στα ίδια συμπεράσματα.

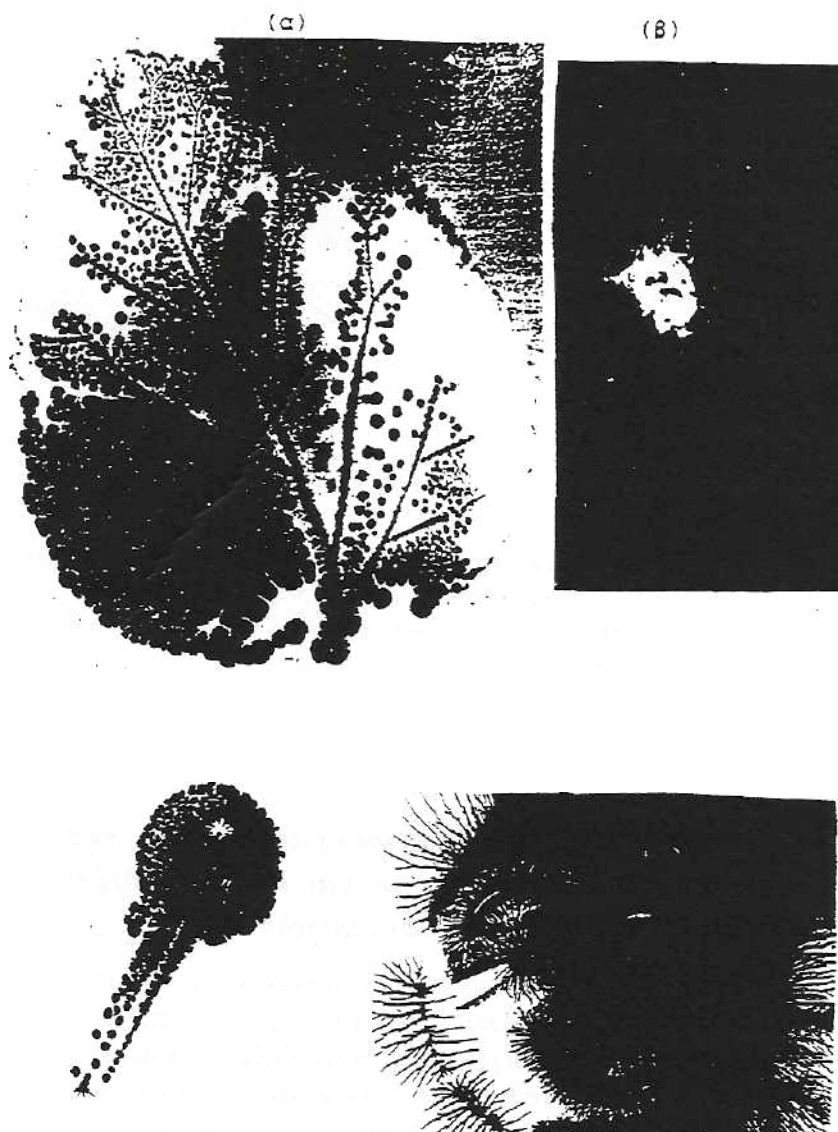


**Σχήμα 1.8.4-1:** Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειας του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : "ακίδα-πλάκα".



**Σχήμα 1.8.4-2 :** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την καταπόνηση πολυμερούς στερεού μονωτικού πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs. (φωτογράφιση ενός φύλλου δένδρου)

Σχετικά με την απεικόνιση των δενδριτών στο φωτογραφικό φιλμ μπορούμε να υποθέσουμε, ότι ο δενδρίτης στη φωτογραφία του σχήματος 1.8.4-4 σχετίζεται με την υπεριώδη ακτινοβολία, ενώ εκείνος του σχήματος 1.8.4-5 με υπεριώδεις ακτίνες και ακτίνες X. Κατά τον τρόπο αυτό δίνεται μία φυσική ερμηνεία για τις γνωστές εικόνες Lichtenberg. Μπορεί επίσης να συμπεράνει κανείς, ότι ο φωτεινός δενδρίτης και ο σχετός διάσπασης, που παρατηρούνται κατά την ηλεκτρική καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού, αφορούν το ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στο υλικό.



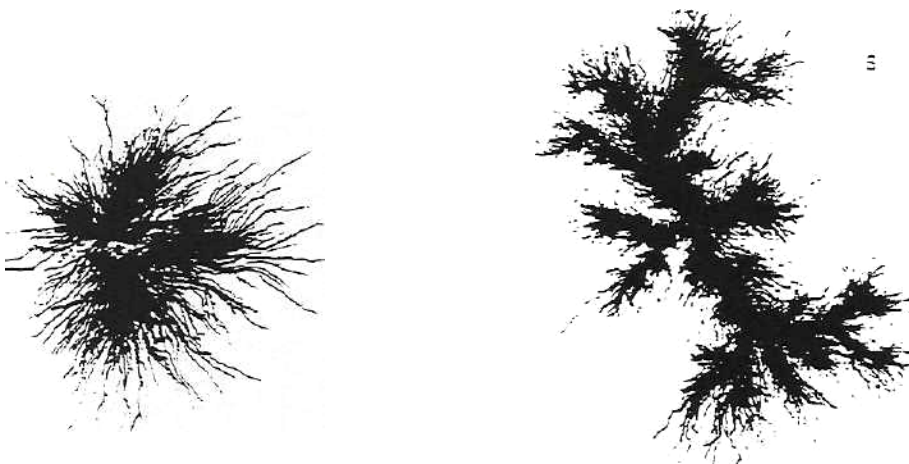
**Σχήμα 1.8.4-3:** Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση  $1,2/50\mu\text{s}$ . Διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα.

- α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου
- β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).
- γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.





**Σχήμα 1.8.4-4 :** Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα( πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση  $1,2/50\mu\text{s}$  (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).



**Σχήμα 1.8.4-5 :** Φωτογραφίες δενδριτών κατά την καταπόνηση πολυμερών στερεών μονωτικών στον αέρα, υπό κρουστική τάση  $1,2/50\mu\text{s}$  (διάταξη ηλεκτροδίων: ακίδα-πλάκα). α) Δενδρίτης σε τιμές πεδίου πλησίον της περιοχής τιμών για την επιφανειακή διάσπαση), β) Δενδρίτης κατά την επιφανειακή διάσπαση.

## 1.9. Συνδυασμοί των παραγόντων γήρανσης και διάτρησης

Σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1.7 τα φαινόμενα προ και κατά τη διάτρηση των στερεών μονωτικών μπορούν να αποδοθούν σε τέσσερις βασικούς παράγοντες αποσταθεροποίησης των μορίων (απώλειες Joule, δυνάμεις Coulomb μερικές εκκενώσεις και θερμότητα του περιβάλλοντος), οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως παράγοντες γήρανσης και διάτρησης. Οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται στην πράξη με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με την περίπτωση καταπόνησης του στερεού μονωτικού.

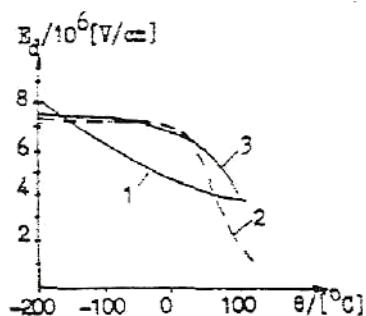
### **α) Ο συνδυασμός της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου με τους άλλους παράγοντες γήρανσης και διάτρησης**

Όπως είναι γνωστό, οι διεθνείς προδιαγραφές προσδιορίζουν τα ανώτερα όρια υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών κατασκευών υψηλής τάσης, βάσει των οποίων καθορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (δοκιμή υπερθέρμανσης ή ανύψωσης θερμοκρασίας). Έτσι, έχει γίνει αποδεκτό κάποιο όριο θέρμανσης, που είναι π.χ. της τάξης των 40-50°C στο λάδι, λόγω του οποίου, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οριακή θερμοκρασία λειτουργίας να είναι της τάξης των 80-90°C. Όταν όμως συντρέχουν λόγοι μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής από άλλους παράγοντες, η θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου ενισχύει συνήθως το ρόλο τους, γιατί:

- 1) Αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα ( $\sigma = \sigma_0 e^{-W/Kt} = \sigma_0 e^{\beta\theta}$  όπου  $\sigma_0$  : η ειδική ηλεκτρ. αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας  $\theta$  ως προς το περιβάλλον,  $\sigma$  : η αρχική ηλεκτρ. αγωγιμότητα,  $W$  : η ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη μεταφοράς,  $k$  : η σταθερά Boltzmann,  $\beta$  : ένας συντελεστής του υλικού).
- 2) Διευκολύνεται η εξάσκηση δυνάμεων Coulomb, γιατί οι δεσμοί στο πλέγμα των μορίων των πολυμερών υλικών γίνονται ασθενέστεροι.
- 3) Ενισχύεται ο ρόλος των μερικών εκκενώσεων, λόγω μεγαλύτερης ευκινησίας των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, κυρίως στις φυσαλίδες αερίου.

Έτσι, αυξάνει διαχρονικά η  $tgd$  και μειώνεται η διάρκεια ζωής του στερεού μονωτικού και των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών γενικότερα. Η καταπόνηση, που υφίσταται το στερεό μονωτικό, ανάλογα με τη θερμότητα του περιβάλλοντος μέσου του φαίνεται ότι προκαλεί μείωση της τάσης για την θερμική διάτρηση, λόγω αύξησης της αγωγιμότητας του. Επίσης, με την παραδοχή ότι στα στερεά μονωτικά εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις κατά τη δένδροειδή ή την ηλεκτρομηχανική διάτρηση, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ισχύει μία σχέση σύμφωνα με την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας σημαίνει μείωση του μέσου ελεύθερου μήκους ( $\lambda$ ) των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια). Γι' αυτό, η αύξηση της θερμότητας του περιβάλλοντος μέσου φαίνεται ότι προκαλεί μείωση και της τιμής της τάσης για την ηλεκτρική διάτρηση.

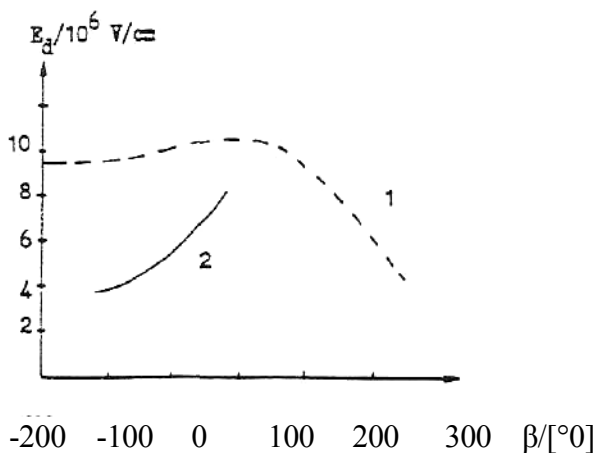
Στο σχήμα 1.9-1 δίνονται παραδείγματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής διαφόρων μονωτικών υλικών, λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, η οποία μπορεί να ερμηνευθεί από τον παραπάνω συνδυασμό της επίδρασης της θερμότητας του περιβάλλοντος με τους υπόλοιπους παράγοντες γήρανσης και διάσπασης.



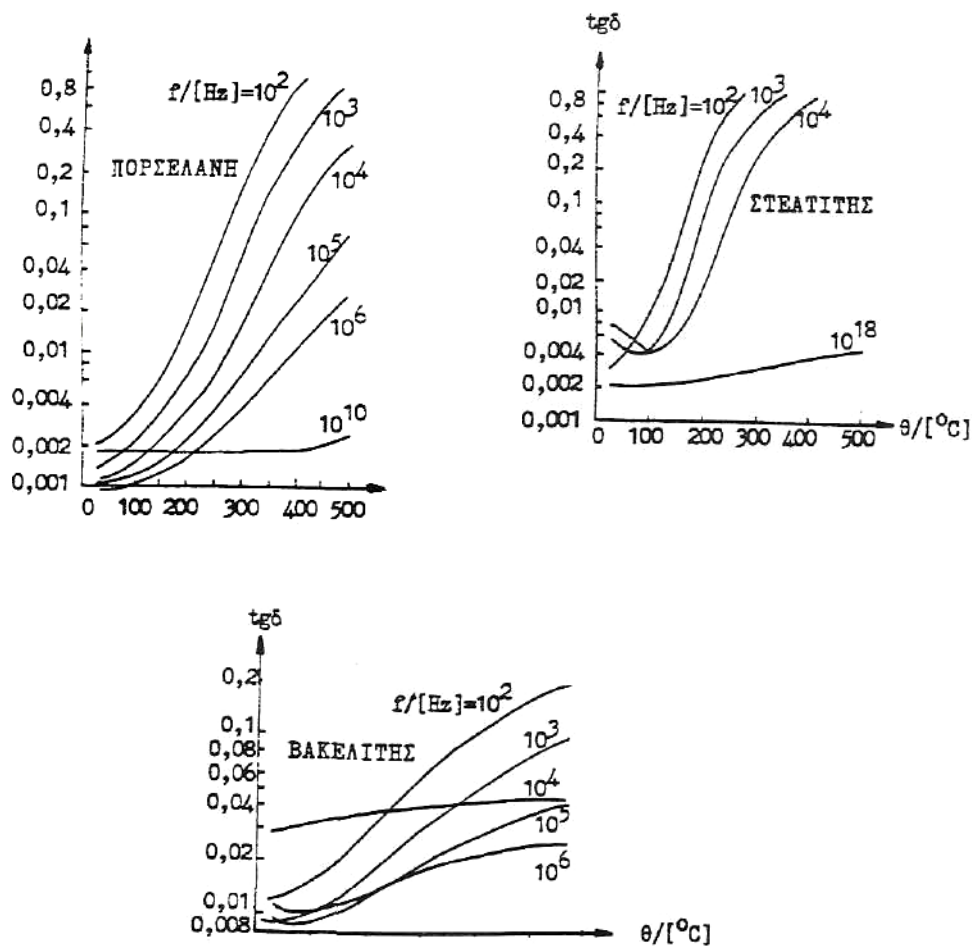
**Σχήμα 1.9-1 :** Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στερεά μονωτικά κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου. 1 : Βακελίτης, 2 : Πολυαιθυλένιο, 3 : Πολυστετυρόλη

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στερεών μονωτικών υλικών όπου η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος δεν οδηγεί σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής, τουλάχιστον σε κάποια περιοχή τους. Στο σχήμα 1.9-2 φαίνονται δύο παραδείγματα που ανήκουν στην περίπτωση αυτή. Μία ερμηνεία, για τη διαφορετική αυτή ανασύνδεση της μίκας (Glimmer) και του χαλαζία (Quarz) μπορεί να αποδοθεί σε αλληλεξουδετέρωση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Αποτέλεσμα της παραπάνω εξουδετέρωσης φαίνεται ότι είναι η μείωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και κατά συνέπεια η αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής. Στη μίκα παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό μεταξύ  $-200$  έως  $100^{\circ}\text{C}$  ενώ στο χαλαζία εκδηλώνεται μόνο αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής για τις θερμοκρασίες που δίνονται στο σχήμα.

Οι χαρακτηριστικές  $ig\delta=f(\theta)$  διαφόρων στερεών μονωτικών (σχήμα 1.9-3), δείχνουν επίσης την αύξηση των συνολικών απωλειών με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, λόγω των οποίων μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή.



**Σχήμα 1.9-2 :** Διηλεκτρική αντοχή της μίκας (1) και του κρυστάλλου χαλαζία (2) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



**Σχήμα 1.9-3 :**  $tg\delta=f(\theta)$  σε διάφορα στερεά μονωτικά.

Η μείωση των απωλειών που παρατηρείται σε κάποια περιοχή ορισμένων χαρακτηριστικών του σχήματος 1-9-3, κατά την αύξηση της θερμοκρασίας και της συχνότητας, μπορεί ίσως να αποδοθεί σε επανασύνδεση των παραγόμενων φορέων. Πρόσφατες μετρήσεις με κρουστικές τάσεις σε στερεά μονωτικά, κατά την καταπόνησή τους σε διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (20°C, 40°C και 80°C), οδηγούν επίσης στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας (και επομένως η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής) είναι δεδομένη, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

## 1.10. Ένας συνδυασμός της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τα φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών

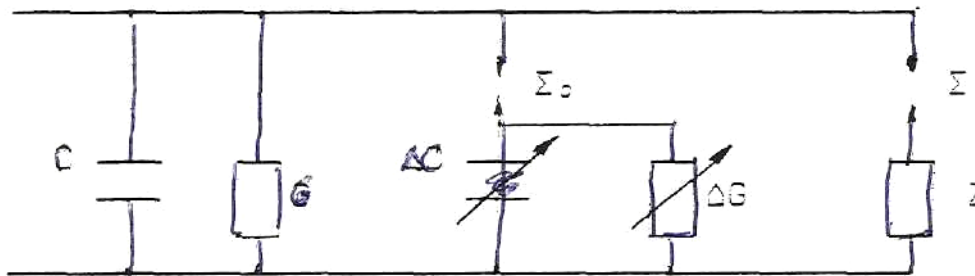
Από τα αναφερόμενα στο κεφάλαιο 1.8 φαίνεται, ότι η κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών δίνει πληροφορίες για το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που παράγεται στα υλικά αυτά κατά την ηλεκτρική καταπόνηση τους. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούν να εξαχθούν από τη μακροσκοπική θεώρηση των παραπάνω φαινομένων. Πλεονέκτημα όμως της μακροσκοπικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάσπαση των στερεών μονωτικών φαίνεται ότι είναι ο διαχωρισμός μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών μερικών εκκενώσεων στο διάγραμμα της χρονικής μεταβολής της εφαρμοζόμενης τάσης, που ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην πράξη. Ο διαχωρισμός αυτός των μερικών εκκενώσεων δεν μπορεί να δοθεί από την θεωρία του ιονισμού με κρούσεις, γιατί ο συντελεστής  $A$  στην σχέση 1.8.3-1 αφορά το μονωτικό και όχι το περιβάλλον του και η τιμή της θα πρέπει να εξαρτάται από την διαχρονική μεταβολή της μοριακής δομής του υλικού. Αν π.χ. πραγματοποιήσει κάποιες δοκιμές με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs (ή με 10/200μs) και προσεγγίσει ακολούθως τις πειραματικές χαρακτηριστικές  $Q=f(U_K)$  με την σχέση 1.8.3-1, θα διαπιστώσει ότι ο συντελεστής  $A$  έχει διαφορετική τιμή, από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 250/2500μs. Η διαφορετική αυτή τιμή του συντελεστή  $A$  (κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις 1,2/50μs, ή 10/200μs) μπορεί να θεωρηθεί μόνο ως μία ένδειξη ότι συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, χωρίς όμως να καθορίζεται η περιοχή εκδήλωσης του (στον όγκο του μονωτικού, ή στην επιφάνεια του, ή στον όγκο και στην επιφάνεια του μονωτικού). Γι' αυτό, δεν μπορεί να καταλήξει κανείς, μέσω της κβαντομηχανικής θεώρησης των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών, στον διαχωρισμό των μερικών εκκενώσεων στα παλμογραφήματα των αλμάτων δυναμικού.

Από το παραπάνω φαίνεται, ότι για την ερμηνεία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών χρειάζεται να συνδυαστούν οι δύο θεωρίες, ώστε να δίνουν περισσότερες πληροφορίες για την πράξη. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα, που έχει προταθεί για τον σκοπό αυτό, δίνεται στο σχήμα 1.10-1. Πρόκειται ουσιαστικά για μία συμπλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant-Philippoff (σχήμα 1.8.1-7), όπου όμως η τιμή του εφαρμοζόμενου πεδίου έχει σημασία για την εκδήλωση των επιμέρους φαινομένων. Αν υποθέσει κανείς, ότι η έναρξη των μερικών εκκενώσεων συμβαίνει στην τιμή της πεδιακής  $E_0$  (κατά την παράγραφο 1.8.3 περίπου 0,2MV/cm), τότε, τα φαινόμενα, που εκδηλώνονται στο μονωτικό, αποδίδονται από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.10-1 ως ακολούθως:

- 1) Για  $E < E_0$  : Η συμπεριφορά του υλικού είναι ιδανική (δεν διασπώνται οι σπινθηριστές  $\Sigma_0$  και  $\Sigma$ ).
- 2) Για  $E > E_0$  : Εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (διασπάται ο  $\Sigma_0$ ) και η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διέπεται από την σχέση  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$ .
- 3) Για  $E \gg E_0$  : Εμφανίζεται αρνητική διαφορική αντίσταση και εκδηλώνεται ιονισμός με κρούσεις. Δεν ισχύει η σχέση  $\sigma = \sigma_0 \exp(-W/kT)$ , αλλά η σχέση :

$$Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$$

Το φάσμα της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται, εξαρτάται από την τιμή  $E$ . Για τιμές  $W > 20$  eV συμβαίνει η διάτρηση.



**Σχήμα 1.10-1:** Ένα ισοδύναμο κύκλωμα συνδυασμού της μακροσκοπικής και της κβαντομηχανικής θεωρίας για τη γήρανση και τη διάτρηση.

- C : ιδανική χωρητικότητα
- G : ιδανική αγωγιμότητα
- ΔC : αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
- ΔG : αύξηση της αγωγιμότητας λόγω μερικών εκκενώσεων
- Z : αρνητική διαφορική αντίσταση
- Σ : σπινθηριστής έναρξης των μερικών εκκενώσεων
- Σ₀ : σπινθηριστής εκδήλωσης της Z

## 2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ

Κύριος σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η εκμετάλλευση των στατιστικών μεγεθών που αφορούν, είτε μεγέθη που ελήφθησαν απευθείας, όπως τα φορτία προ και μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων ή επιβλήθηκαν, όπως η κρουστική τάση, είτε μεγέθη που υπολογίσαμε, όπως η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ , η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα άλματα δυναμικού κ.ά ηλεκτρικά μεγέθη που θα δούμε παρακάτω.

Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των στατιστικών μετρήσεων θα μας βοηθήσουν να καταλήξουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά των ηλεκτρομονωτικών υλικών και τις σχέσεις μεταξύ σημαντικών παραγόντων που επιδρούν στα ηλεκτρομονωτικά υλικά. Τα συμπεράσματα αυτά παράλληλα με κβαντομηχανική θεωρία των φυσικών φαινομένων θα μας δώσουν την δυνατότητα εμβάθυνσης στα φαινόμενα που παρατηρούνται στα βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά. Τότε θα είμαστε σε θέση να ερμηνεύσουμε τα φαινόμενα και κατ' επέκταση να επιλέγουμε τα κατάλληλα μονωτικά υλικά ανάλογα με τη χρήση της κατασκευής, αλλά και τις απαιτήσεις που τη συνοδεύουν. Επίσης όμως θα μπορέσουμε να αντιληφθούμε τα αποτελέσματα της χρήσης της τεχνολογίας, εξαιτίας της ακρίβειας και της ευκολίας που μας παρέχει. Τα πλεονεκτήματα που μας παρέχει η τεχνολογία στον τομέα των υψηλών τάσεων, θα γίνουν αντιληπτά μέσα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και την επεξεργασία τους.

Ανάμεσα στους σκοπούς μας βρίσκεται και ο προσδιορισμός ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία θα μας βοηθήσουν να αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά του ηλεκτρομονωτικού υλικού. Χρήσιμα μεγέθη που θα υπολογιστούν είναι τα άλματα δυναμικού, η ενέργεια, η συχνότητα κ.ά, ενώ μεγέθη που μετρήθηκαν είναι τα φορτία και οι χρόνοι έναρξης και περαίωσης των μερικών εκκενώσεων. Σε όλα αυτά τα μεγέθη θα δούμε τον τρόπο που σχετίζονται με την επιβαλλόμενη κρουστική τάση  $U_k$  και την ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου  $E$ . Η σχέση αυτή θα γίνει αντιληπτή μέσα από τις χαρακτηριστικές των συσχετιζόμενων μεγεθών. Συγκεντρωτικά οι στόχοι μας σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι :

- Η κατανόηση των φαινομένων που παρατηρούνται κατά τη μερική εκκένωση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών .
- Υπολογισμός της πεδιακής έντασης και των κριτηρίων αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών.
- Η παρατήρηση φαινομένων μέσα από τις χαρακτηριστικές των μεγεθών και η σύγκριση των επιμέρους αποτελεσμάτων.

### 3. ΠΙΝΑΚΕΣ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ

Παρακάτω παρατίθενται όλοι οι πίνακες και οι χαρακτηριστικές, οι οποίες αποτελούν έναν από τους βασικότερους σκοπούς της διπλωματικής αυτής εργασίας. Οι χαρακτηριστικές, του κάθε μεγέθους, περιλαμβάνουν και τις αποκλίσεις του(θετική και αρνητική). Για λόγους διευκόλυνσης παρατίθενται σχέσεις με τις οποίες υπολογίστηκαν τα ηλεκτρικά μεγέθη και συμπληρώθηκαν οι πίνακες που ακολουθούν.

$$\Delta W = 0,5 \cdot (\Delta Q / C_m) \cdot K \quad (\text{eV}) \quad (3-1) \quad \text{όπου} \quad C_m = 1000 \text{nf} \quad \text{και} \quad K = 5,51$$

$$\Delta U_m = \Delta Q / C_m \quad (\text{KV}) \quad (3-2)$$

$$f = 0,5 \cdot (\Delta Q / C_m) \cdot K \cdot (1/h) \quad (\text{Hz}) \quad (3-3) \quad \text{όπου} \quad h = 6,62 \cdot 10^{-23}$$

$$\lambda = 2 \cdot C \cdot (\Delta Q / C_m) \cdot K \cdot h \quad (\text{m}) \quad (3-4) \quad \text{όπου} \quad C = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$E = 2 \cdot U_k \cdot ((R \cdot \ln(4 \cdot d/R))) \quad (\text{MV/cm}) \quad (3-5) \quad \text{όπου} \quad R = 0,9 \text{mm}$$



### 3.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=1\text{mm}$

U (KV)	U <sub>κ</sub> (KV)	T <sub>1</sub> (μs)	T <sub>2</sub> (μs)	Q <sub>1</sub> (μC)	Q <sub>2</sub> (μC)	U <sub>ev</sub> (KV)	T (μs)	Q (μC)	(Q/T)*10 <sup>-3</sup> (μC/μs)
15	10.12	-	-	0.013	-	-	-	-	-
		-	-	0.0004	-	-	-	-	-
20	13.38	261	326.2	0.018	0.024	11.58	65.25	0.006	0.466
		124.01	44.2	0.001	0.002	1.28	8.27	0.008	0.29
25	16.85	120.6	231.18	0.021	0.044	12.34	110.53	0.024	0.504
		76.15	19.31	0.004	0.004	2.75	59.8	0.004	0.5
30	20.34	56.7	210.6	0.021	0.085	14.23	153.5	0.063	0.441
		6.88	39.9	0.002	0.009	0.66	29.7	0.009	0.15
35	23.17	62.77	270	0.025	0.188	17.62	207.22	0.103	0.849
		22.75	72.9	0.005	0.017	1.4	64.2	0.01	0.21
40	27.4	49.95	294.5	0.028	0.235	18.92	244.35	0.207	0.974
		6.88	82.73	0.002	0.007	0.65	82.49	0.007	0.36
45	30.55	51.97	310.48	0.026	0.383	18.35	258.5	0.356	1.409
		10.56	54.93	0.001	0.021	1.64	188.85	0.022	0.21
50	34.2	40.5	233.55	0.044	0.6	19.6	193.05	0.556	3.009
		4.26	52.56	0.013	0.025	0.71	49.52	0.03	0.77
55	37.4	39.15	291.6	0.03	0.836	20.76	252.45	0.806	3.373
		10.8	57.6	0.002	0.068	1.39	62.39	0.066	0.78
60	40.68	30.37	286.2	0.041	1.039	23.81	255.82	0.997	3.974
		5.22	32.4	0.021	0.091	1.28	34.7	0.1	0.64
65	44.46	25.65	295.6	0.051	1.14	25.48	270	1.075	4.041
		5.05	28.76	0.029	0.053	2.23	27.33	0.09	0.65

$U_K$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta U_m$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
13.38	1000	5.51	0.006	0.000006	1.653E-05	4.00E+09	7.49E-02	0.199
			0.001	0.000001	2.755E-06	6.67E+08	4.49E-01	0.199
16.85	1000	5.51	0.023	0.000023	6.337E-05	1.53E+10	1.95E-02	0.251
			0	0	0	0.00E+00	-	0.251
20.34	1000	5.51	0.064	0.000064	0.0001763	4.27E+10	7.02E-03	0.303
			0.007	0.000007	1.929E-05	4.67E+09	6.42E-02	0.303
23.17	1000	5.51	0.163	0.000163	0.0004491	1.09E+11	2.76E-03	0.345
			0.012	0.000012	3.306E-05	8.00E+09	3.75E-02	0.345
27.4	1000	5.51	0.207	0.000207	0.0005703	1.38E+11	2.17E-03	0.408
			0.005	0.000005	1.378E-05	3.34E+09	8.99E-02	0.408
30.55	1000	5.51	0.357	0.000357	0.0009835	2.38E+11	1.26E-03	0.455
			0.02	0.00002	0.0000551	1.33E+10	2.25E-02	0.455
34.2	1000	5.51	0.556	0.000556	0.0015318	3.71E+11	8.08E-04	0.510
			0.012	0.000012	3.306E-05	8.00E+09	3.75E-02	0.510
37.4	1000	5.51	0.806	0.000806	0.0022205	5.38E+11	5.58E-04	0.557
			0.066	0.000066	0.0001818	4.40E+10	6.81E-03	0.557
40.68	1000	5.51	0.998	0.000998	0.0027495	6.66E+11	4.50E-04	0.606
			0.07	0.00007	0.0001929	4.67E+10	6.42E-03	0.606
44.46	1000	5.51	1.089	0.001089	0.0030002	7.26E+11	4.13E-04	0.662
			0.024	0.000024	6.612E-05	1.60E+10	1.87E-02	0.662

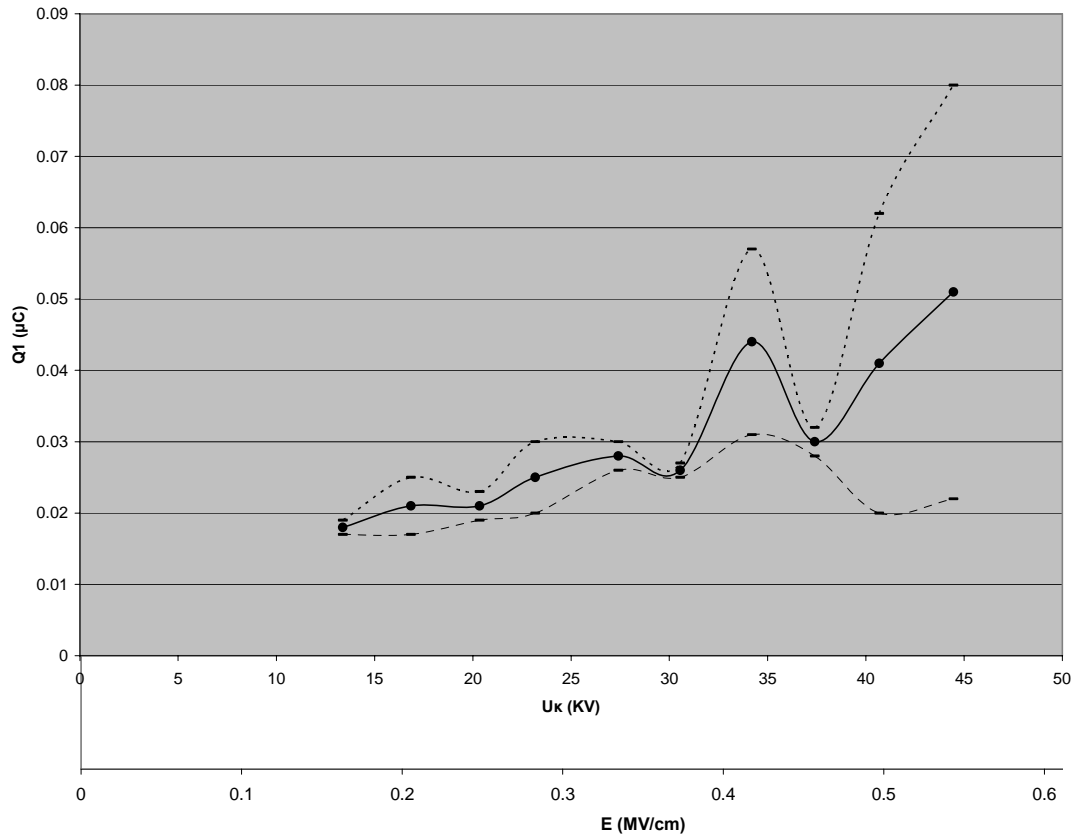
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta U_m$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}C$  – πάχος δοκιμίου d=1mm.

$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$Q_2$ ( $\mu C$ )	$W_2$ (eV)	$f_2$ (Hz)	$\lambda_2$ (m)	E (MV/cm)
13.38	1000	5.51	0.024	6.612E-05	1.60E+10	1.87E-02	0.199
			0.002	5.51E-06	1.33E+09	2.25E-01	0.199
16.85	1000	5.51	0.044	0.0001212	2.94E+10	1.02E-02	0.251
			0.004	1.102E-05	2.67E+09	1.12E-01	0.251
20.34	1000	5.51	0.085	0.0002342	5.67E+10	5.29E-03	0.303
			0.009	2.48E-05	6.00E+09	4.99E-02	0.303
23.17	1000	5.51	0.188	0.0005179	1.25E+11	2.39E-03	0.345
			0.017	4.684E-05	1.13E+10	2.64E-02	0.345
27.4	1000	5.51	0.235	0.0006474	1.57E+11	1.91E-03	0.408
			0.007	1.929E-05	4.67E+09	6.42E-02	0.408
30.55	1000	5.51	0.383	0.0010552	2.55E+11	1.17E-03	0.455
			0.021	5.786E-05	1.40E+10	2.14E-02	0.455
34.2	1000	5.51	0.6	0.001653	4.00E+11	7.49E-04	0.510
			0.025	6.888E-05	1.67E+10	1.80E-02	0.510
37.4	1000	5.51	0.836	0.0023032	5.58E+11	5.38E-04	0.557
			0.068	0.0001873	4.54E+10	6.61E-03	0.557
40.68	1000	5.51	1.039	0.0028624	6.93E+11	4.33E-04	0.606
			0.091	0.0002507	6.07E+10	4.94E-03	0.606
44.46	1000	5.51	1.14	0.0031407	7.60E+11	3.94E-04	0.662
			0.053	0.000146	3.54E+10	8.48E-03	0.662

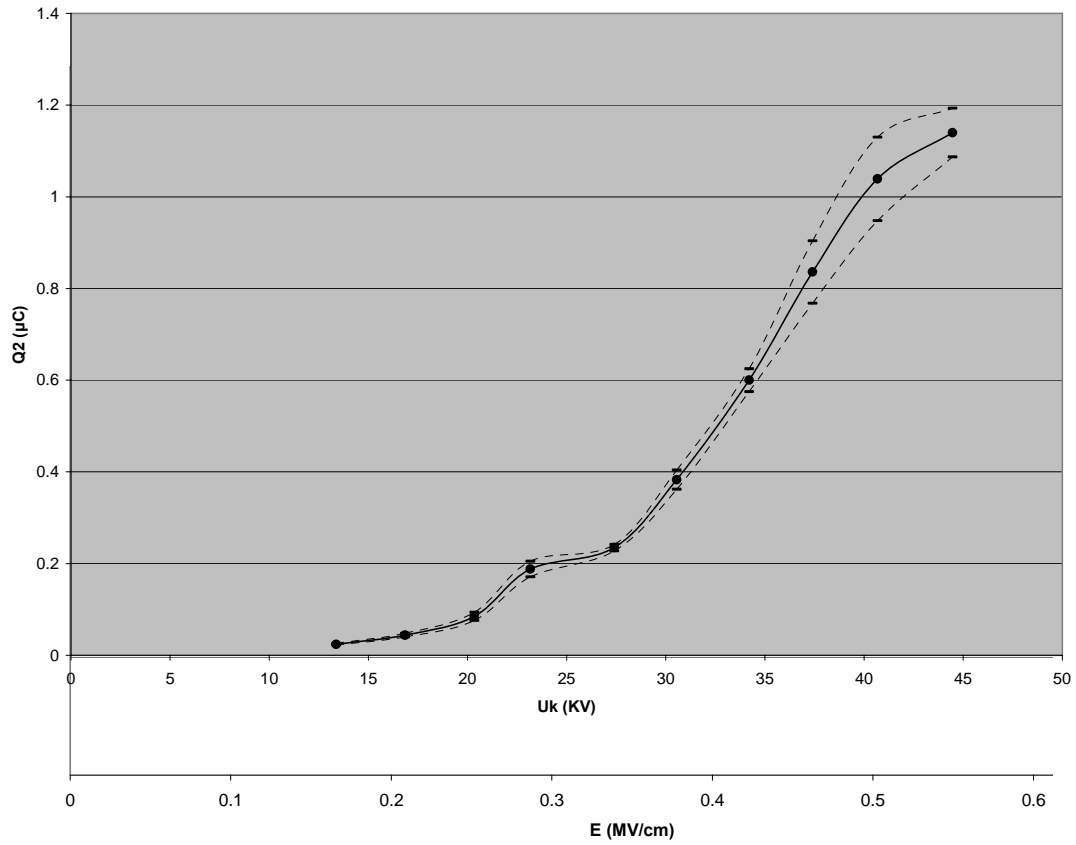
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1-2**: Υπολογισμός  $Q_2$ ,  $W_2$ ,  $f_2$ ,  $\lambda_2$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^\circ C$  – πάχος δοκιμίου  $d=1mm$ .

$U_k$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{ev}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
13.38	0.199	11.58	0.17257824	0.006	0.024
	0.199	1.28	0.01907601	0.001	0.002
16.85	0.251	12.34	0.18390462	0.023	0.044
	0.251	2.75	0.04098361	0	0.004
20.34	0.303	14.23	0.21207154	0.064	0.085
	0.303	0.66	0.00983607	0.007	0.009
23.17	0.345	17.62	0.26259314	0.163	0.188
	0.345	1.4	0.02086438	0.012	0.017
27.4	0.408	18.92	0.28196721	0.207	0.235
	0.408	0.65	0.00968703	0.005	0.007
30.55	0.455	18.35	0.27347243	0.357	0.383
	0.455	1.64	0.02444113	0.02	0.021
34.2	0.510	19.6	0.29210134	0.556	0.6
	0.510	0.71	0.01058122	0.012	0.025
37.4	0.557	20.76	0.30938897	0.806	0.836
	0.557	1.39	0.02071535	0.066	0.068
40.68	0.606	23.81	0.35484352	0.998	1.039
	0.606	1.28	0.01907601	0.07	0.091
44.46	0.662	25.48	0.37973174	1.089	1.14
	0.662	2.23	0.03323398	0.024	0.053

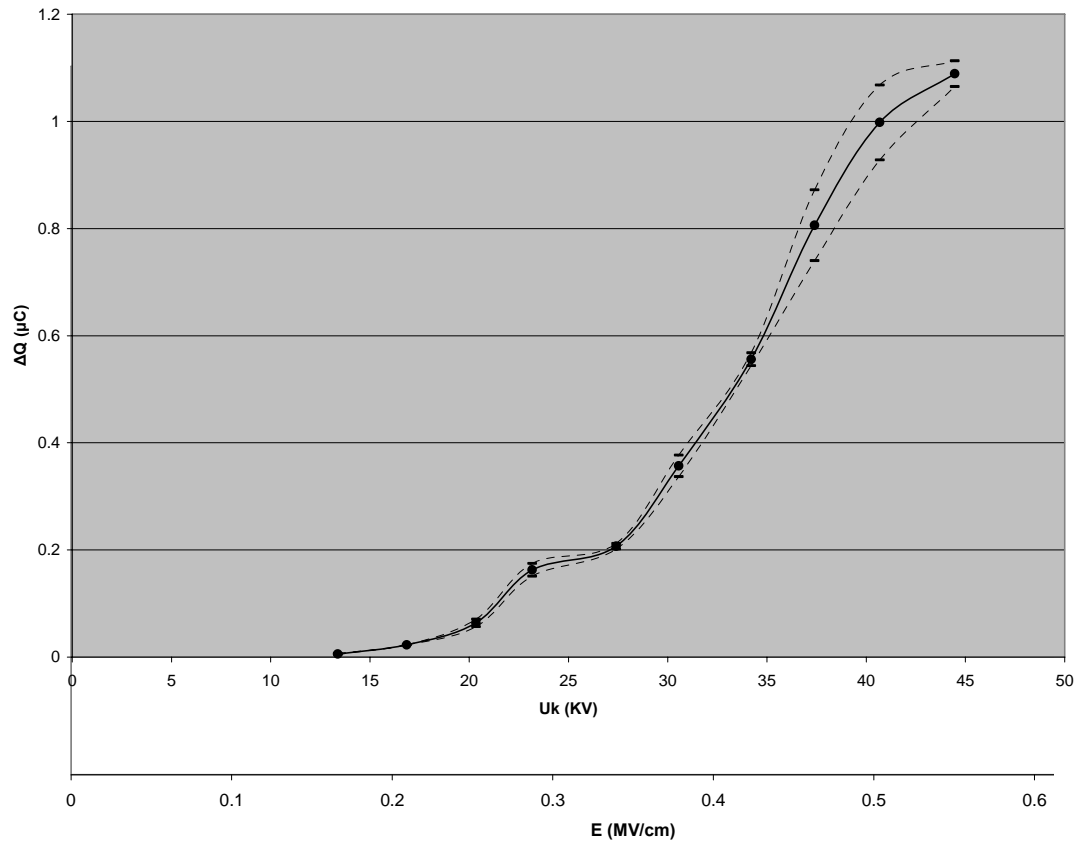
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}C$  –  
πάχος δοκιμίου  $d=1mm$ .



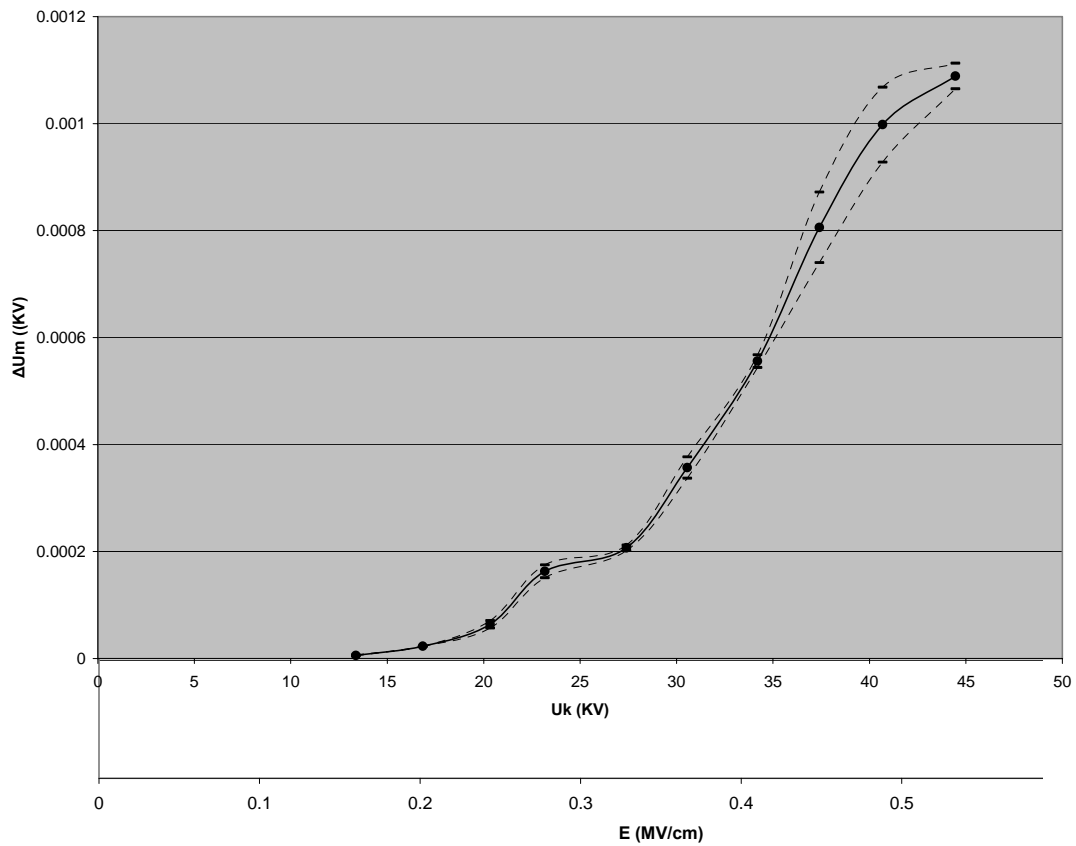
**Σχήμα 3.1-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.1-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

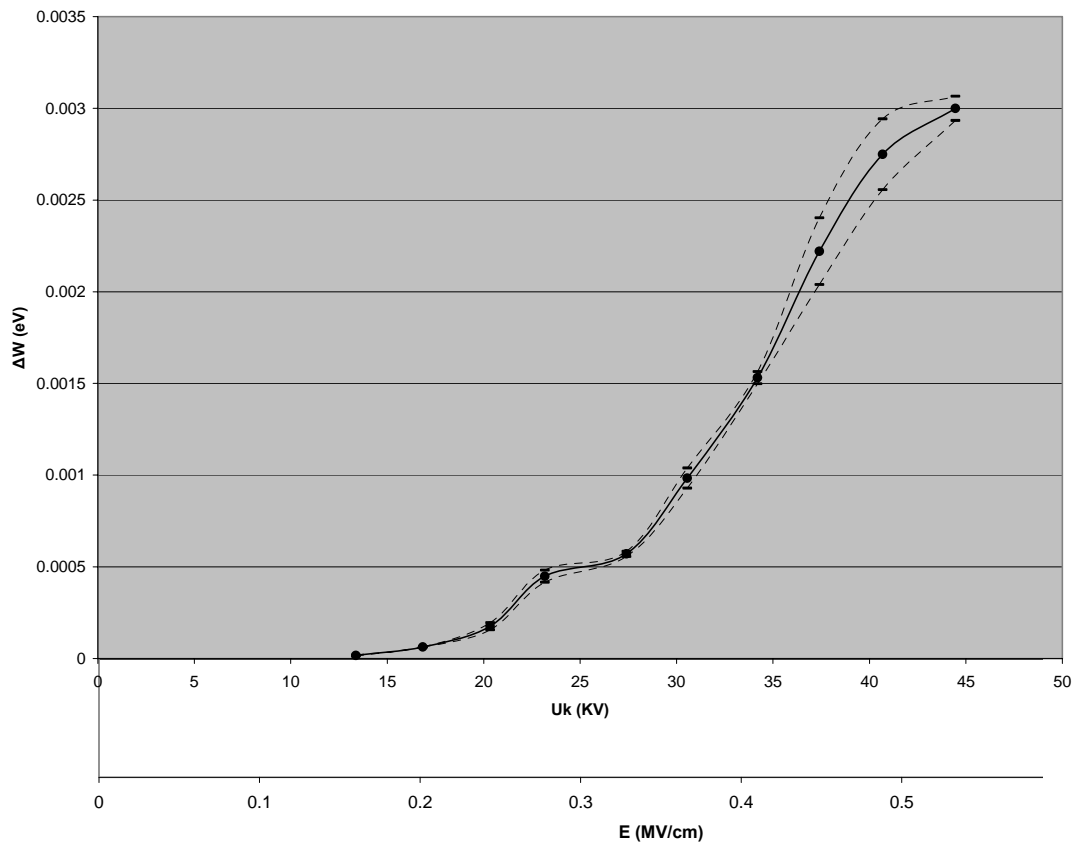


**Σχήμα 3.1-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

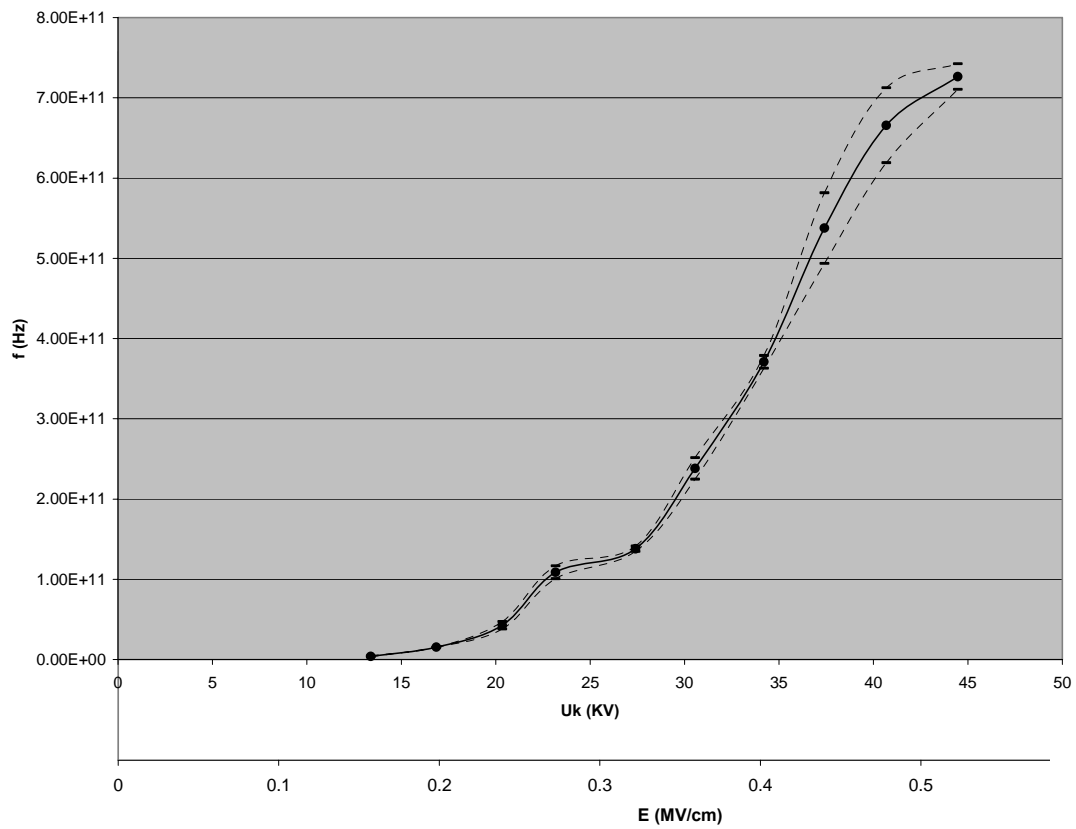


**Σχήμα 3.1-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

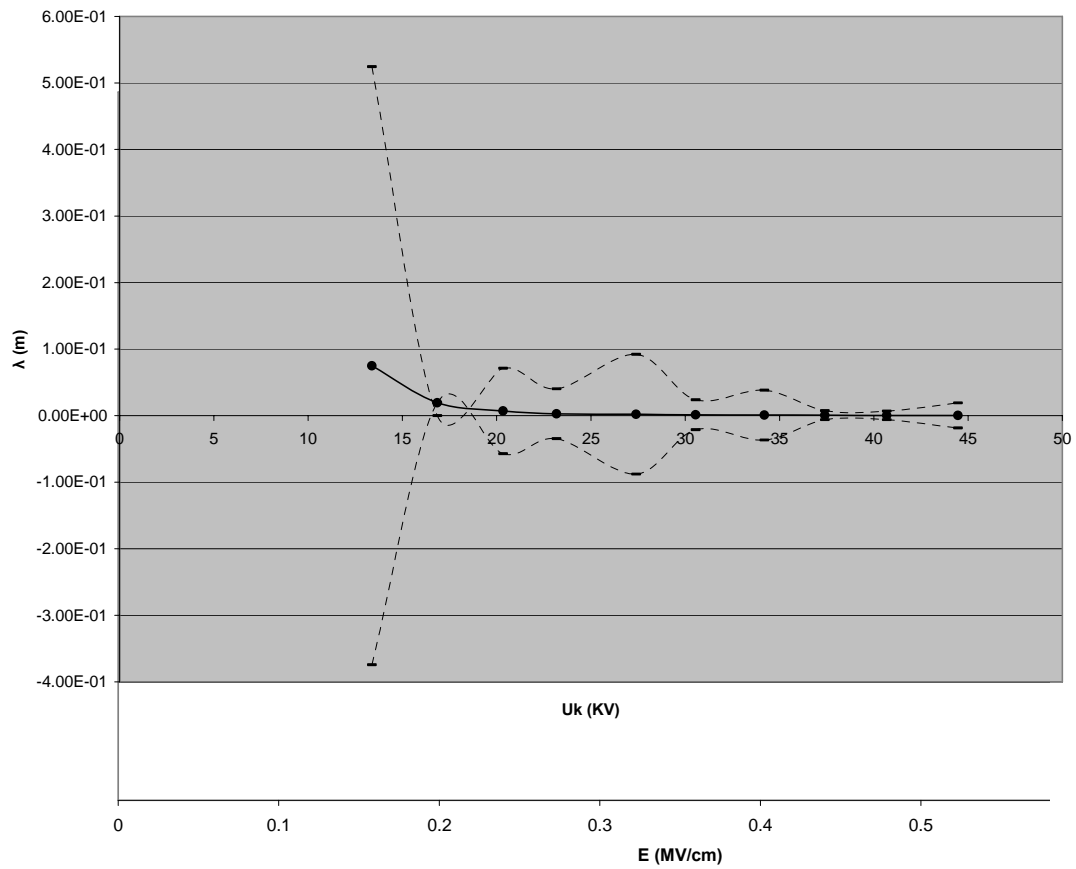




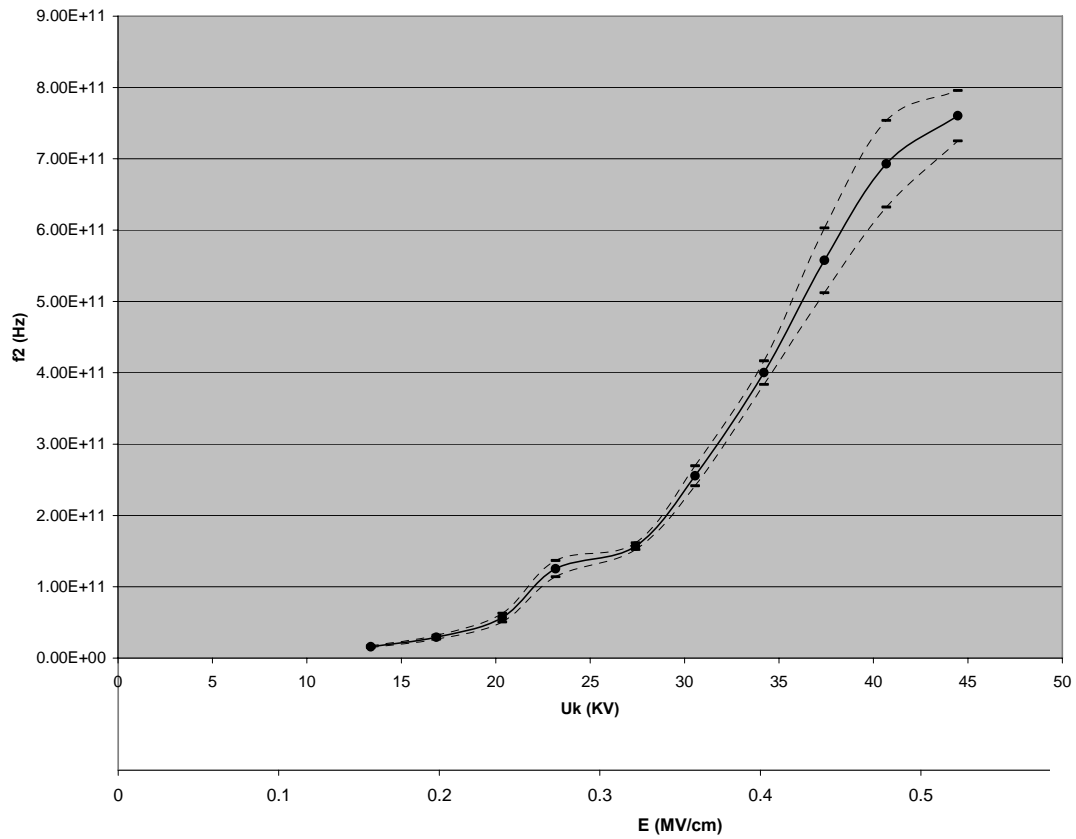
**Σχήμα 3.1-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



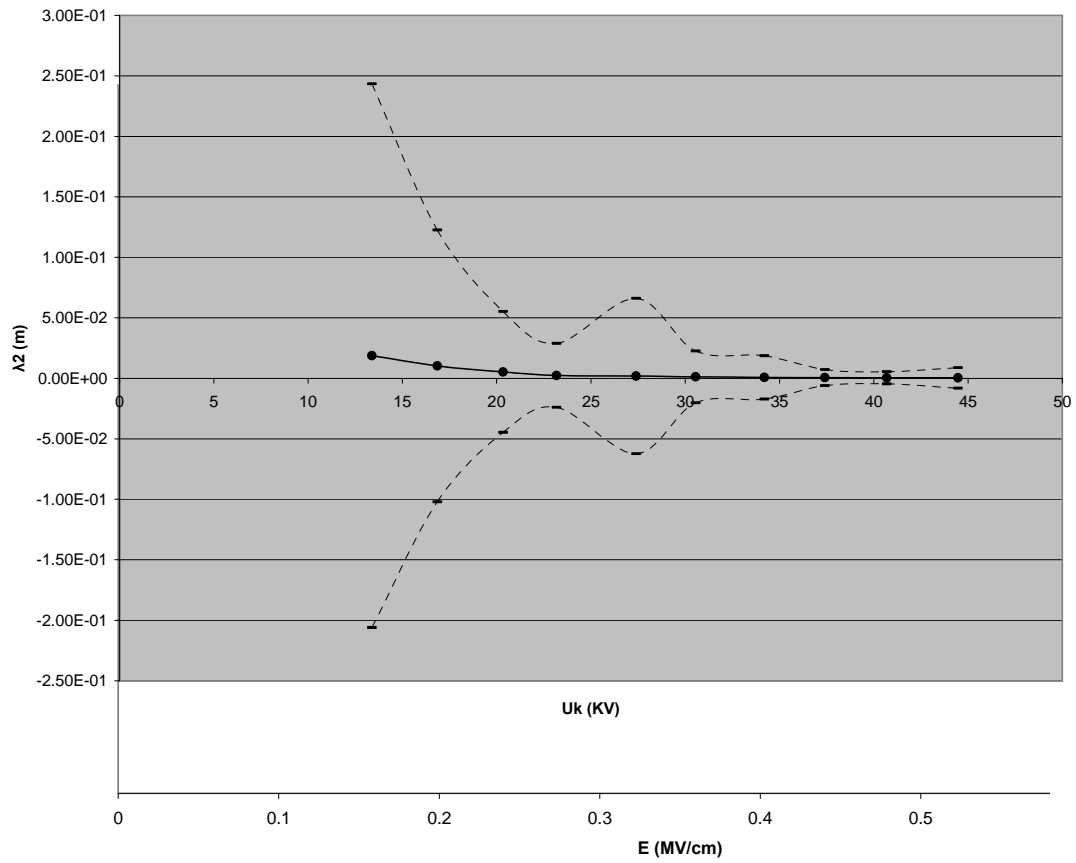
**Σχήμα 3.1-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^0\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



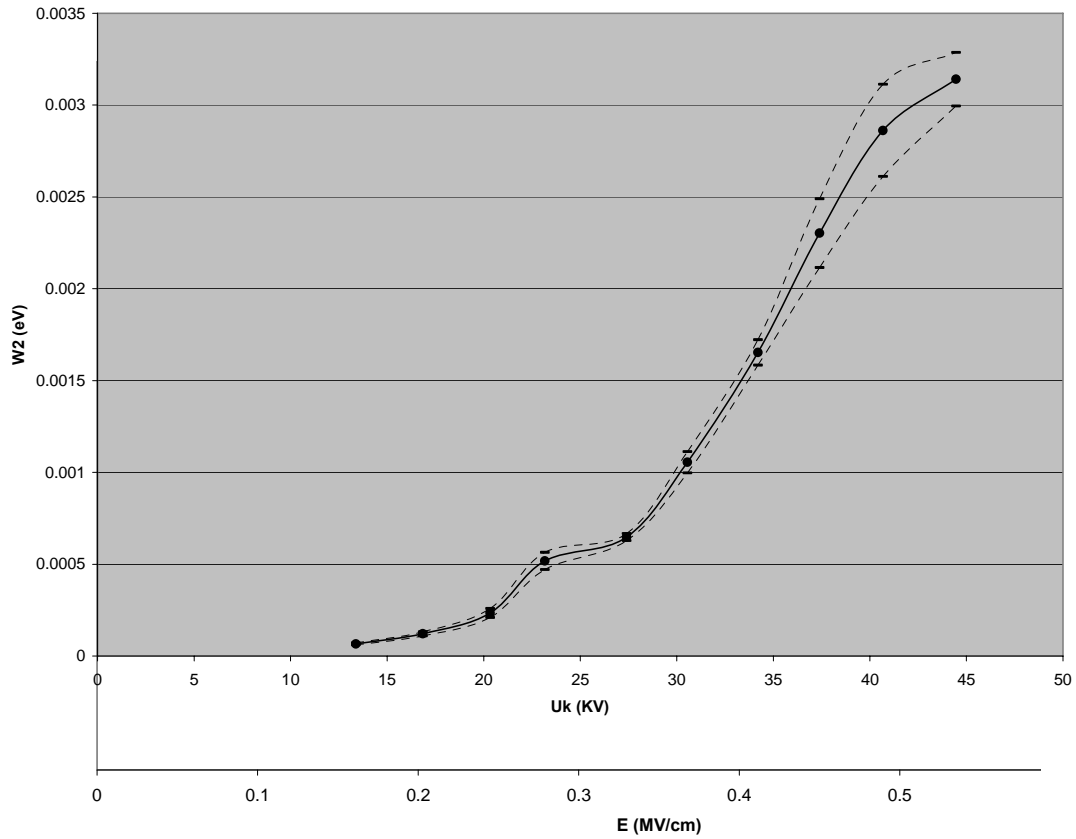
**Σχήμα 3.1-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



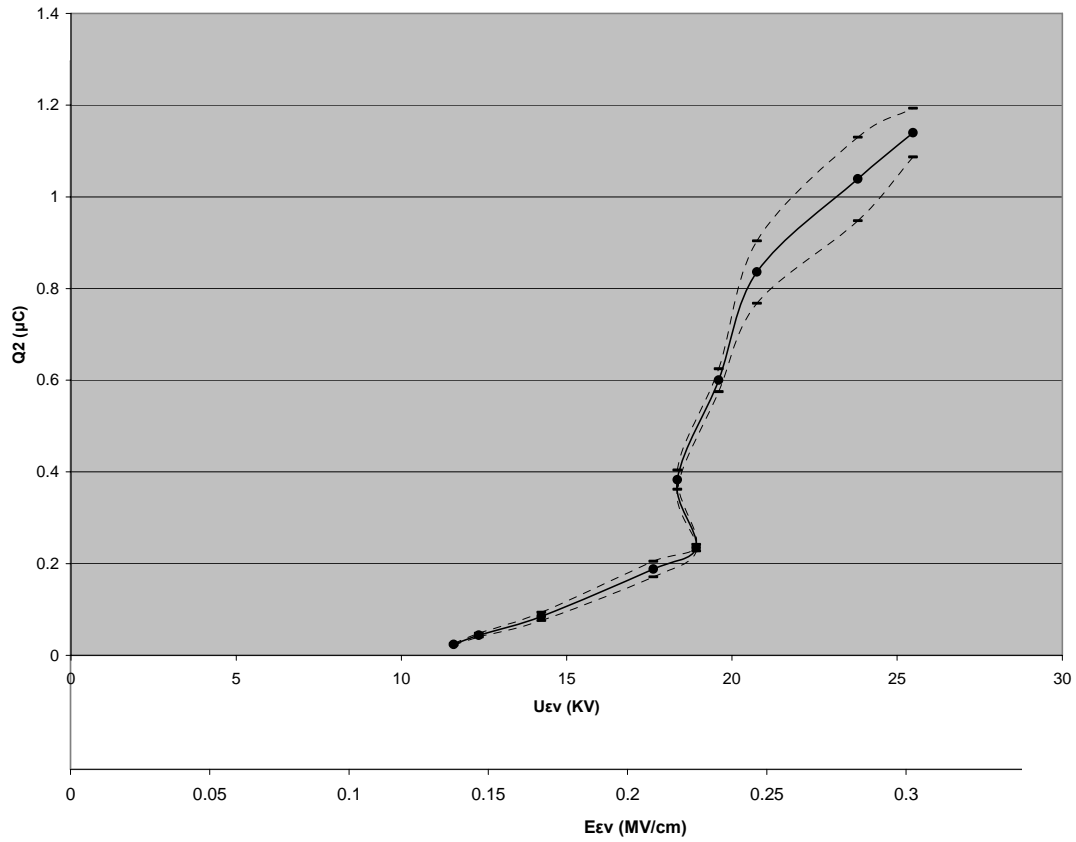
**Σχήμα 3.1-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



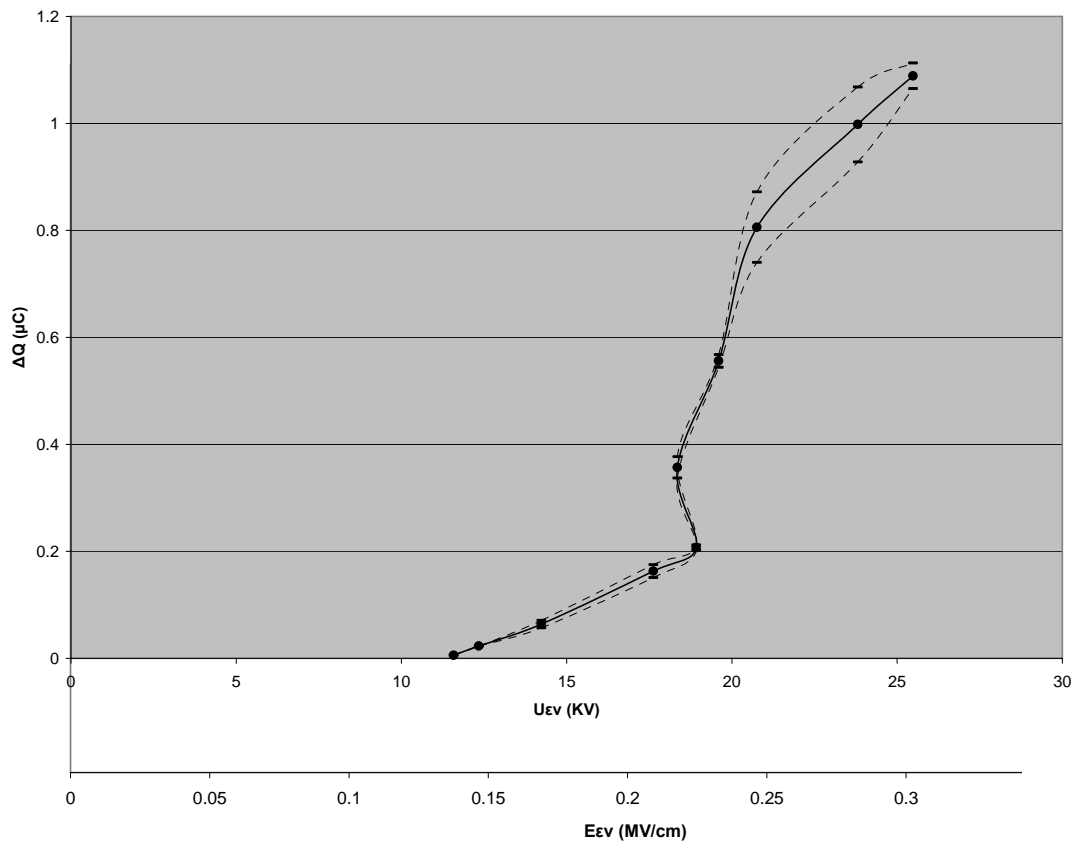
**Σχήμα 3.1-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.1-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

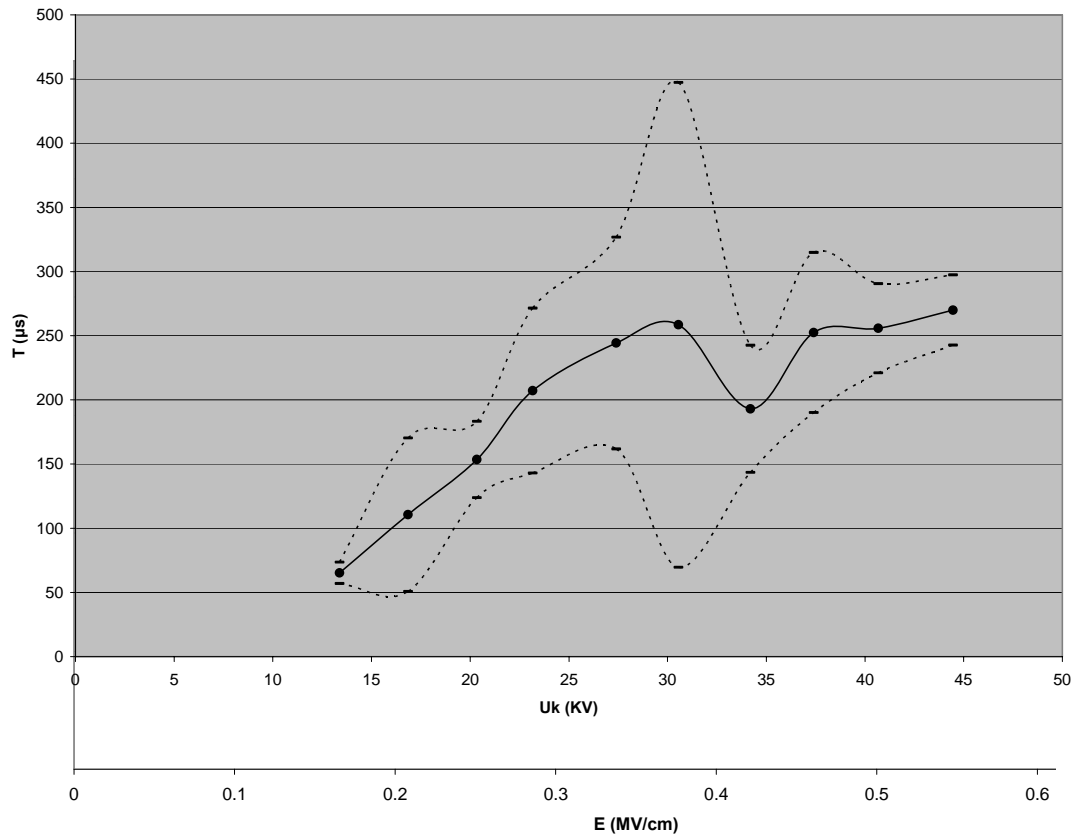


**Σχήμα 3.1-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.1-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{εν}, E_{εν})$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}C$  - πάχος δοκιμίου  $d=1mm$ .





**Σχήμα 3.1-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

### 3.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 2

ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ – Θ=80<sup>0</sup>C - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ d=1mm

U (KV)	U <sub>κ</sub> (KV)	T <sub>1</sub> (μs)	T <sub>2</sub> (μs)	Q <sub>1</sub> (μC)	Q <sub>2</sub> (μC)	U <sub>εν</sub> (KV)	T (μs)	Q (μC)	(Q/T)*10 <sup>-3</sup> (μC/μs)
15	10,02	111,37	310,5	0,064	0,074	9,68	199,12	0,017	0,092
		-	-	0,006	-	-	-	-	-
20	13,4	45,9	336,15	0,049	0,182	10,15	290,25	0,16	0,466
		7,87	56,3	0,006	0,017	0,72	52,8	0,012	0,052
25	16,95	33,54	319,95	0,059	0,319	10,18	286,46	0,26	0,941
		10,46	58,15	0,013	0,018	0,62	63,11	0,022	0,15
30	20,16	23,62	403,65	0,056	0,583	10,12	380,02	0,526	1,409
		3,01	46,25	0,002	0,013	1,55	49,12	0,014	0,19
35	23,41	26,99	378,9	0,068	1,032	10,84	351	0,964	2,795
		3,69	48,8	0,016	0,11	0,95	43,79	0,098	0,49
40	26,8	24,97	409,04	0,068	1,605	14,36	369,21	1,536	4,227
		5,05	43,2	0,01	0,061	1,01	41,03	0,058	0,58
45	30,5	ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ							

$U_K$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta Um$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
10.02	1000	5.51	0.01	0.00001	2.755E-05	6670702179	0.04494279	0.149275
			-	-	-	-	-	0.149275
13.4	1000	5.51	0.133	0.00013	0.0003664	8.872E+10	0.00337916	0.199629
			0.011	1.1E-05	3.031E-05	7337772397	0.04085709	0.199629
16.95	1000	5.51	0.26	0.00026	0.0007163	1.7344E+11	0.00172857	0.252516
			0.005	5E-06	1.378E-05	3335351090	0.08988559	0.252516
20.16	1000	5.51	0.527	0.00053	0.0014519	3.5155E+11	0.0008528	0.300338
			0.011	1.1E-05	3.031E-05	7337772397	0.04085709	0.300338
23.41	1000	5.51	0.964	0.00096	0.0026558	6.4306E+11	0.00046621	0.348755
			0.094	9.4E-05	0.000259	6.2705E+10	0.00478115	0.348755
26.8	1000	5.51	1.537	0.00154	0.0042344	1.0253E+12	0.00029241	0.399258
			0.051	5.1E-05	0.0001405	3.4021E+10	0.00881231	0.399258

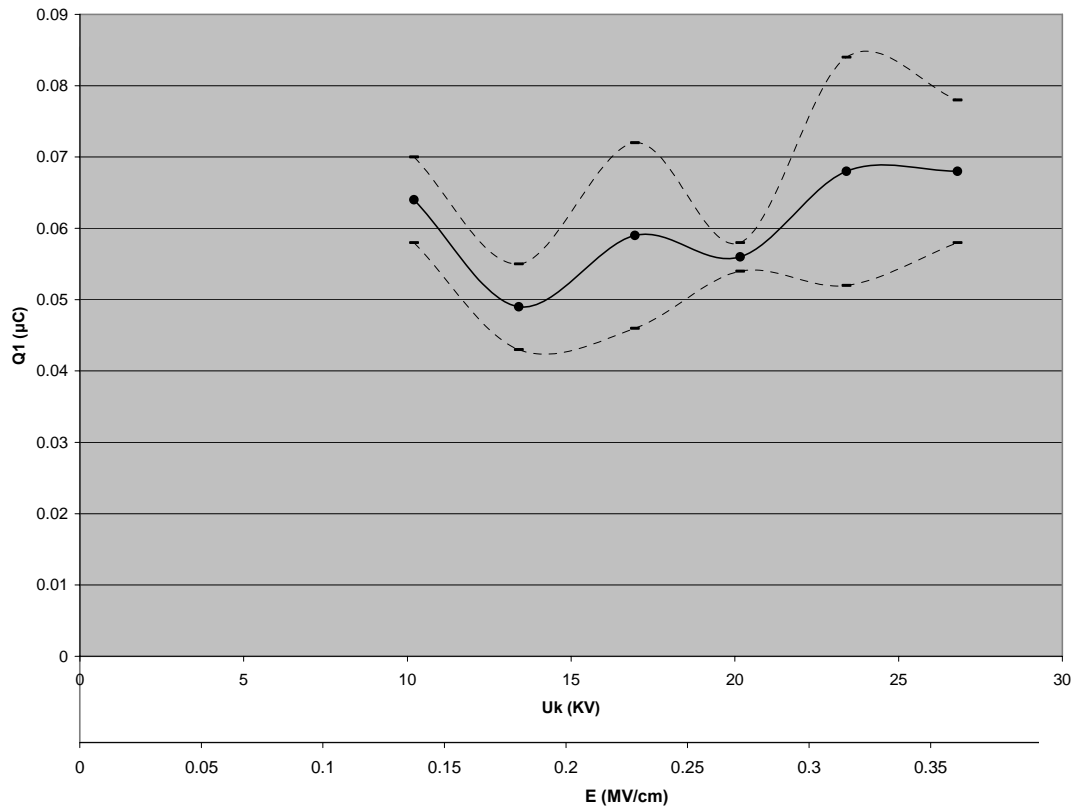
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta Um$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^0C$  – πάχος δοκιμίου d=1mm.

$U_K$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$Q_2$ ( $\mu C$ )	$W_2$ (eV)	$f_2$ (Hz)	$\lambda_2$ (m)	E (MV/cm)
10.02	1000	5.51	0.074	0.000204	4.94E+10	6.07E-03	0.149
			-	-	-	-	0.149
13.4	1000	5.51	0.182	0.000501	1.21E+11	2.47E-03	0.200
			0.017	4.68E-05	1.13E+10	2.64E-02	0.200
16.95	1000	5.51	0.319	0.000879	2.13E+11	1.41E-03	0.253
			0.018	4.96E-05	1.20E+10	2.50E-02	0.253
20.16	1000	5.51	0.583	0.001606	3.89E+11	7.71E-04	0.300
			0.013	3.58E-05	8.67E+09	3.46E-02	0.300
23.41	1000	5.51	1.032	0.002843	6.88E+11	4.35E-04	0.349
			0.11	0.000303	7.34E+10	4.09E-03	0.349
26.8	1000	5.51	1.605	0.004422	1.07E+12	2.80E-04	0.399
			0.061	0.000168	4.07E+10	7.37E-03	0.399

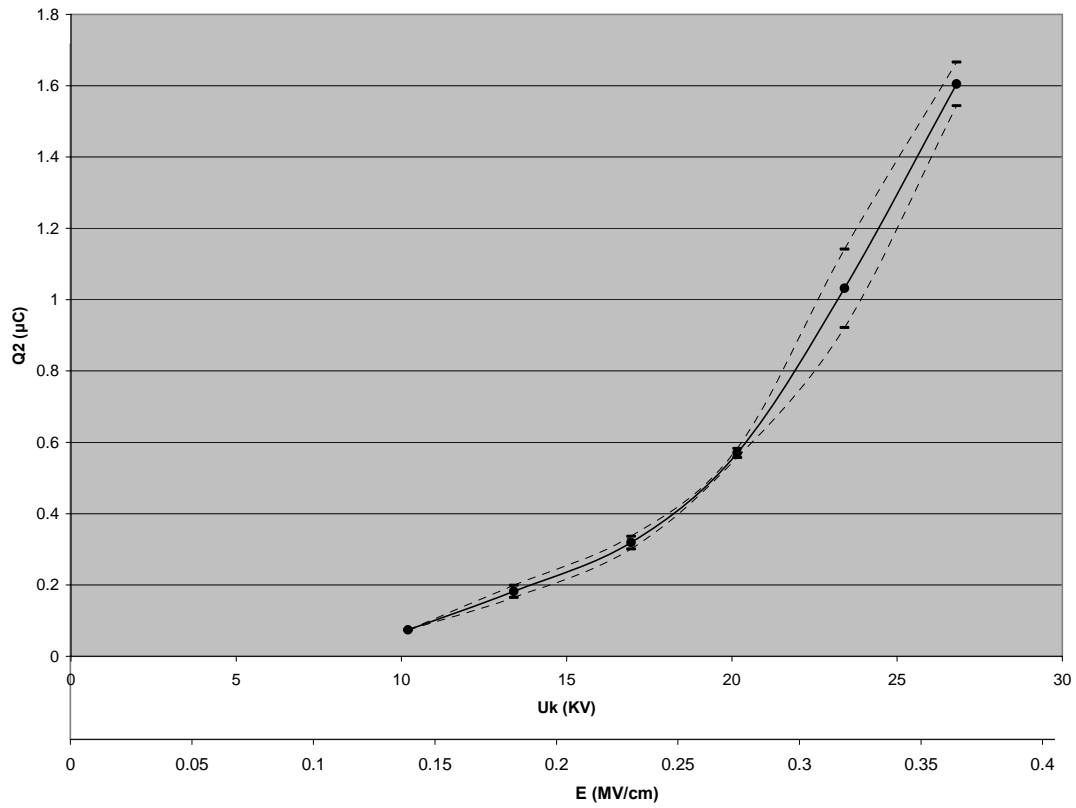
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2-2:** Υπολογισμός  $Q_2$ ,  $W_2$ ,  $f_2$ ,  $\lambda_2$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^0C$  – πάχος δοκιμίου d=1mm.

$U_K$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{ev}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
10.02	0.149	9.68	0.144262	0.01	0.074
	0.149	-	-	-	-
13.4	0.200	10.15	0.151267	0.133	0.182
	0.200	0.72	0.01073	0.011	0.017
16.95	0.253	10.18	0.151714	0.26	0.319
	0.253	0.62	0.00924	0.005	0.018
20.16	0.300	10.12	0.15082	0.527	0.583
	0.300	1.55	0.0231	0.011	0.013
23.41	0.349	10.84	0.16155	0.964	1.032
	0.349	0.95	0.014158	0.094	0.11
26.8	0.399	14.36	0.214009	1.537	1.605
	0.399	1.01	0.015052	0.051	0.061

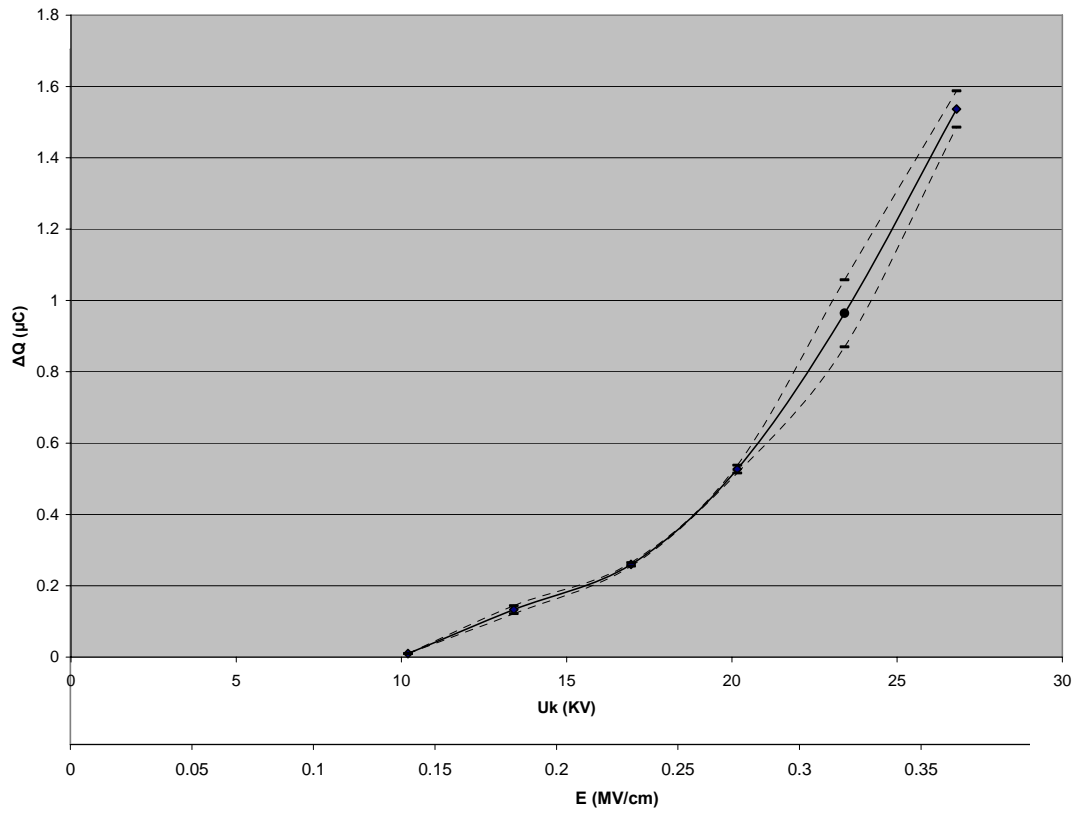
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}C$  –  
πάχος δοκιμίου  $d=1mm$ .



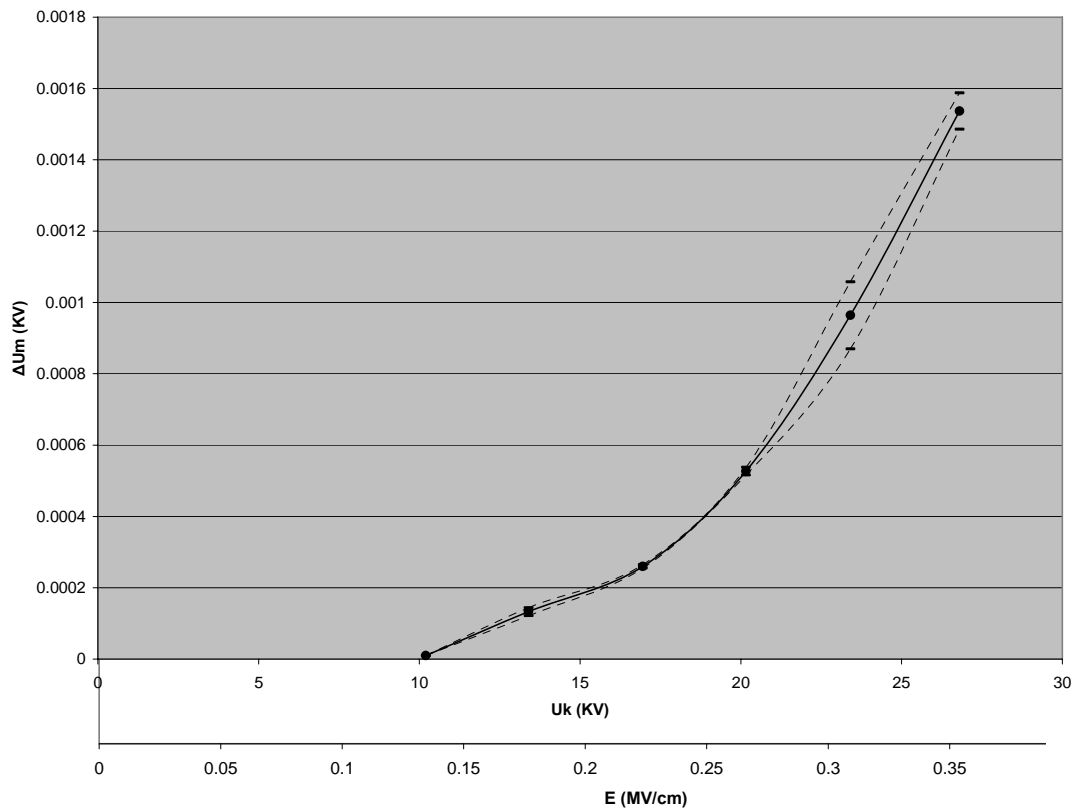
**Σχήμα 3.2-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.2-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

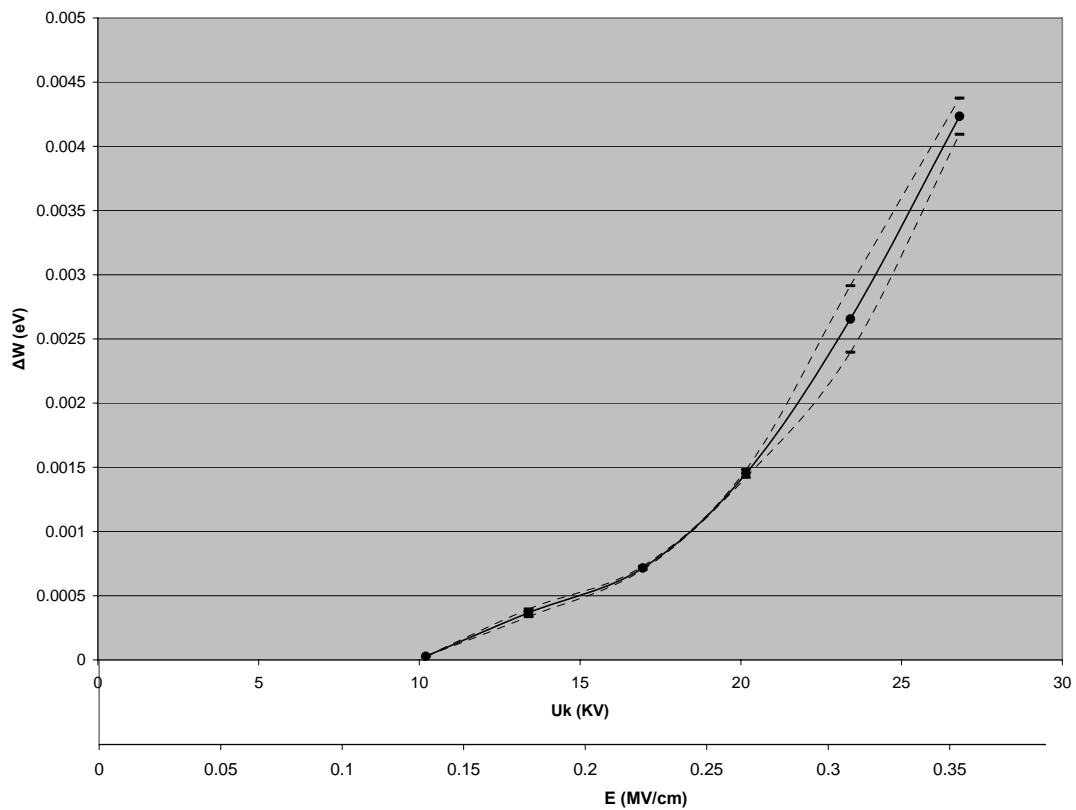


**Σχήμα 3.2-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

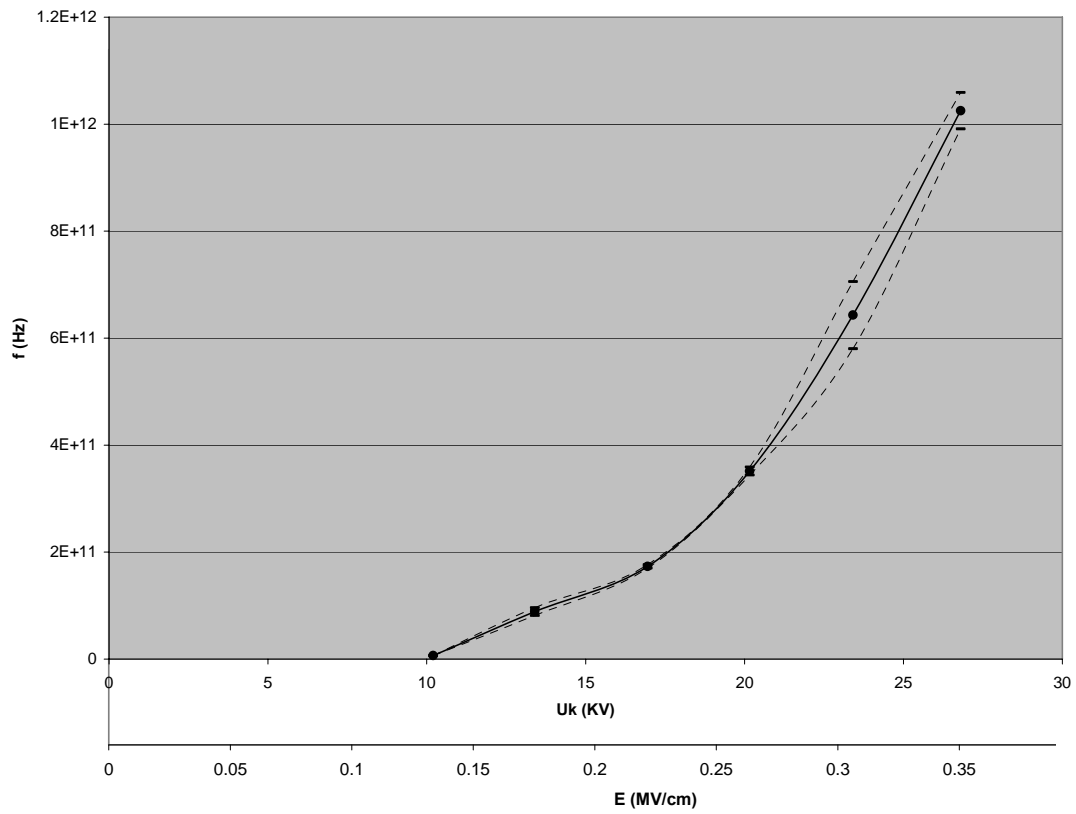


**Σχήμα 3.2-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

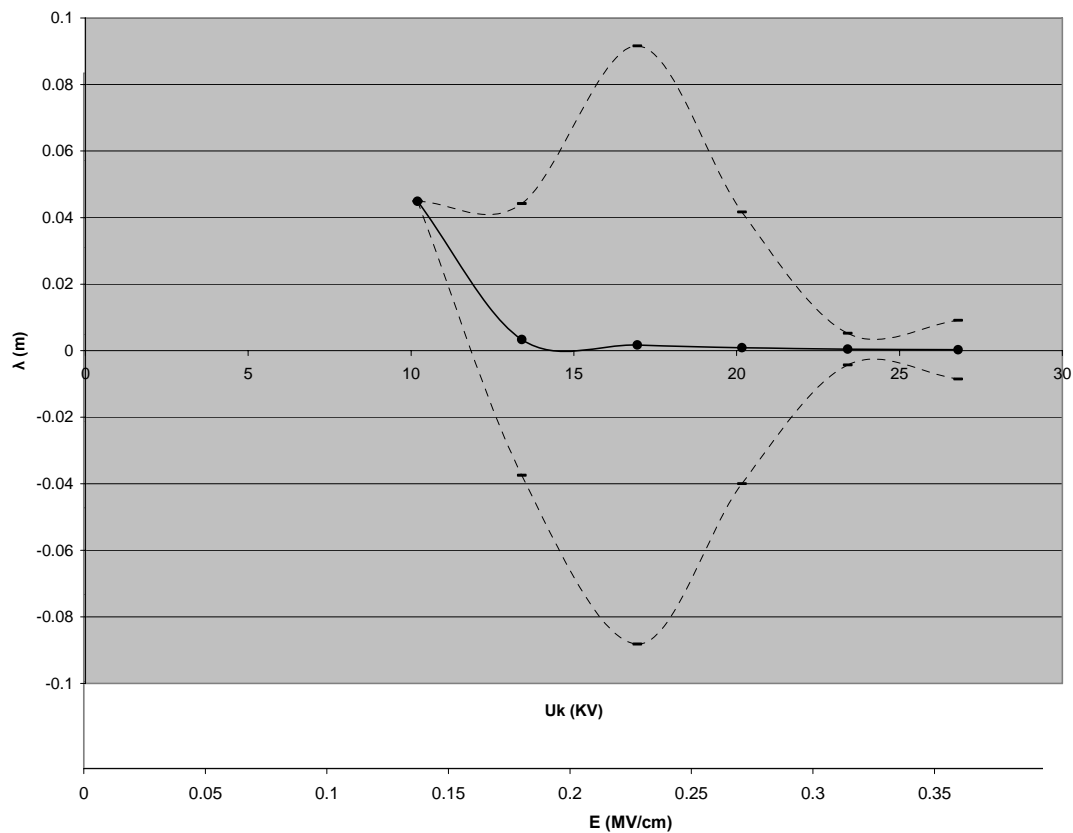




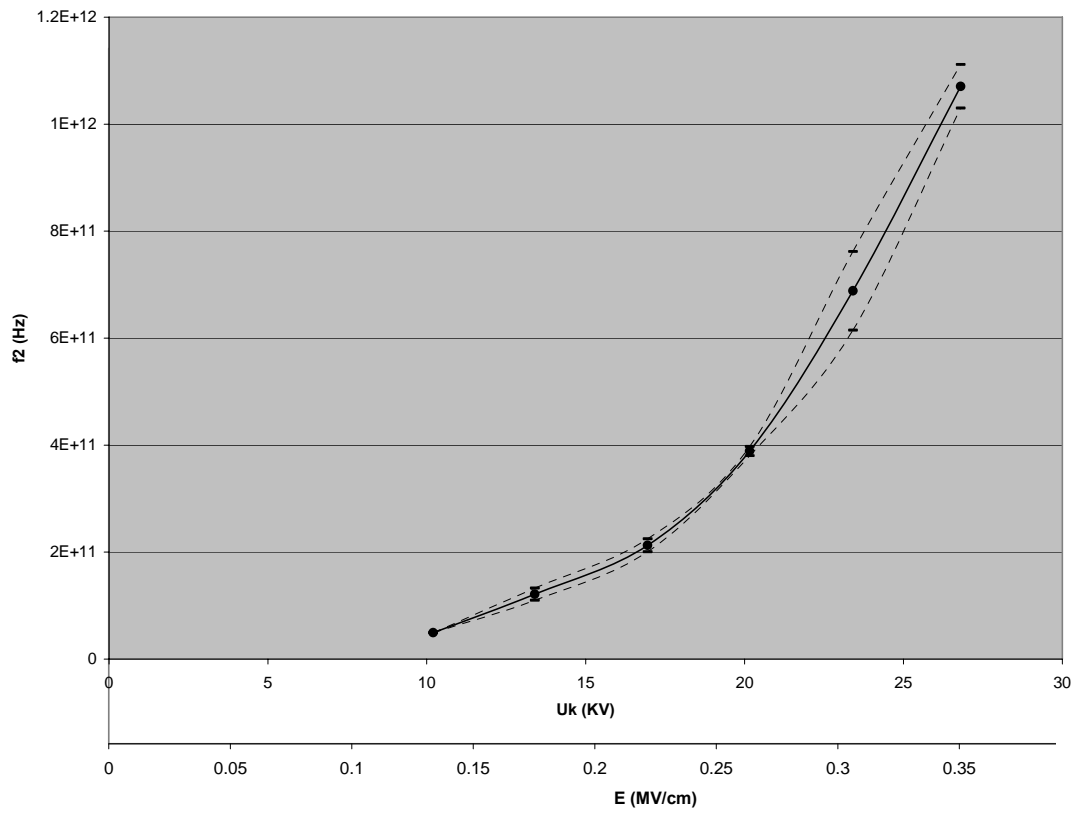
**Σχήμα 3.2-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



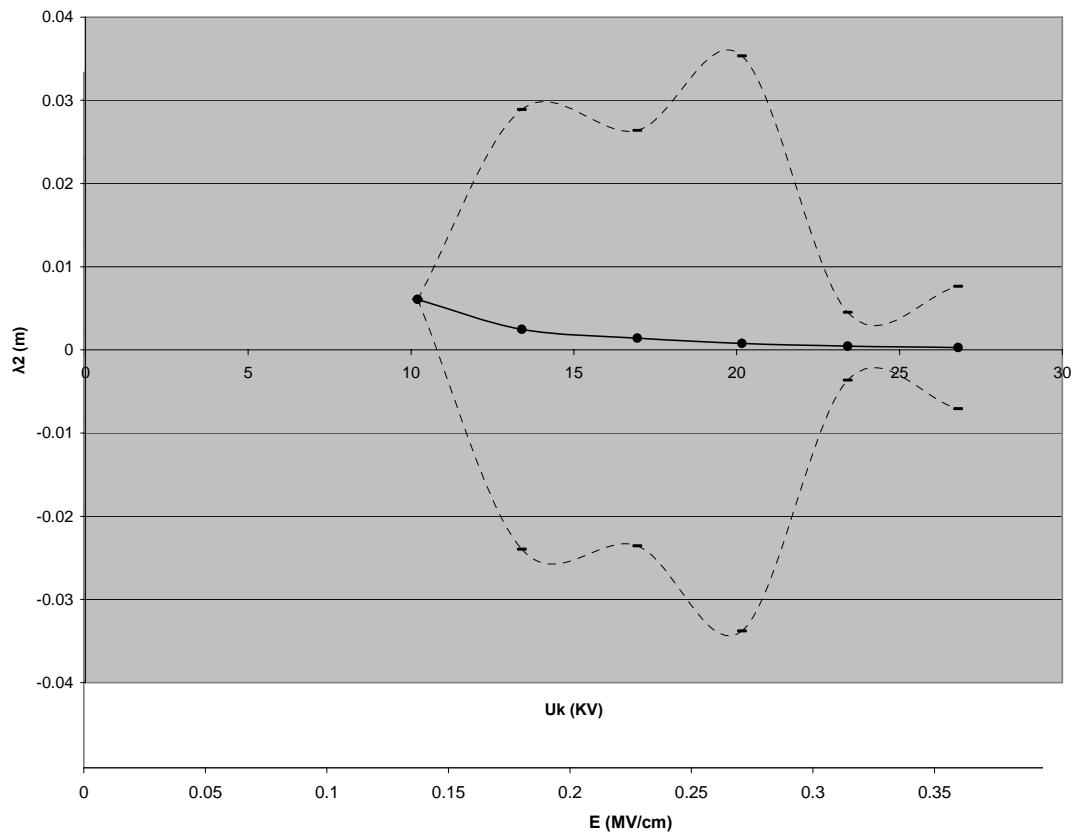
**Σχήμα 3.2-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



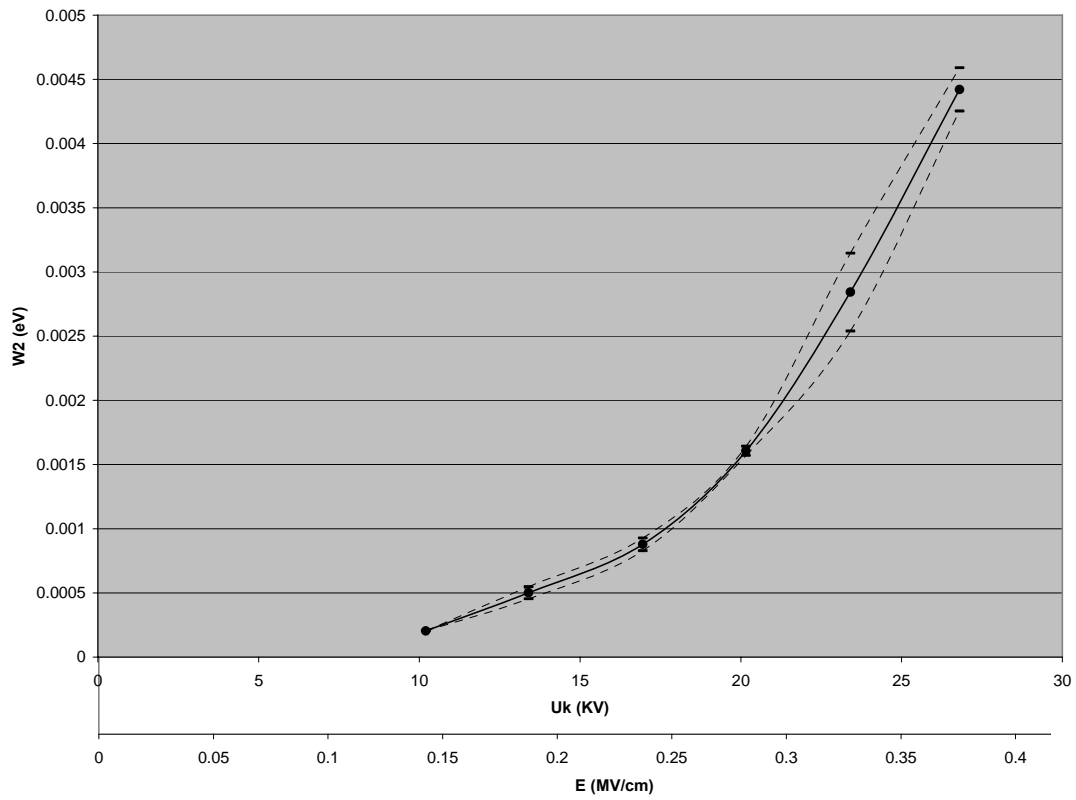
**Σχήμα 3.2-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



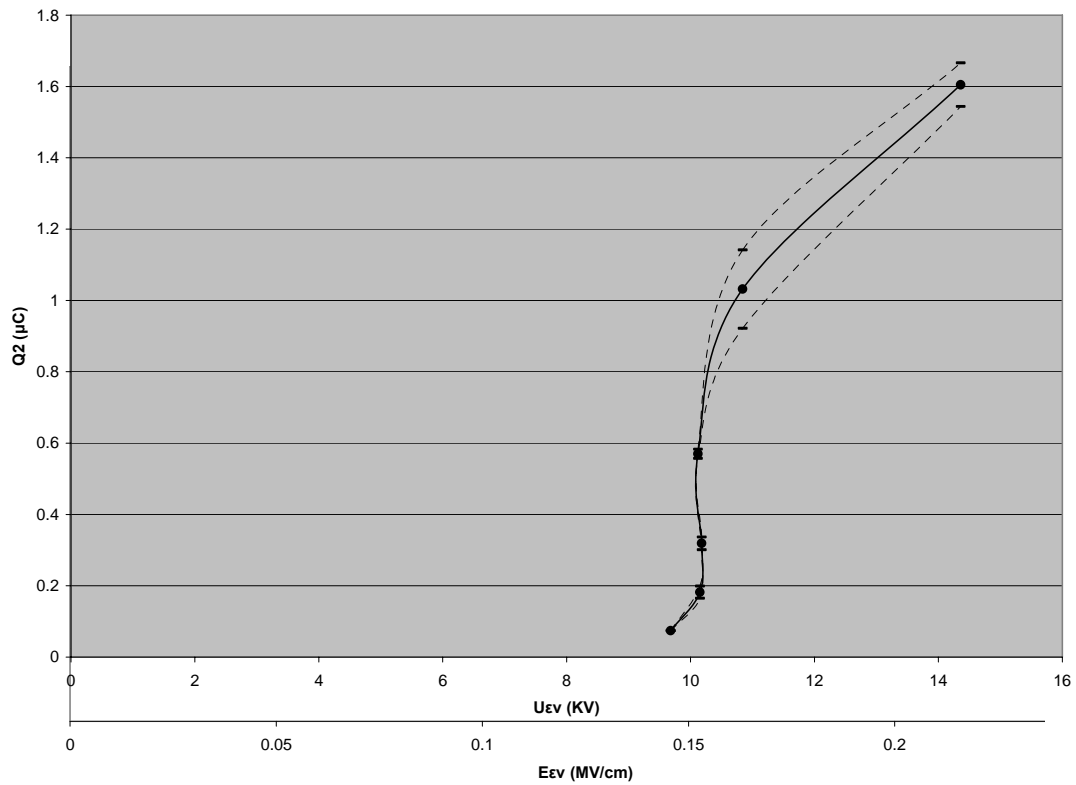
**Σχήμα 3.2-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



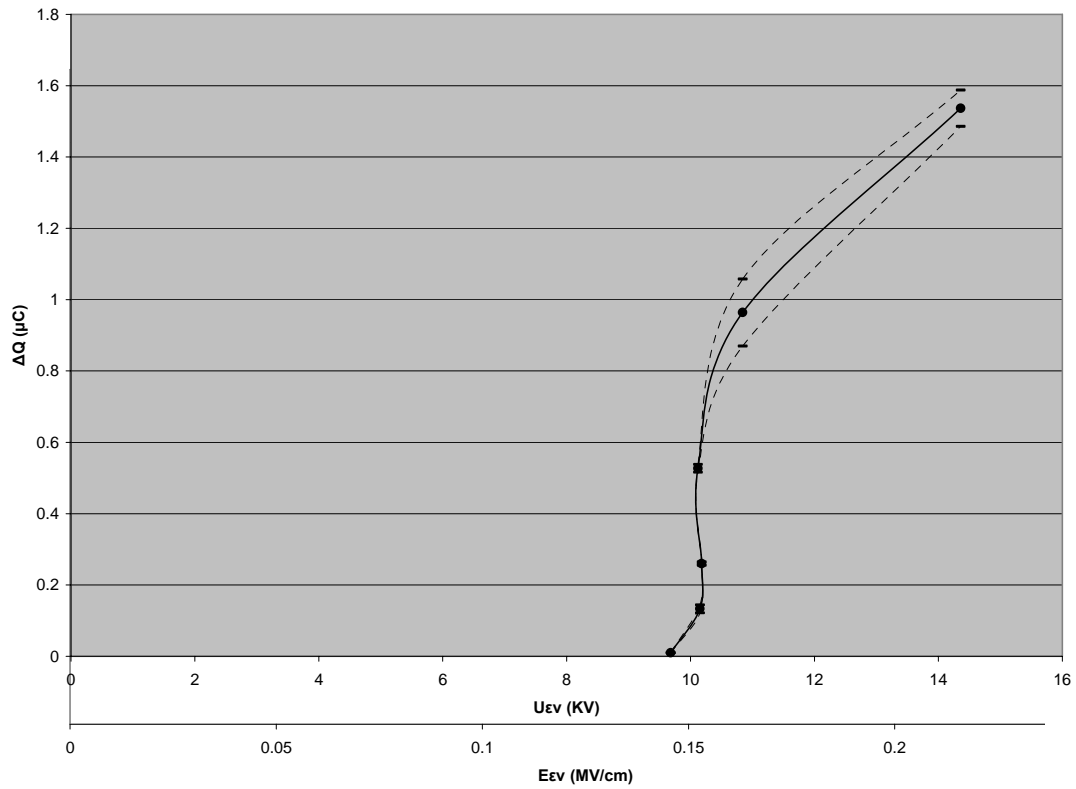
**Σχήμα 3.2-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.2-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta = 80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

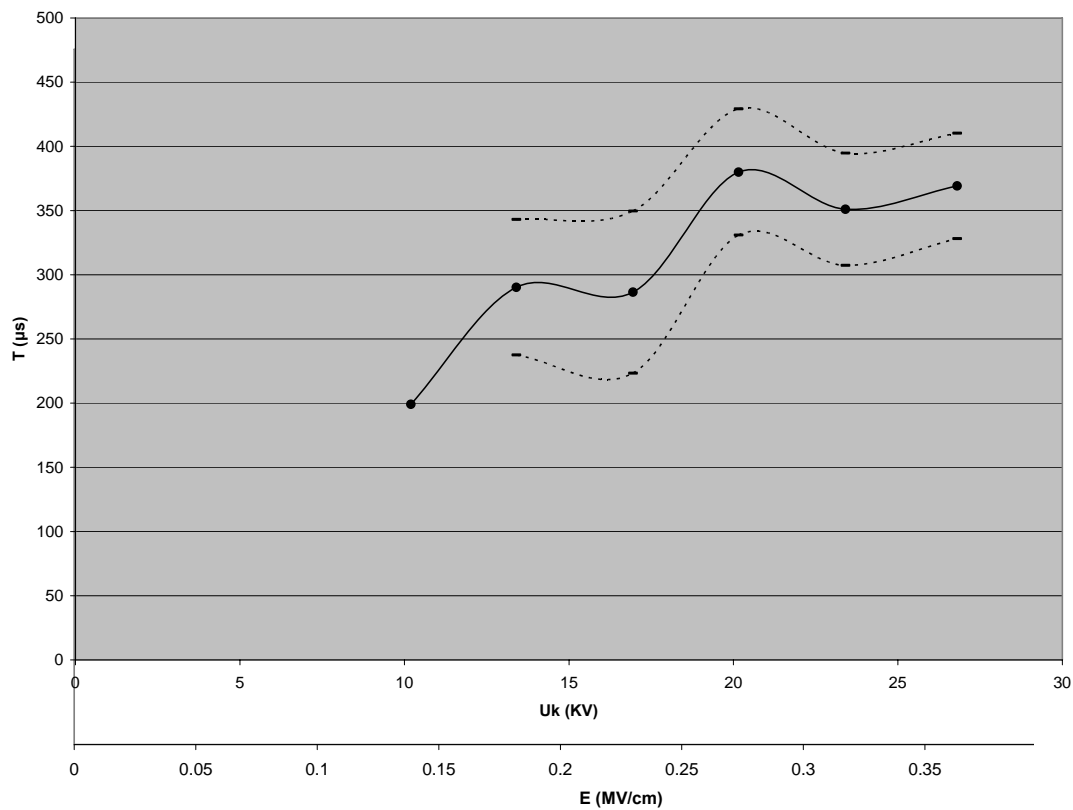


**Σχήμα 3.2-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{\text{εν}}, E_{\text{εν}})$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.2-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{\epsilon\nu}, E_{\epsilon\nu})$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .





**Σχήμα 3.2-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

### 3.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 3

ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=1\text{mm}$

U (KV)	$U_{\kappa}$ (KV)	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_{\text{ev}}$ (KV)	T ( $\mu\text{s}$ )	Q ( $\mu\text{C}$ )	$(Q/T)*10^{-3}$ ( $\mu\text{C}/\mu\text{s}$ )
15	10,35	-	-	0,015	-	-	-	-	-
		-	-	0,000	-	-	-	-	-
20	13,82	-	-	0,019	-	-	-	-	-
		-	-	0,000	-	-	-	-	-
25	17,45	20,25	216	0,027	0,033	17,12	13,5	0,006	0,5
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30	20,4	114,07	145,8	0,034	0,067	19,75	31,72	0,039	1,941
		17,9	17,39	0,001	0,004	0,68	25,75	0,004	0,98
35	23,97	64,12	184,32	0,033	0,11	23,48	70,2	0,077	1,315
		10,01	22,42	0,005	0,013	0,036	28,75	0,009	1
40	27,96	69,51	250,42	0,031	0,156	25,6	180,91	0,127	1,185
		12,9	94,31	0,004	0,018	0,6	103,1	0,02	
45	31,23	49,94	274,72	0,024	0,302	26,28	224,7	0,277	1,427
		3,3	90,6	0,002	0,038	0,79	89,71	0,036	0,54
50	34,5	44,54	237,6	0,069	0,472	28,45	193,05	0,402	2,167
		2,52	30,66	0,005	0,085	0,59	28,1	0,081	0,66
55	37,69	71,55	233,55	0,121	0,695	30,26	162	0,574	3,851
		31,82	39,49	0,014	0,098	3,47	44,15	0,054	1,17
60	40,86	60,75	223,15	0,198	0,943	34,17	102,4	0,745	4,851
		10,45	43,95	0,063	0,093	0,74	44,73	0,15	1,16
65	44,85	52,65	255,82	0,229	1,309	39,46	203,17	1,085	5,63
		16,8	45,4	0,062	0,17	2,86	41,52	0,12	1,58

$U_{\kappa}$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta U_m$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
10.35	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.154191
			-	-	-	-	-	0.154191
13.82	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.205886
			-	-	-	-	-	0.205886
17.45	1000	5.51	0.006	0.000006	1.65E-05	4E+09	0.074905	0.259965
			0	0	0	0	-	0.259965
20.4	1000	5.51	0.033	0.000033	9.09E-05	2.2E+10	0.013619	0.303913
			0.003	0.000003	8.27E-06	2E+09	0.149809	0.303913
23.97	1000	5.51	0.077	0.000077	0.000212	5.14E+10	0.005837	0.357098
			0.01	0.00001	2.76E-05	6.67E+09	0.044943	0.357098
27.96	1000	5.51	0.125	0.000125	0.000344	8.34E+10	0.003595	0.41654
			0.014	0.000014	3.86E-05	9.34E+09	0.032102	0.41654
31.23	1000	5.51	0.278	0.000278	0.000766	1.85E+11	0.001617	0.465255
			0.036	0.000036	9.92E-05	2.4E+10	0.012484	0.465255
34.5	1000	5.51	0.403	0.000403	0.00111	2.69E+11	0.001115	0.513971
			0.08	0.00008	0.00022	5.34E+10	0.005618	0.513971
37.69	1000	5.51	0.574	0.000574	0.001581	3.83E+11	0.000783	0.561494
			0.044	0.000044	0.000121	2.94E+10	0.010214	0.561494
40.86	1000	5.51	0.745	0.000745	0.002052	4.97E+11	0.000603	0.60872
			0.025	0.000025	6.89E-05	1.67E+10	0.017977	0.60872
44.85	1000	5.51	1.08	0.00108	0.002975	7.2E+11	0.000416	0.668162
			0.108	0.000108	0.000298	7.2E+10	0.004161	0.668162

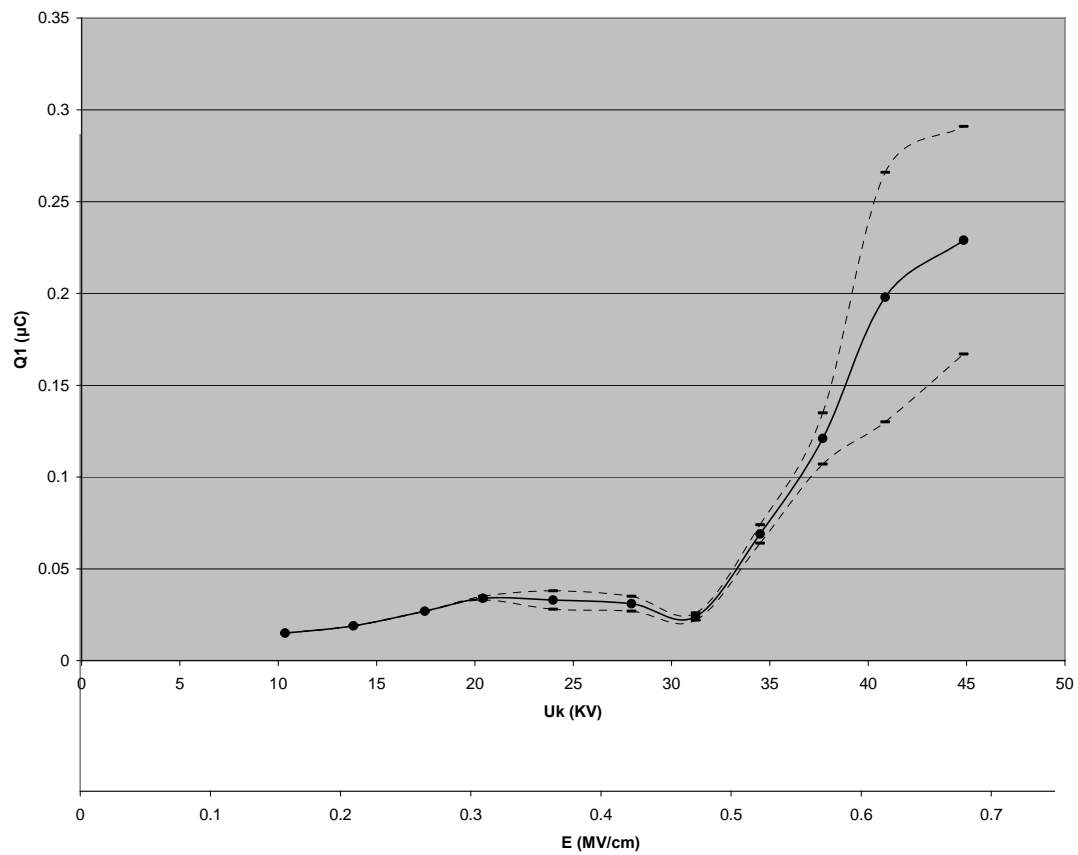
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta U_m$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}C$  – πάχος δοκιμίου d=1mm.

$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$Q_2$ ( $\mu C$ )	$W_2$ (eV)	$f_2$ (Hz)	$\lambda_2$ (m)	E (MV/cm)
10.35	1000	5.51	-	-	-	-	0.154191
			-	-	-	-	0.154191
13.82	1000	5.51	-	-	-	-	0.205886
			-	-	-	-	0.205886
17.45	1000	5.51	0.033	9.09E-05	2.2E+10	0.013619	0.259965
			-	-	-	-	0.259965
20.4	1000	5.51	0.067	0.000185	4.47E+10	0.006708	0.303913
			0.004	1.1E-05	2.67E+09	0.112357	0.303913
23.97	1000	5.51	0.11	0.000303	7.34E+10	0.004086	0.357098
			0.015	4.13E-05	1E+10	0.029962	0.357098
27.96	1000	5.51	0.156	0.00043	1.04E+11	0.002881	0.41654
			0.018	4.96E-05	1.2E+10	0.024968	0.41654
31.23	1000	5.51	0.302	0.000832	2.01E+11	0.001488	0.465255
			0.038	0.000105	2.53E+10	0.011827	0.465255
34.5	1000	5.51	0.472	0.0013	3.15E+11	0.000952	0.513971
			0.085	0.000234	5.67E+10	0.005287	0.513971
37.69	1000	5.51	0.695	0.001915	4.64E+11	0.000647	0.561494
			0.058	0.00016	3.87E+10	0.007749	0.561494
40.86	1000	5.51	0.943	0.002598	6.29E+11	0.000477	0.60872
			0.093	0.000256	6.2E+10	0.004833	0.60872
44.85	1000	5.51	1.309	0.003606	8.73E+11	0.000343	0.668162
			0.17	0.000468	1.13E+11	0.002644	0.668162

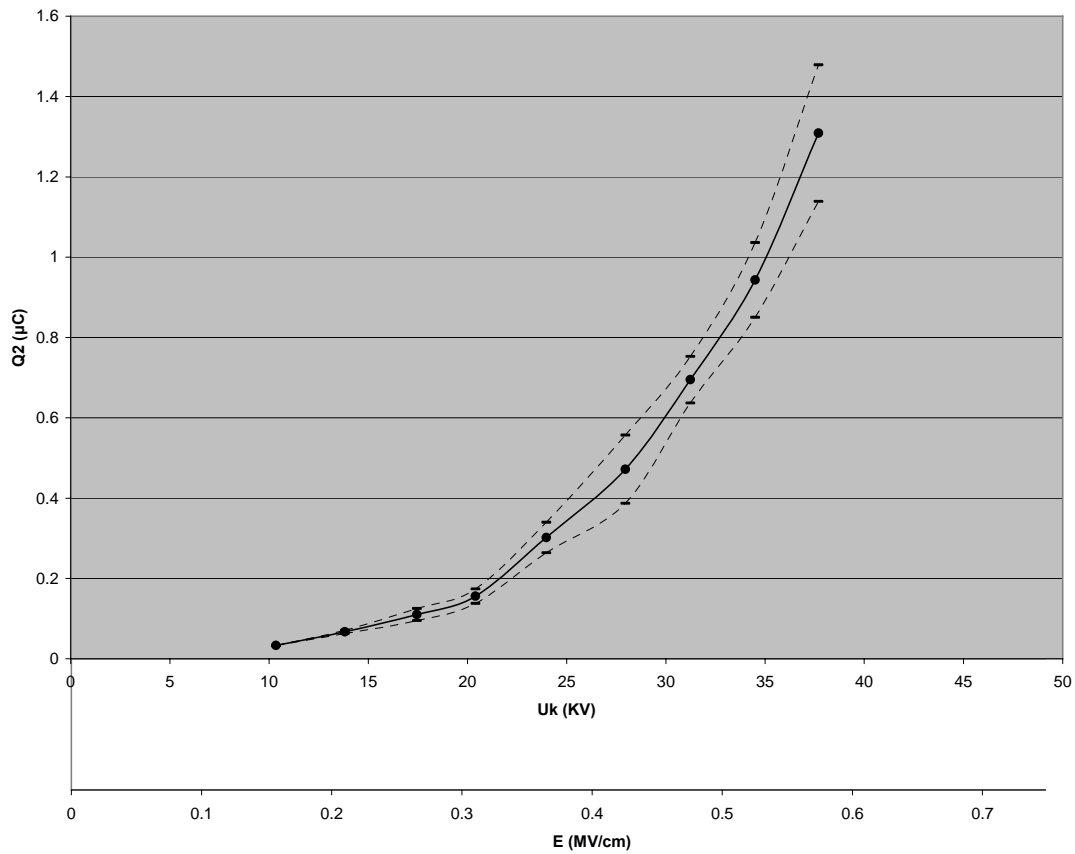
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3-2:** Υπολογισμός  $Q_2$ ,  $W_2$ ,  $f_2$ ,  $\lambda_2$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^0C$  – πάχος δοκιμίου  $d=1mm$ .

$U_K$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{ev}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
10.35	0.154191	-	-	-	-
		-	-	-	-
13.82	0.205886	-	-	-	-
		-	-	-	-
17.45	0.259965	17.12	0.255142	0.006	0.033
		0	0	0	0
20.4	0.303913	19.75	0.294337	0.033	0.067
		0.68	0.010134	0.003	0.004
23.97	0.357098	23.48	0.349925	0.077	0.11
		0.036	0.000537	0.01	0.015
27.96	0.41654	25.6	0.38152	0.125	0.156
		0.6	0.008942	0.014	0.018
31.23	0.465255	26.28	0.391654	0.278	0.302
		0.79	0.011773	0.036	0.038
34.5	0.513971	28.45	0.423994	0.403	0.472
		0.59	0.008793	0.08	0.085
37.69	0.561494	30.26	0.450969	0.574	0.695
		3.47	0.051714	0.044	0.058
40.86	0.60872	34.17	0.50924	0.745	0.943
		0.74	0.011028	0.025	0.093
44.85	0.668162	39.46	0.588077	1.08	1.309
		2.86	0.042623	0.108	0.17

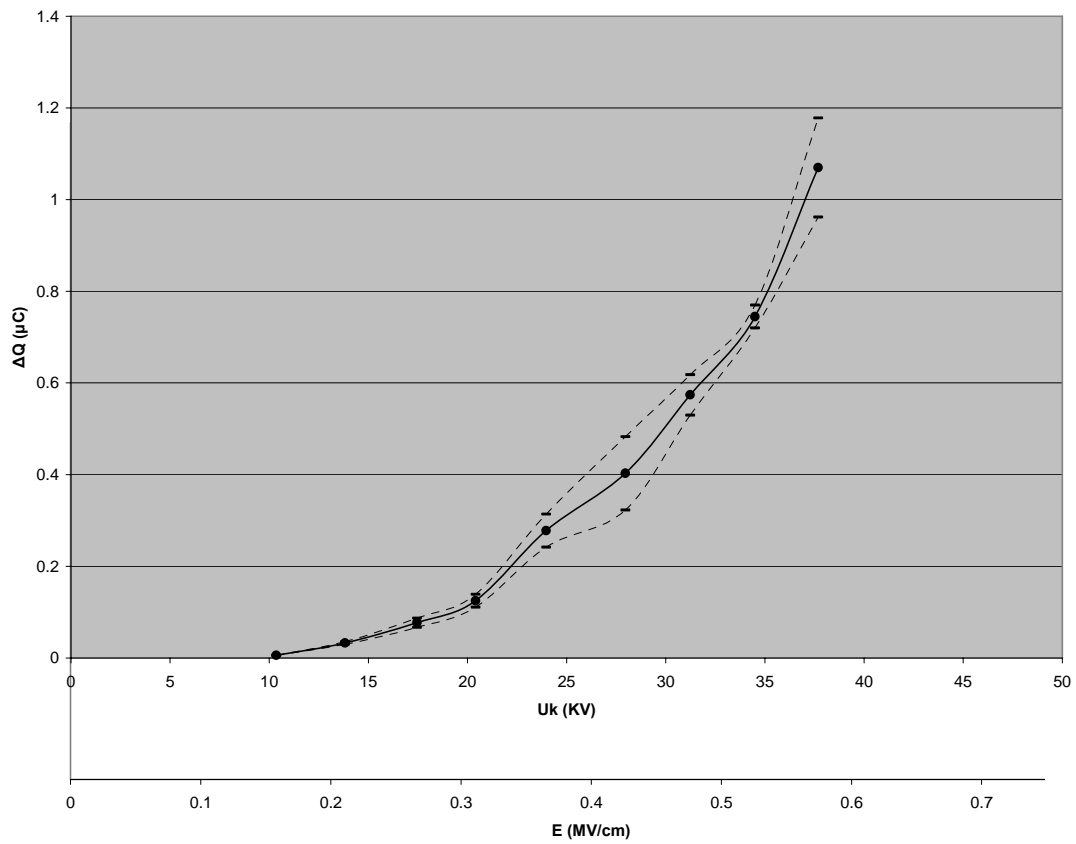
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}C$  –  
πάχος δοκιμίου  $d=1mm$ .



**Σχήμα 3.3-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

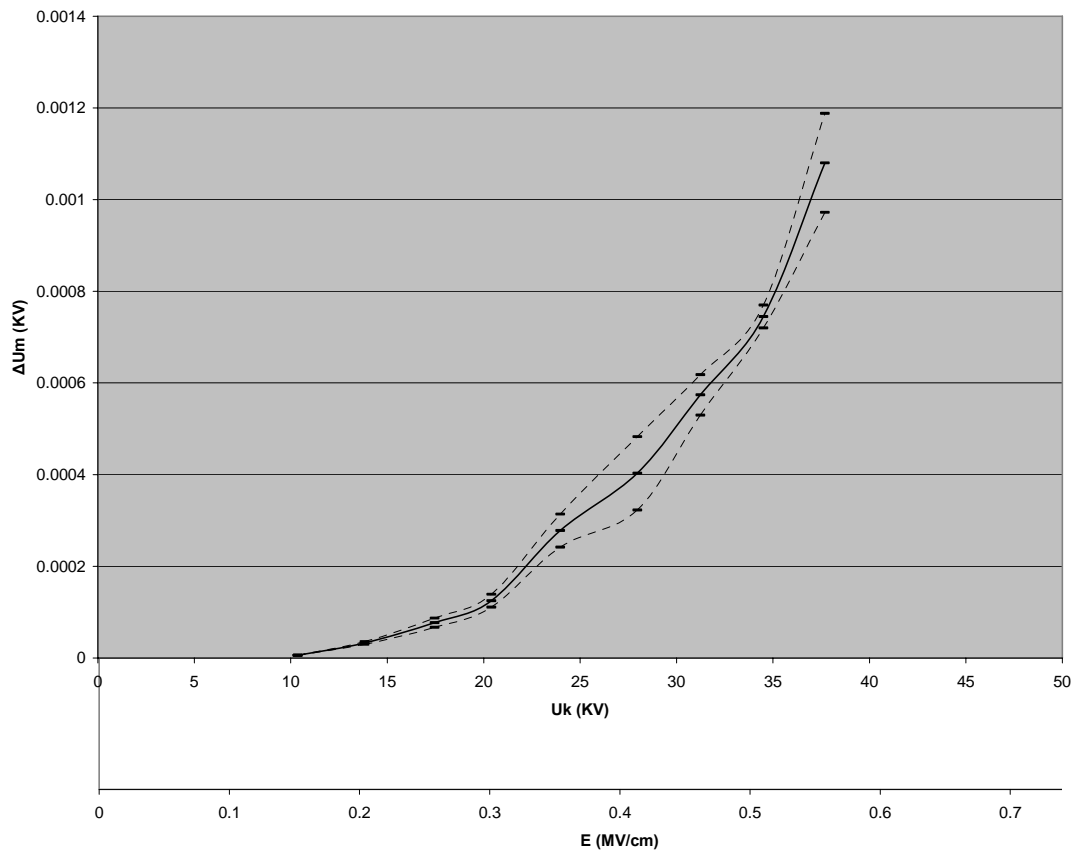


**Σχήμα 3.3-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

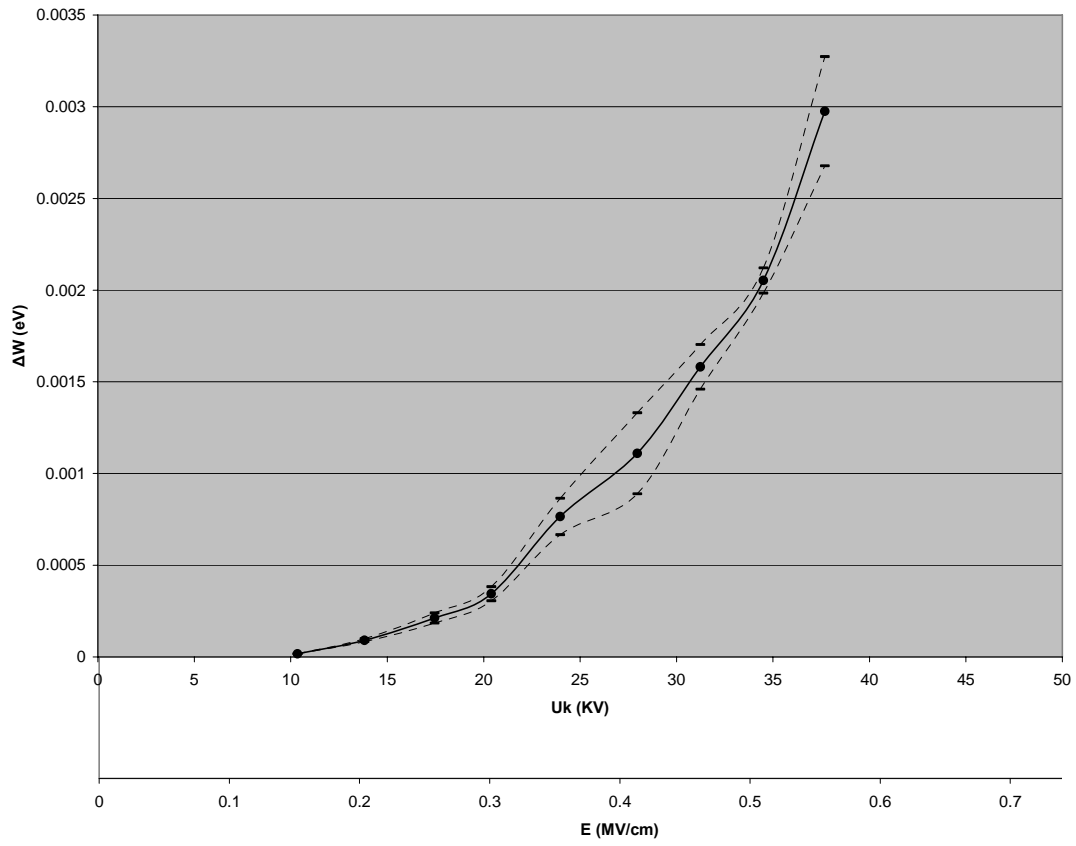


**Σχήμα 3.3-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

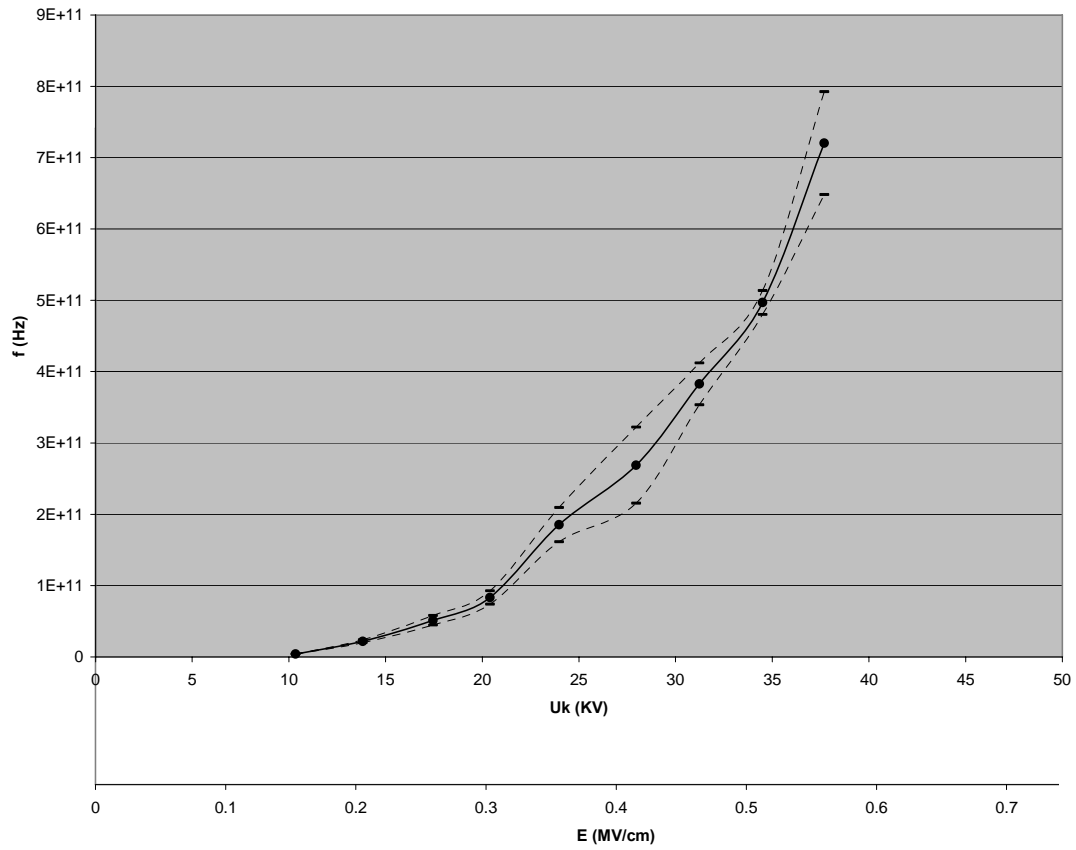




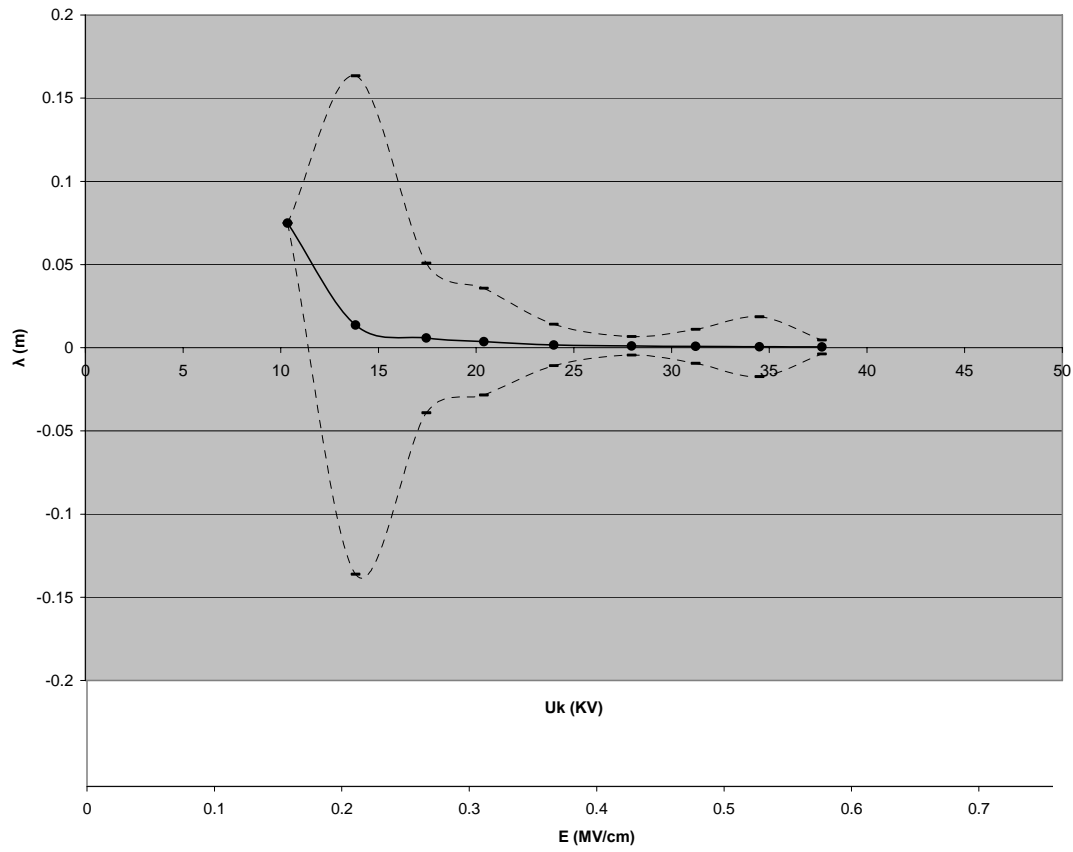
**Σχήμα 3.3-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



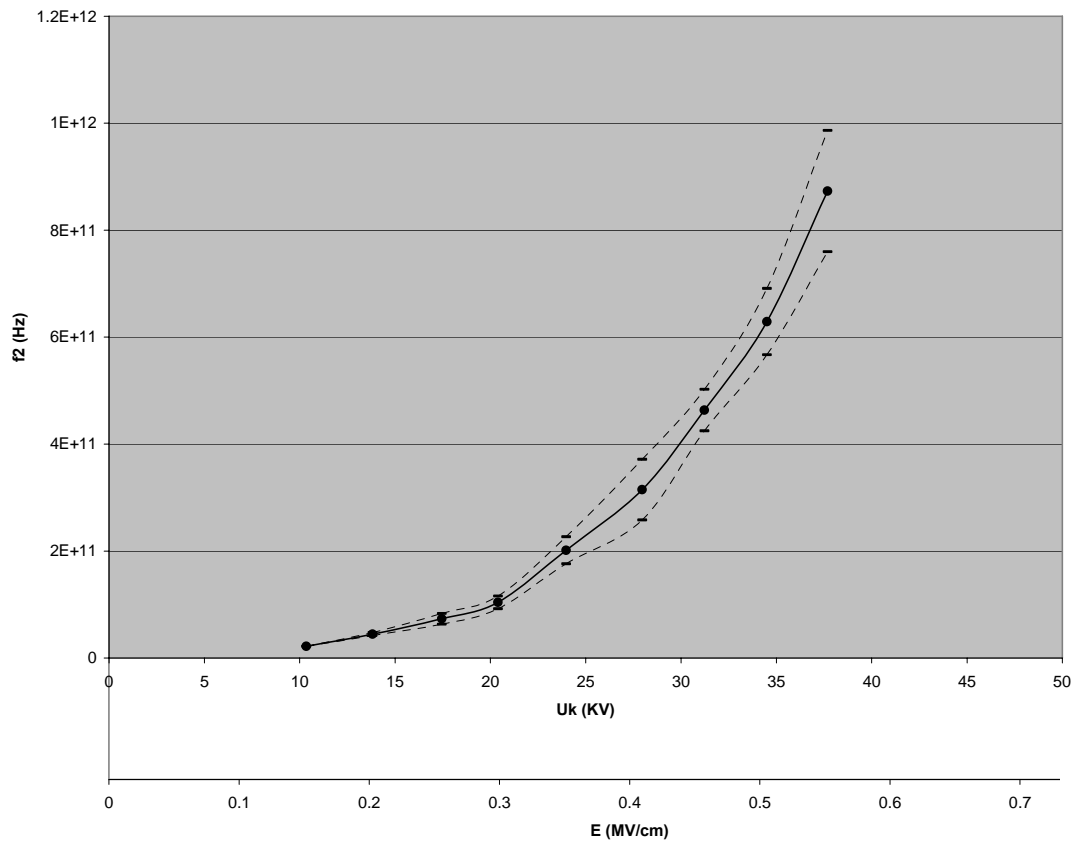
**Σχήμα 3.3-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



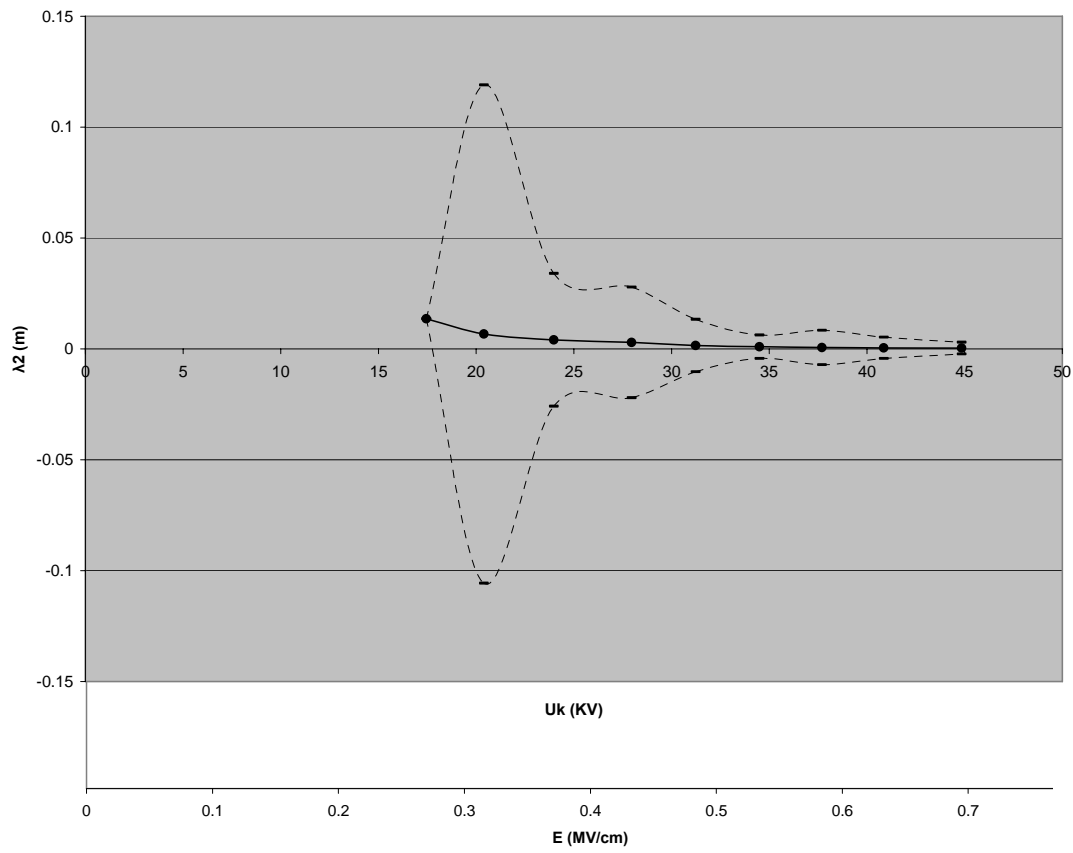
**Σχήμα 3.3-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta = 40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



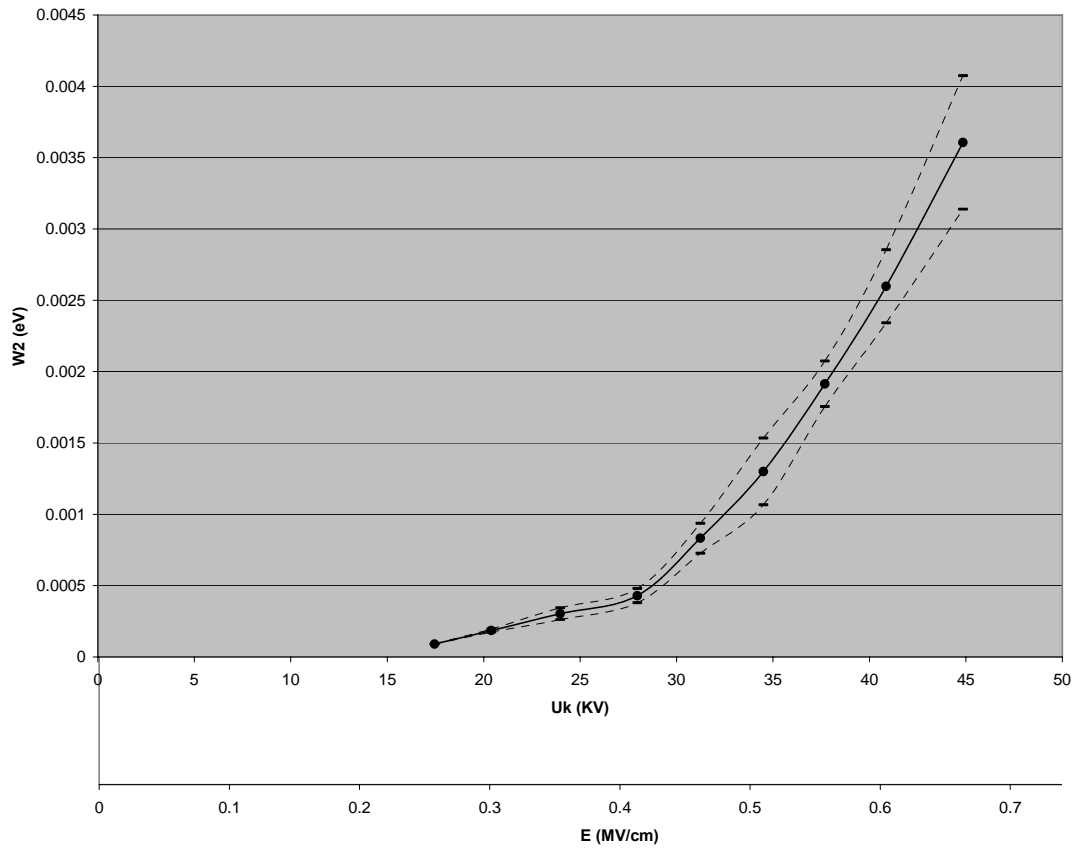
**Σχήμα 3.3-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



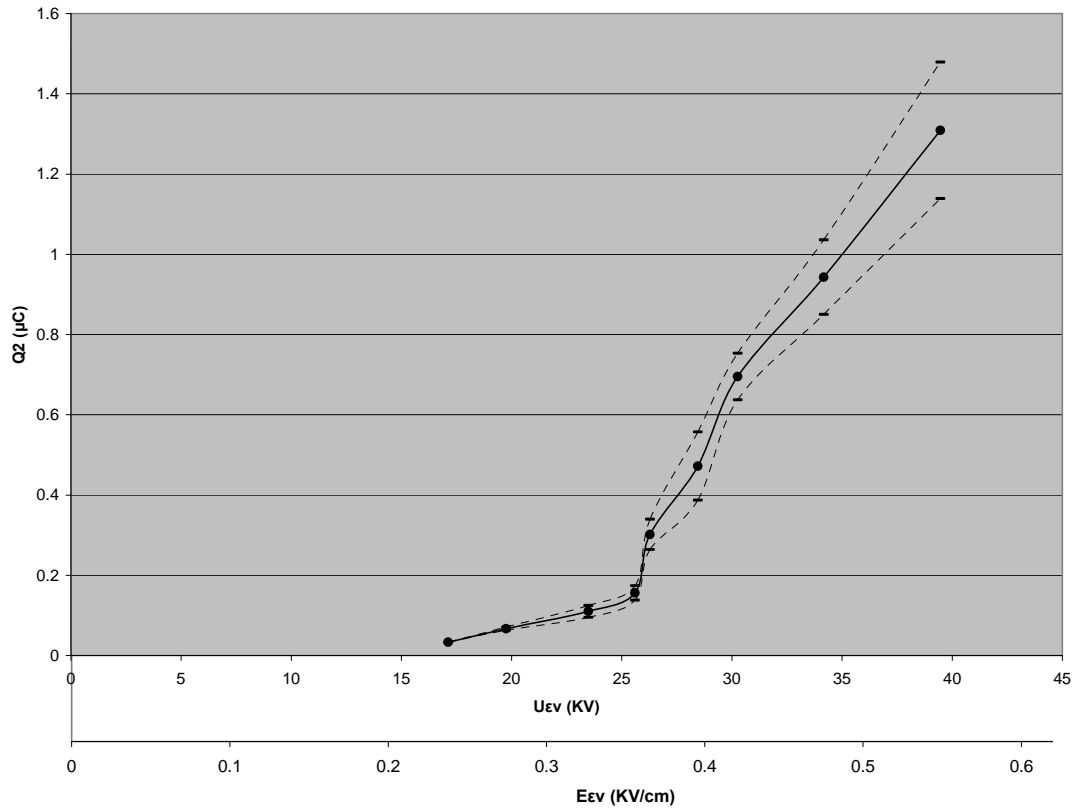
**Σχήμα 3.3-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta = 40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.3-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

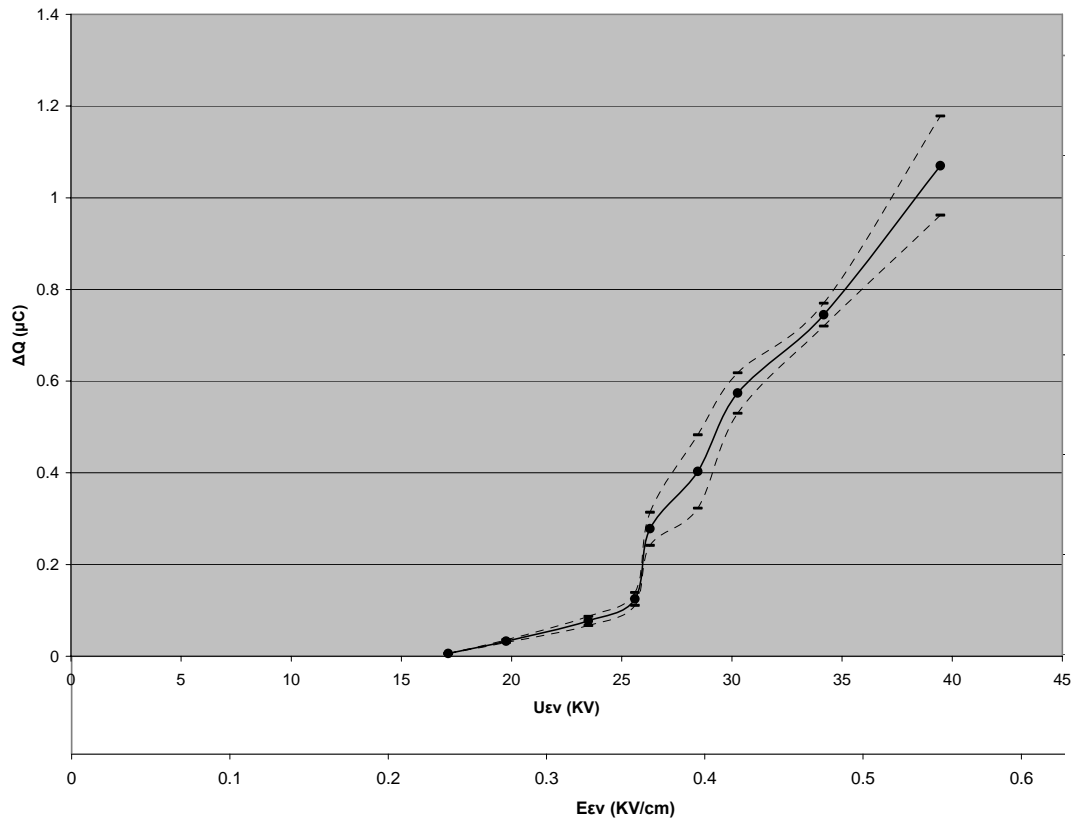


**Σχήμα 3.3-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

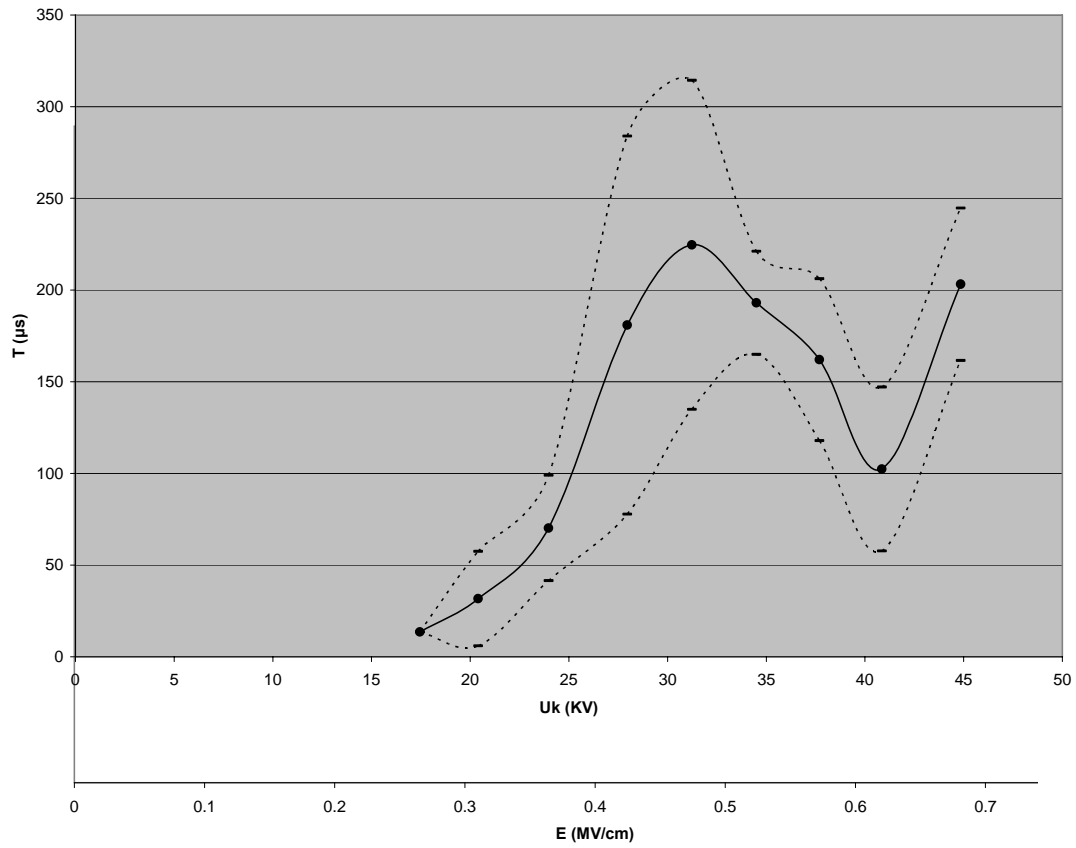


**Σχήμα 3.3-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{εν}, E_{εν})$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .





**Σχήμα 3.3-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{\epsilon\nu}, E_{\epsilon\nu})$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.3-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta = 40^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .

### 3.4. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 4

ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=1\text{mm}$

U (KV)	U <sub>κ</sub> (KV)	T <sub>1</sub> (μs)	T <sub>2</sub> (μs)	Q <sub>1</sub> (μC)	Q <sub>2</sub> (μC)	U <sub>ev</sub> (KV)	T (μs)	Q (μC)	(Q/T)*10 <sup>-3</sup> (μC/μs)
15	10,5	-	-	0,059	-	-	-	-	-
		-	-	0,001	-	-	-	-	-
20	13,78	-	-	0,175	-	-	-	-	-
		-	-	0,004	-	-	-	-	-
25	17,17	126	177,75	0,1968	0,163	15,61	51,75	0,029	0,785
		3,18	41,73	0,07	0,01	0,28	39,87	0,008	0,29
30	21,24	83,7	183,6	0,126	0,356	17,54	99,9	0,222	2,576
		16,31	30	0,01	0,05	1,61	32,34	0,04	1
35	24,46	61,42	215,99	0,132	0,931	21,16	154,56	0,799	5,267
		13,22	29,26	0,016	0,2	0,85	30,95	0,2	1,45
40	27,9	ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ							

U <sub>κ</sub> (KV)	C <sub>m</sub> (nF)	K	ΔQ (μC)	ΔUm (KV)	ΔW (eV)	f (Hz)	λ (m)	E (MV/cm)
10.5	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.156426
			-	-	-	-	-	0.156426
13.78	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.20529
			-	-	-	-	-	0.20529
17.17	1000	5.51	-0.0338	-3.4E-05	-9.3E-05	-2.3E+10	-0.0133	0.255793
			-0.06	-0.00006	-0.00017	-4E+10	-0.00749	0.255793
21.24	1000	5.51	0.23	0.00023	0.000634	1.53E+11	0.001954	0.316427
			0.04	0.00004	0.00011	2.67E+10	0.011236	0.316427
24.46	1000	5.51	0.799	0.000799	0.002201	5.33E+11	0.000562	0.364398
			0.184	0.000184	0.000507	1.23E+11	0.002443	0.364398

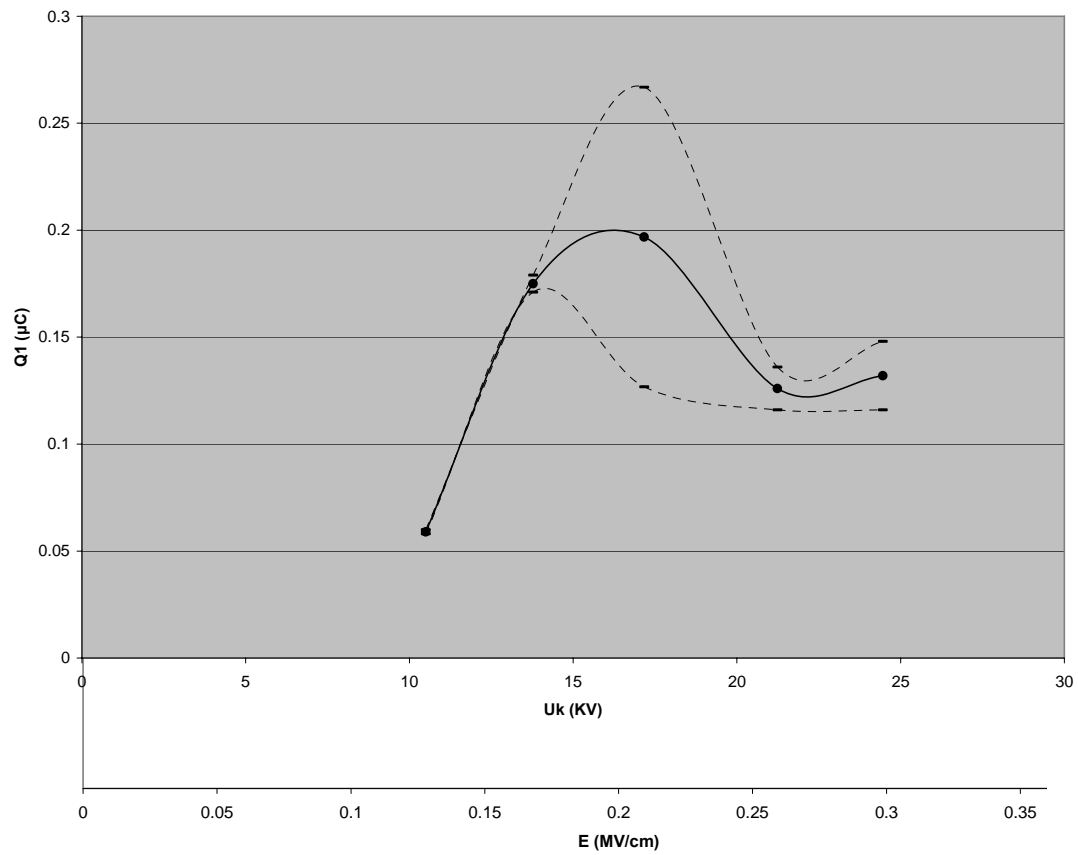
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4-1:** Υπολογισμός ΔQ, ΔUm, ΔW, f, λ, E για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  – πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

$U_{\kappa}$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$Q_2$ ( $\mu$ C)	$W_2$ (eV)	$f_2$ (Hz)	$\lambda_2$ (m)	E (MV/cm)
10.5	1000	5.51	-	-	-	-	0.156426
			-	-	-	-	0.156426
13.78	1000	5.51	-	-	-	-	0.20529
			-	-	-	-	0.20529
17.17	1000	5.51	0.163	0.000449	1.09E+11	0.002757	0.255793
			0.01	2.76E-05	6.67E+09	0.044943	0.255793
21.24	1000	5.51	0.356	0.000981	2.37E+11	0.001262	0.316427
			0.05	0.000138	3.34E+10	0.008989	0.316427
24.46	1000	5.51	0.931	0.002565	6.21E+11	0.000483	0.364398
			0.2	0.000551	1.33E+11	0.002247	0.364398

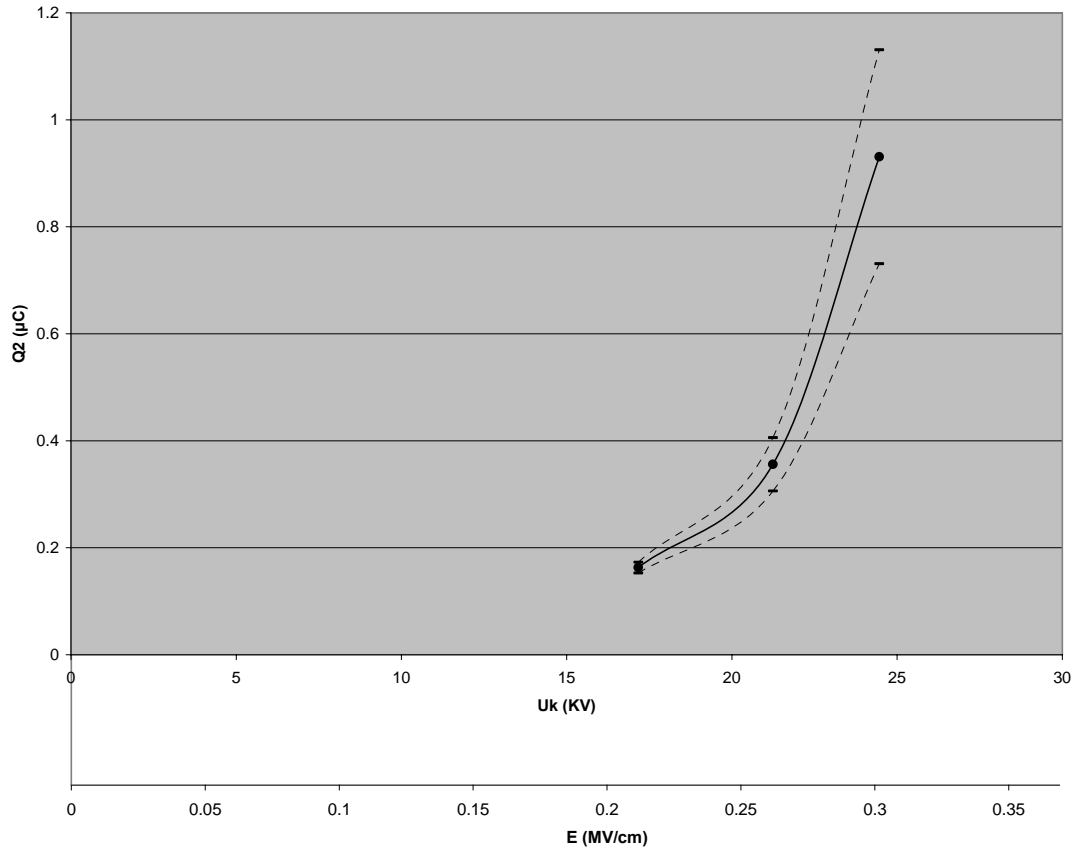
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4-2:** Υπολογισμός  $Q_2$ ,  $W_2$ ,  $f_2$ ,  $\lambda_2$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  – πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

$U_{\kappa}$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{\varepsilon\nu}$ (KV)	$E_{\varepsilon\nu}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu$ C)	$Q_2$ ( $\mu$ C)
10.5	0.105	-	-	-	-
		-	-	-	-
13.78	0.1378	-	-	-	-
		-	-	-	-
17.17	0.1717	15.61	0.232553	-0.0338	0.163
		0.28	0.004171	-0.06	0.01
21.24	0.2124	17.54	0.261306	0.23	0.356
		1.61	0.023985	0.04	0.05
24.46	0.2446	21.16	0.315235	0.799	0.931
		0.85	0.012663	0.184	0.2

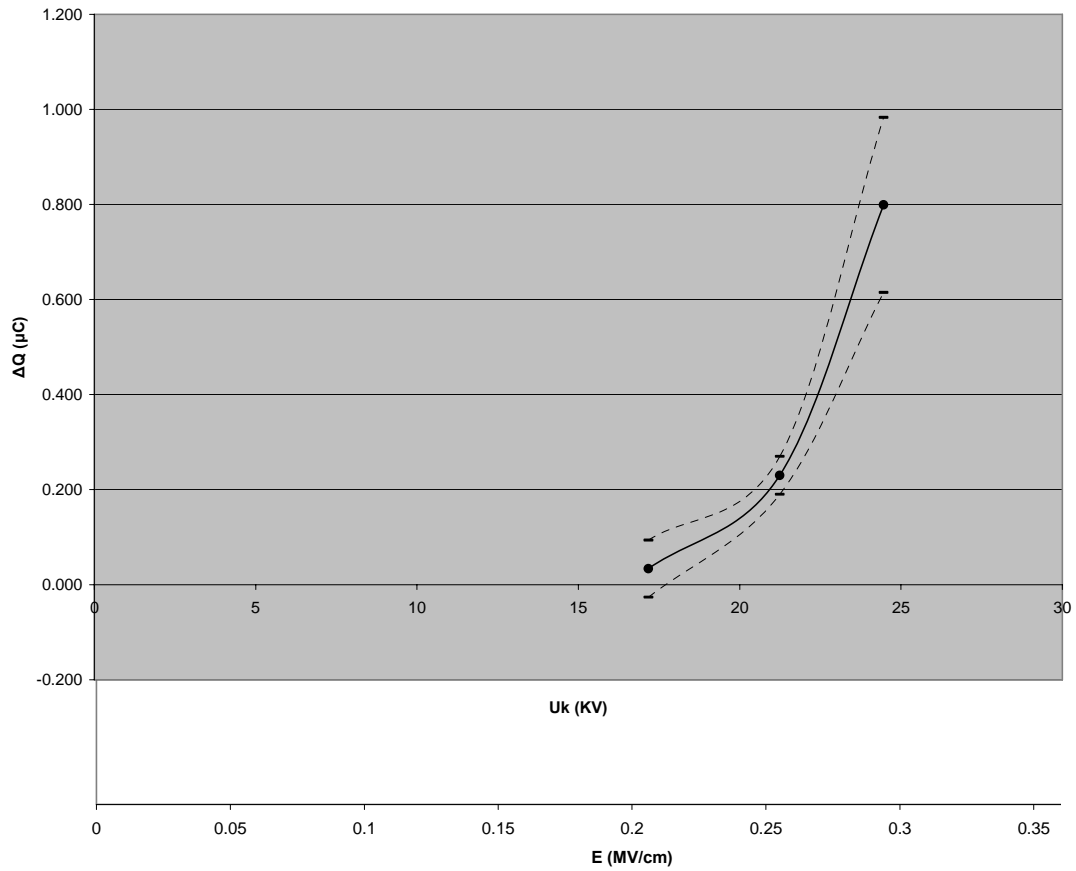
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4-3:** Υπολογισμός  $E_{\varepsilon\nu}$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  – πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



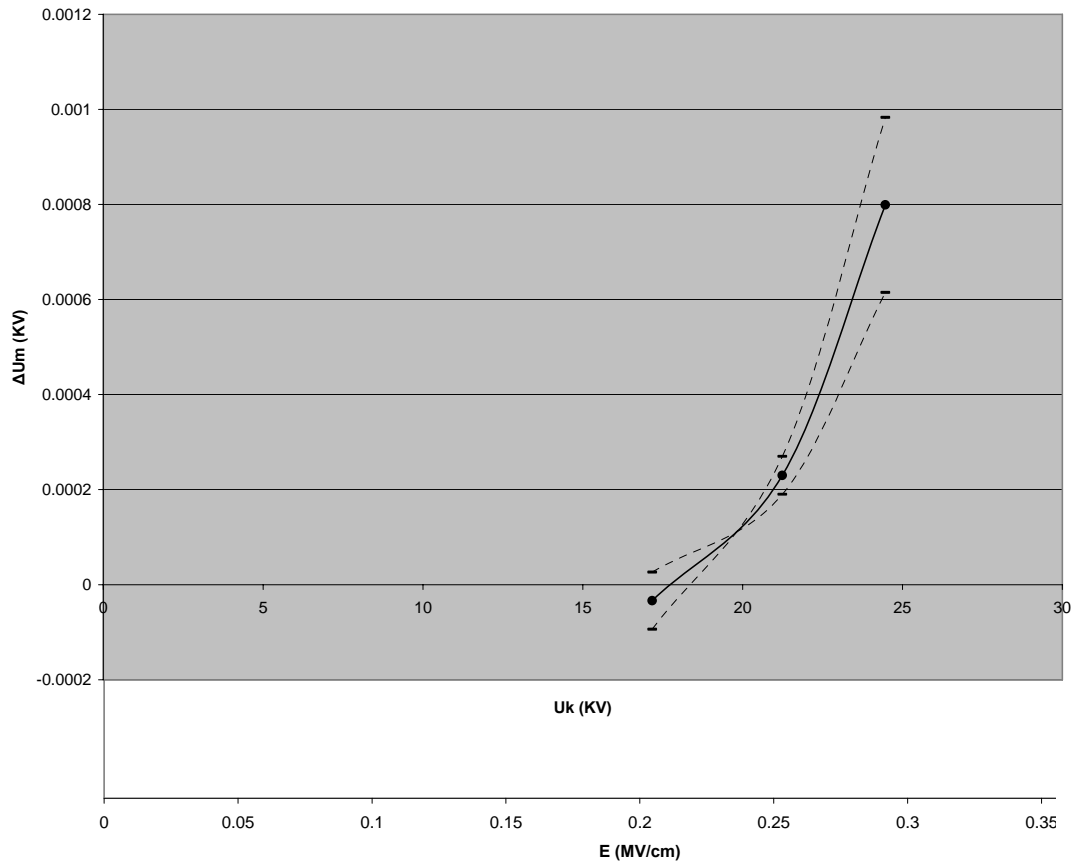
**Σχήμα 3.4-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.4-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

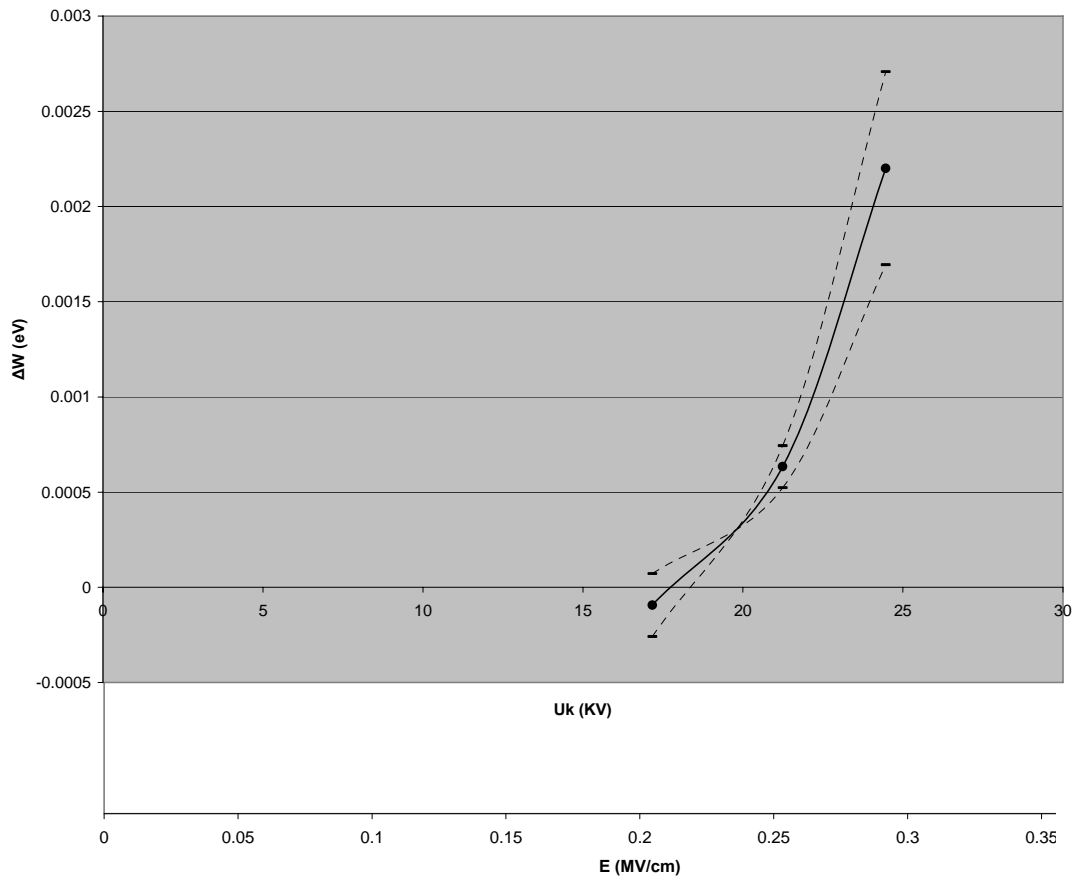


**Σχήμα 3.4-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

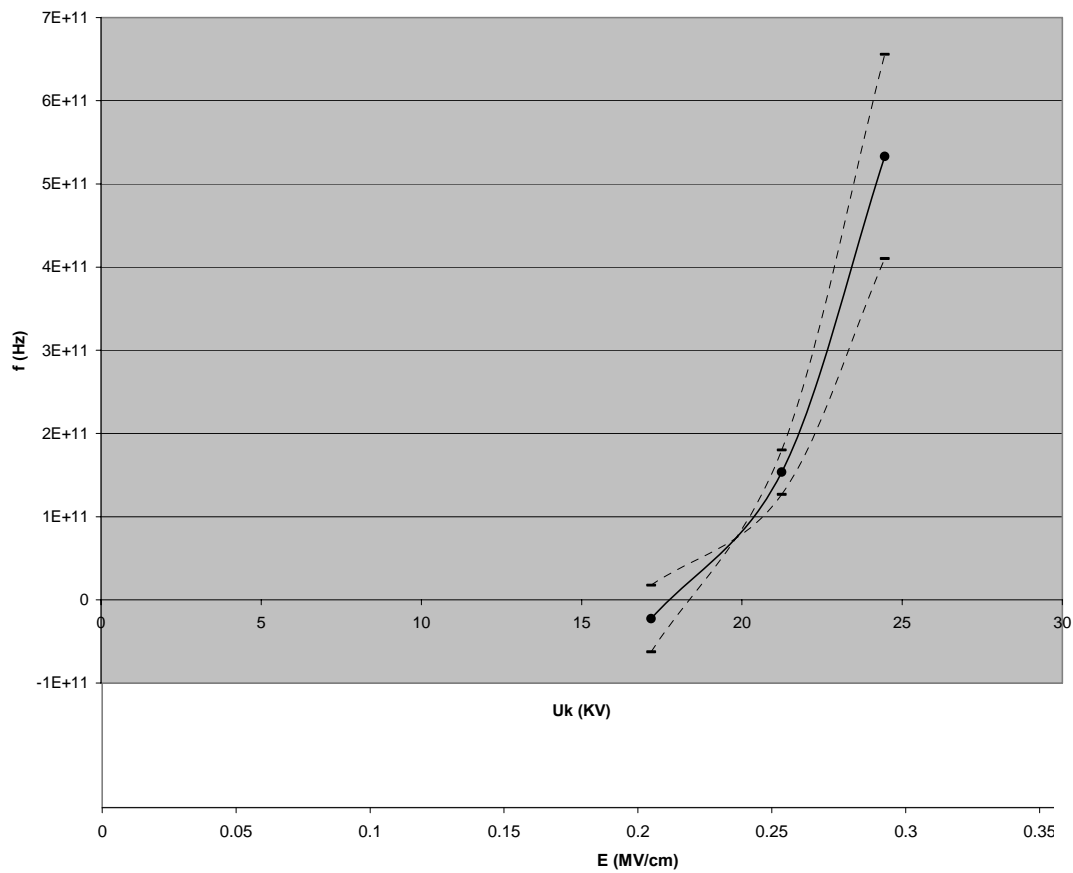


**Σχήμα 3.4-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

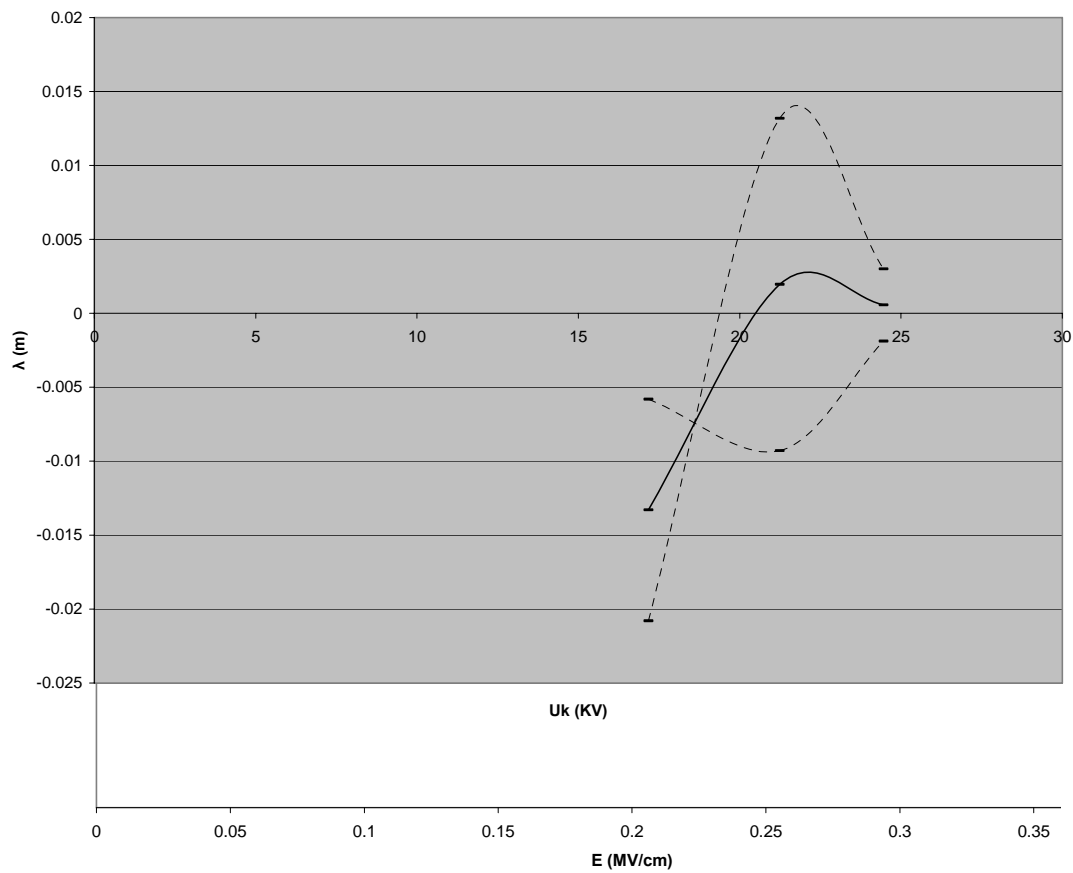




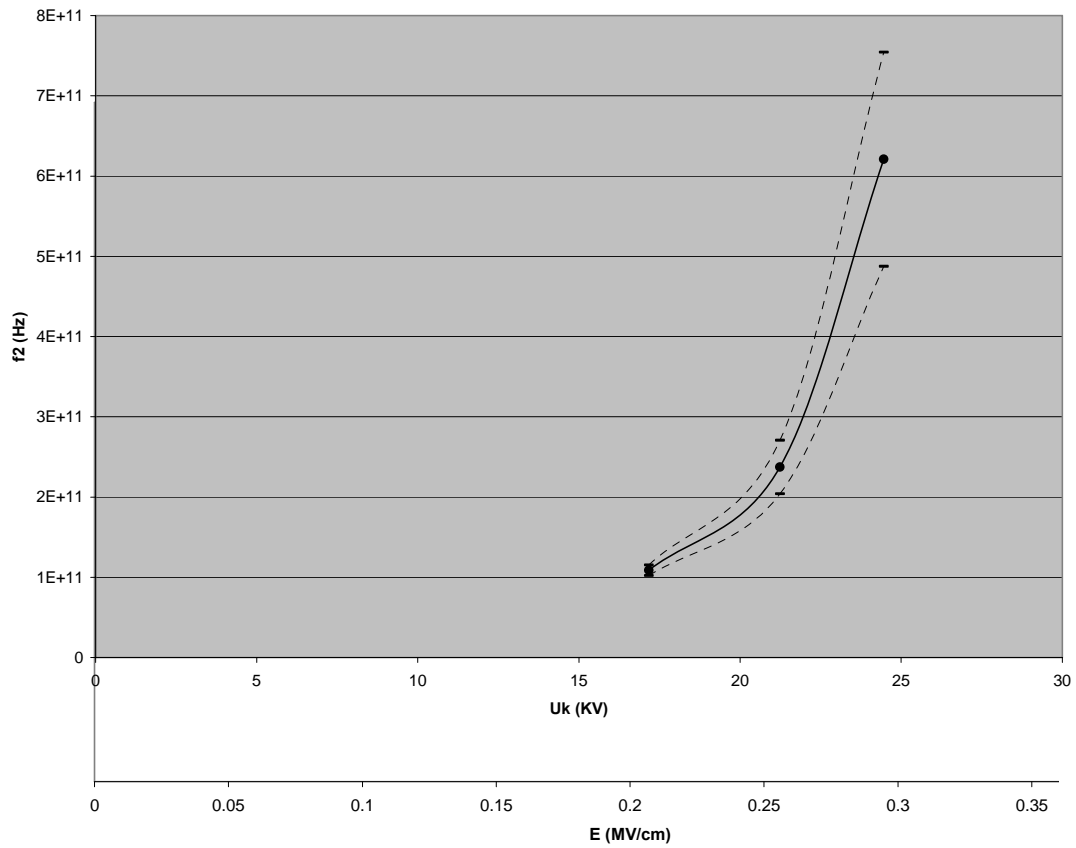
**Σχήμα 3.4-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



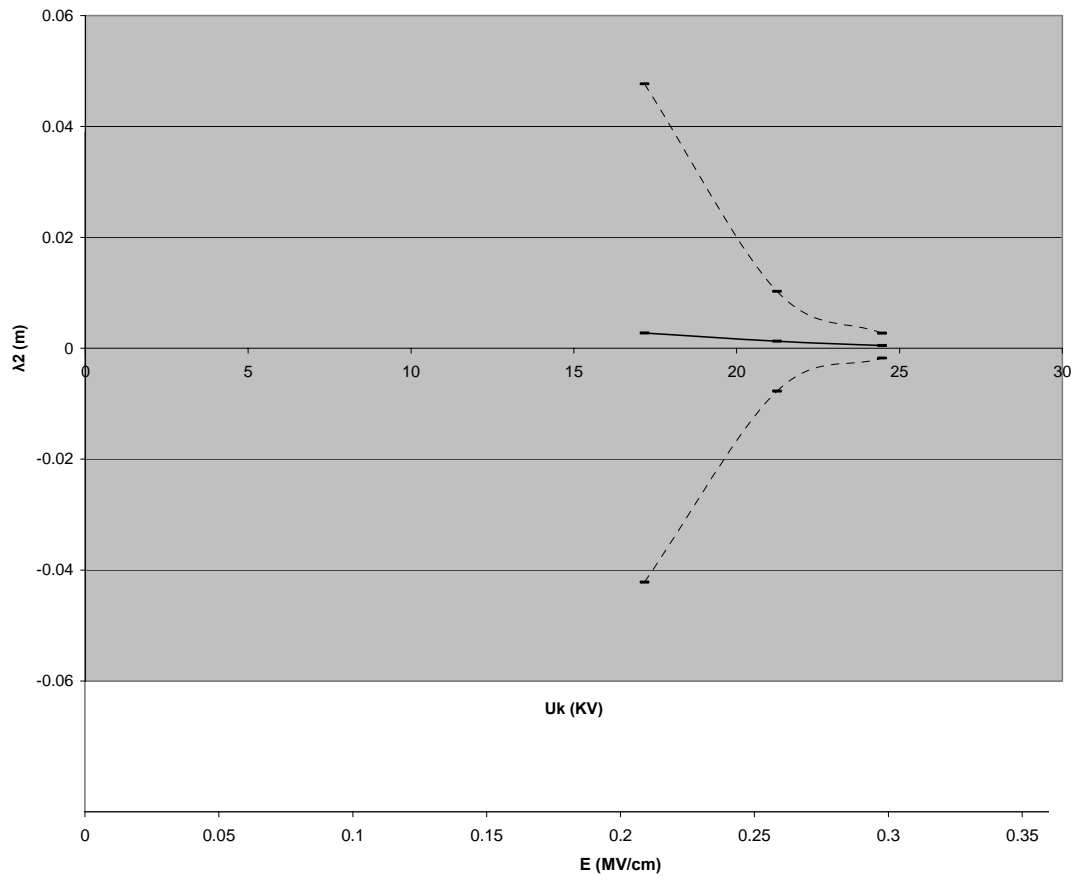
**Σχήμα 3.4-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta = 80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d = 1\text{mm}$ .



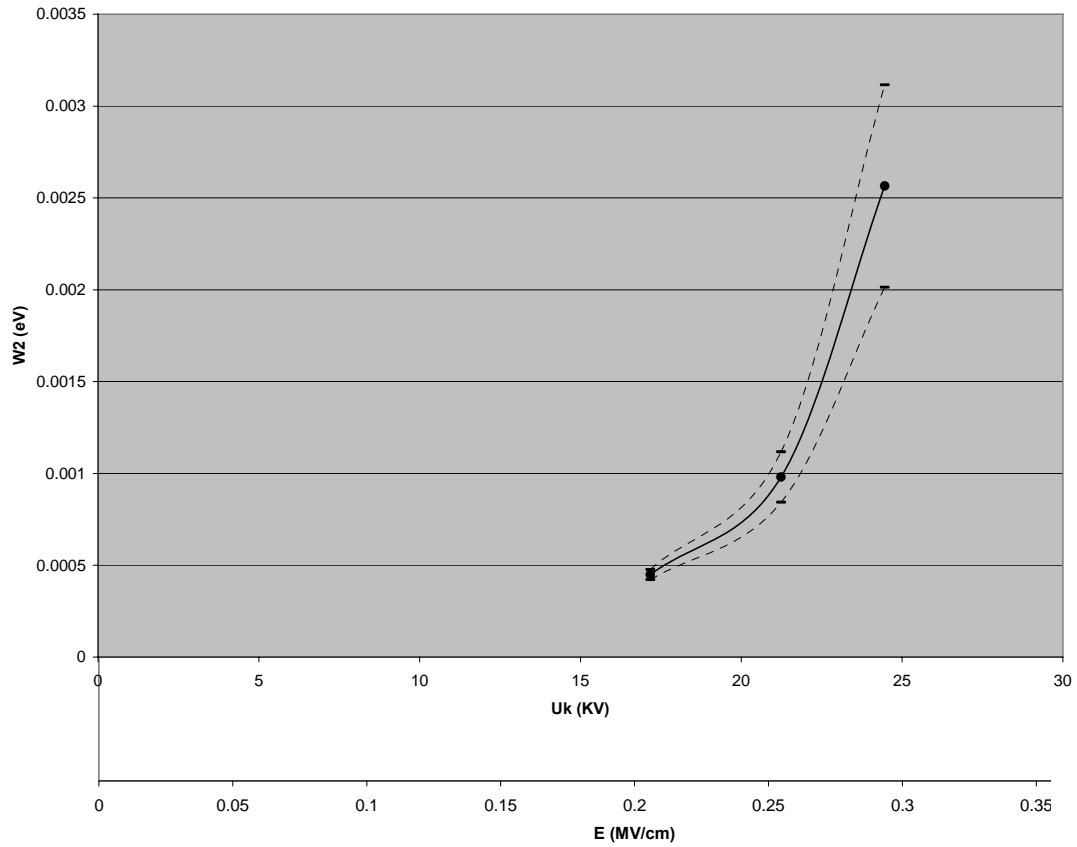
**Σχήμα 3.4-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



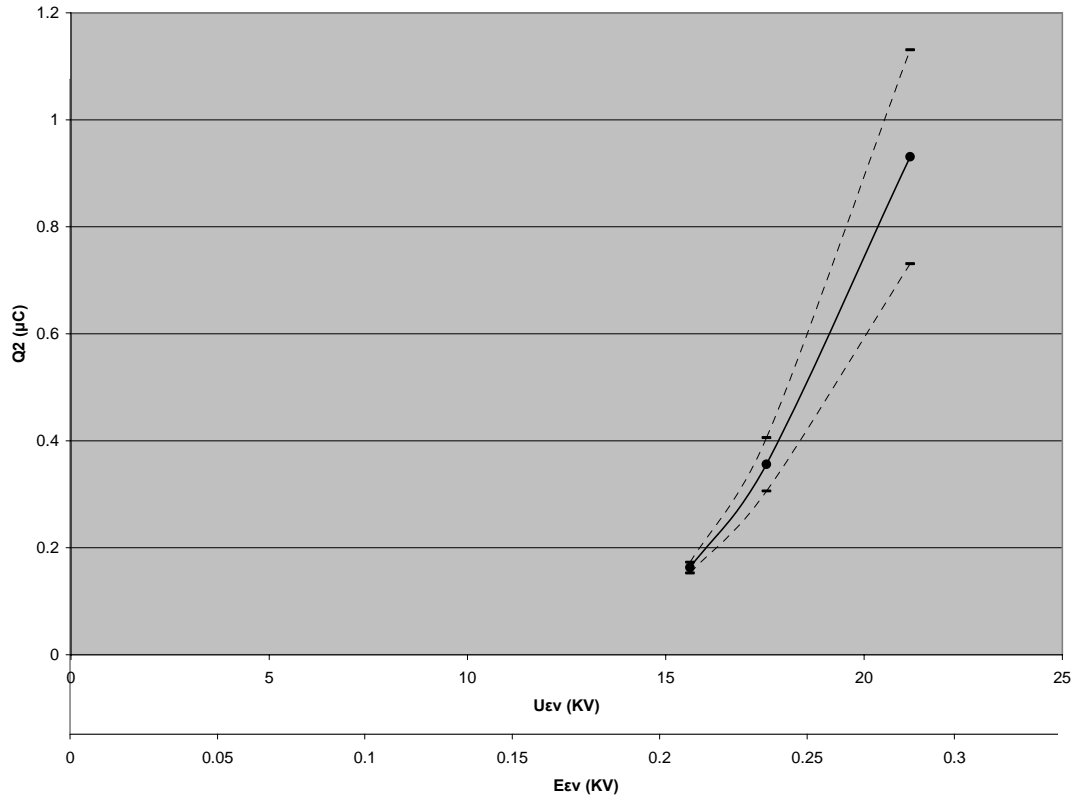
**Σχήμα 3.4-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



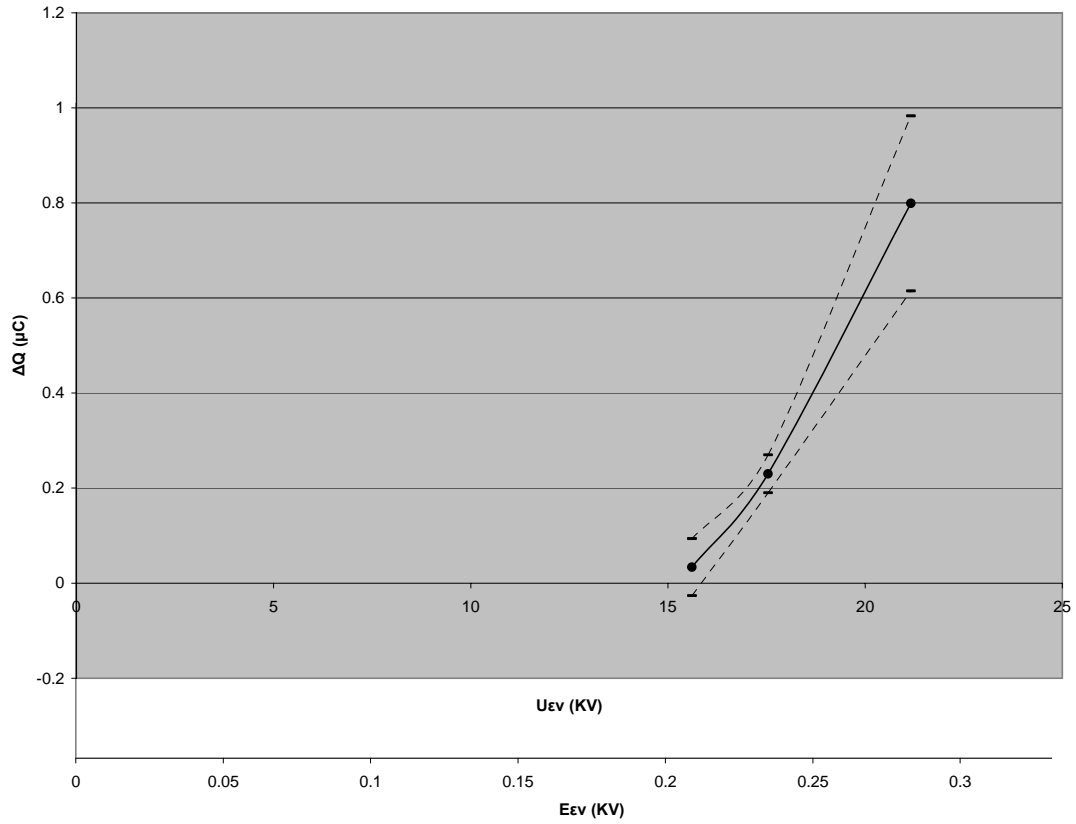
**Σχήμα 3.4-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.4-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^\circ\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

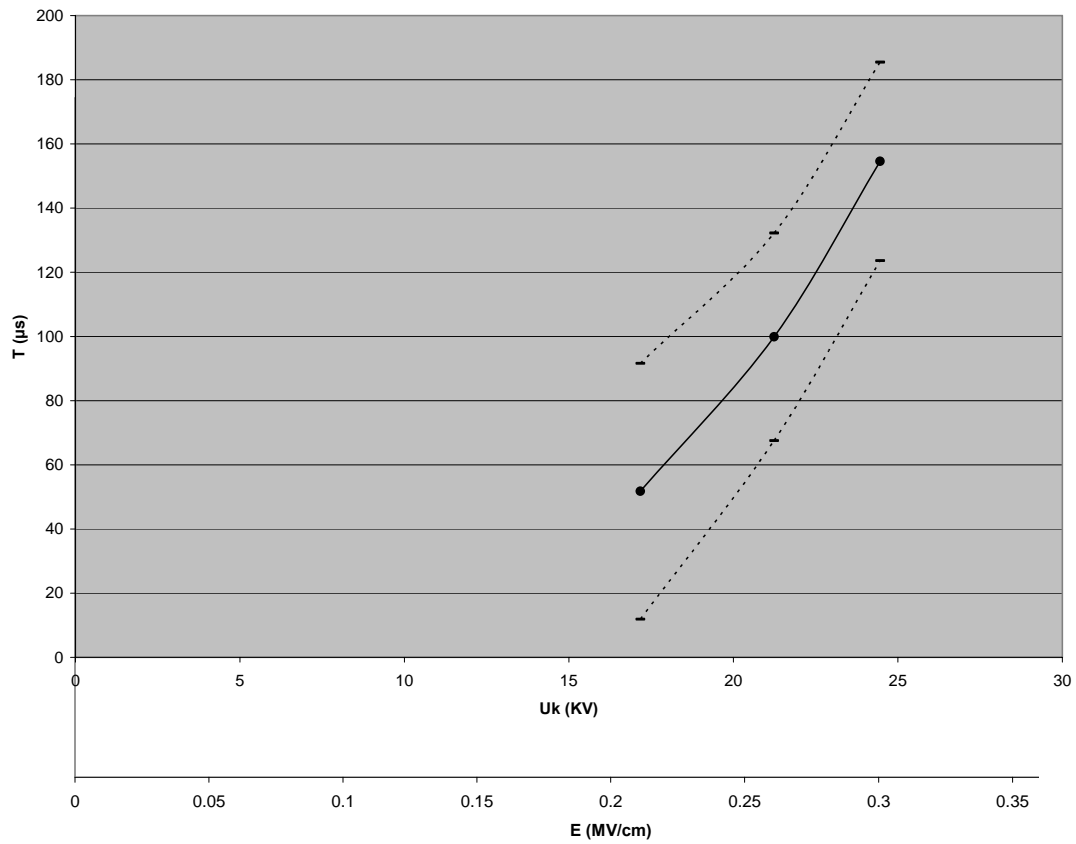


**Σχήμα 3.4-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{εν}, E_{εν})$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.4-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{\text{εν}}, E_{\text{εν}})$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .





**Σχήμα 3.4-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα -  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - πάχος δοκιμίου  $d=1\text{mm}$ .

### 3.5. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 5

**ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ -  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=2\text{mm}$**

U (KV)	U <sub>κ</sub> (KV)	T <sub>1</sub> ( $\mu\text{s}$ )	T <sub>2</sub> ( $\mu\text{s}$ )	Q <sub>1</sub> ( $\mu\text{C}$ )	Q <sub>2</sub> ( $\mu\text{C}$ )	U <sub>εν</sub> (KV)	T ( $\mu\text{s}$ )	Q ( $\mu\text{C}$ )	(Q/T)*10 <sup>-3</sup> ( $\mu\text{C}/\mu\text{s}$ )
15	10,2	-	-	0,042	-	-	-	-	-
		-	-	0,003	-	-	-	-	-
20	13,88	362,25	369	0,044	0,061	13,56	6,76	0,007	1,083
		40,87	67,59	0,002	0,001	0,45	0,01	0,001	0,27
25	17,45	229,5	243	0,076	0,114	14,48	13,5	0,04	2,962
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
30	20,91	236,5	254	0,094	0,114	14,21	17,5	0,068	3,38
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000
35	24,15	93,5	261,9	0,088	0,239	23,27	168,75	0,151	1,731
		15,03	82,05	0,009	0,024	1,59	82	0,02	1,94
40	27,92	44,55	245,7	0,08	0,304	18,88	201,75	0,224	1,225
		9,15	51,07	0,008	0,1	0,95	63,23	0,01	0,36
45	31,5	35,1	305,1	0,072	0,491	19,34	264	0,418	1,648
		5,05	44,24	0,01	0,04	0,86	67,75	0,05	0,34
50	34,75	32,4	271,35	0,075	0,585	22,77	238,9	0,516	2,294
		5,05	64,09	0,006	0,02	1,02	66,76	0,036	0,57
55	39,05	29,7	243	0,076	0,87	19,74	212,65	0,794	3,836
		6,88	33,88	0,018	0,091	2,41	37,13	0,098	0,81
60	41,7	31,05	301,05	0,067	1,207	19	270	1,194	4,595
		6,88	58,78	0,000	0,12	4,21	53,49	0,12	1,101
65	46,02	41,82	303,44	0,078	1,39	19,44	261,6	1,31	5,25
		1,61	55,8	0,005	0,081	0,29	54,17	0,075	1,23

$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta U_m$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
10.2	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.103747
			-	-	-	-	-	0.103747
13.88	1000	5.51	0.017	0.000017	4.68E-05	1.13E+10	0.026437	0.141177
			-0.001	-1E-06	-2.8E-06	-6.7E+08	-0.44943	0.141177
17.45	1000	5.51	0.038	0.000038	0.000105	2.53E+10	0.011827	0.177489
			0	0	0	0	-	0.177489
20.91	1000	5.51	0.02	0.00002	5.51E-05	1.33E+10	0.022471	0.212681
			0	0	0	0	-	0.212681
24.15	1000	5.51	0.151	0.000151	0.000416	1.01E+11	0.002976	0.245636
			0.015	0.000015	4.13E-05	1E+10	0.029962	0.245636
27.92	1000	5.51	0.224	0.000224	0.000617	1.49E+11	0.002006	0.283982
			0.092	0.000092	0.000253	6.14E+10	0.004885	0.283982
31.5	1000	5.51	0.419	0.000419	0.001154	2.8E+11	0.001073	0.320395
			0.03	0.00003	8.27E-05	2E+10	0.014981	0.320395
34.75	1000	5.51	0.51	0.00051	0.001405	3.4E+11	0.000881	0.353452
			0.014	0.000014	3.86E-05	9.34E+09	0.032102	0.353452
39.05	1000	5.51	0.794	0.000794	0.002187	5.3E+11	0.000566	0.397188
			0.073	0.000073	0.000201	4.87E+10	0.006157	0.397188
41.7	1000	5.51	1.14	0.00114	0.003141	7.6E+11	0.000394	0.424142
			0.12	0.00012	0.000331	8E+10	0.003745	0.424142
46.02	1000	5.51	1.312	0.001312	0.003615	8.75E+11	0.000343	0.468082
			0.076	0.000076	0.000209	5.07E+10	0.005914	0.468082

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta U_m$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^\circ C$  – πάχος δοκιμίου d=2mm.

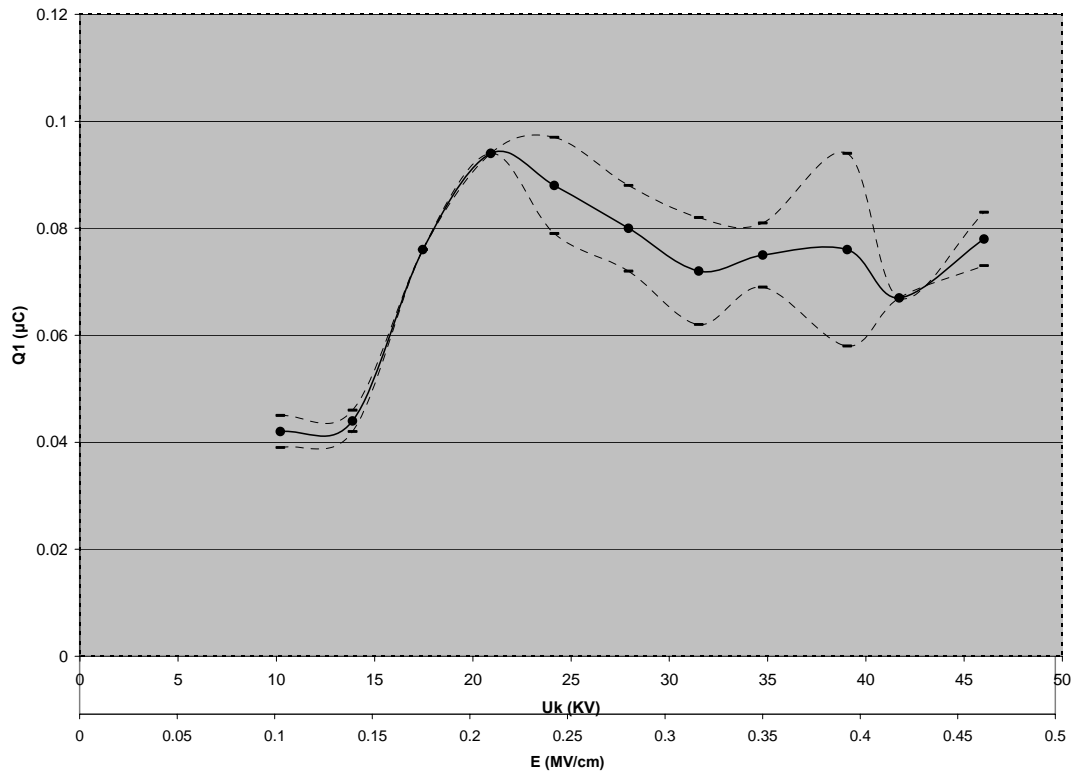
U <sub>κ</sub> (KV)	C <sub>m</sub> (nF)	K	Q <sub>2</sub> (μC)	W <sub>2</sub> (eV)	f <sub>2</sub> (Hz)	λ <sub>2</sub> (m)	E (MV/cm)
10.2	1000	5.51	-	-	-	-	0.103747
			-	-	-	-	0.103747
13.88	1000	5.51	0.061	0.000168	4.07E+10	0.007368	0.141177
			0.001	2.76E-06	6.67E+08	0.449428	0.141177
17.45	1000	5.51	0.114	0.000314	7.6E+10	0.003942	0.177489
			0	0	0	-	0.177489
20.91	1000	5.51	0.114	0.000314	7.6E+10	0.003942	0.212681
			0	0	0	-	0.212681
24.15	1000	5.51	0.239	0.000658	1.59E+11	0.00188	0.245636
			0.024	6.61E-05	1.6E+10	0.018726	0.245636
27.92	1000	5.51	0.304	0.000838	2.03E+11	0.001478	0.283982
			0.1	0.000276	6.67E+10	0.004494	0.283982
31.5	1000	5.51	0.491	0.001353	3.28E+11	0.000915	0.320395
			0.04	0.00011	2.67E+10	0.011236	0.320395
34.75	1000	5.51	0.585	0.001612	3.9E+11	0.000768	0.353452
			0.02	5.51E-05	1.33E+10	0.022471	0.353452
39.05	1000	5.51	0.87	0.002397	5.8E+11	0.000517	0.397188
			0.091	0.000251	6.07E+10	0.004939	0.397188
41.7	1000	5.51	1.207	0.003325	8.05E+11	0.000372	0.424142
			0.12	0.000331	8E+10	0.003745	0.424142
46.02	1000	5.51	1.39	0.003829	9.27E+11	0.000323	0.468082
			0.081	0.000223	5.4E+10	0.005548	0.468082

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5-2:** Υπολογισμός Q<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>, f<sub>2</sub>, λ<sub>2</sub> για Θετική πολικότητα – Θ=40<sup>0</sup>C  
πάχος δοκιμίου d=2mm.

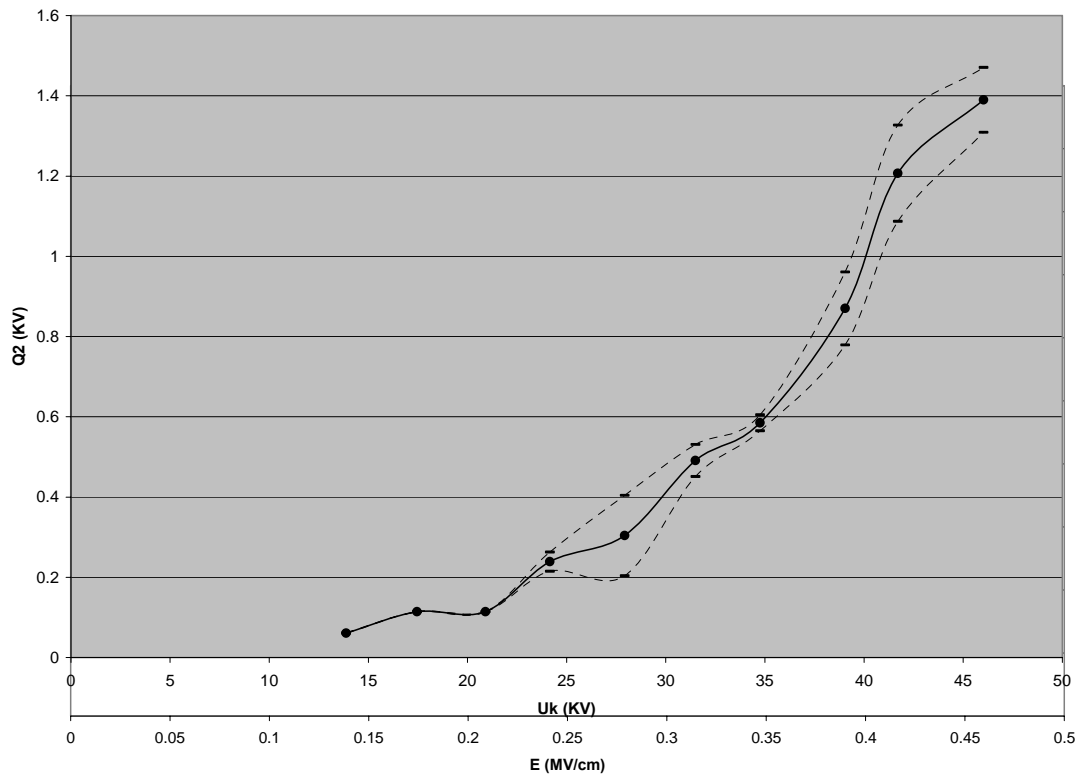
$U_K$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{ev}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
10.2	0.103747	-	-	-	-
		-	-	-	-
13.88	0.141177	13.56	0.137922	0.017	0.061
		0.45	0.004577	-0.001	0.001
17.45	0.177489	14.48	0.14728	0.038	0.114
		0	0	0	0
20.91	0.212681	14.21	0.144534	0.02	0.114
		0	0	0	0
24.15	0.245636	23.27	0.236686	0.151	0.239
		1.59	0.016172	0.015	0.024
27.92	0.283982	18.88	0.192034	0.224	0.304
		0.95	0.009663	0.092	0.1
31.5	0.320395	19.34	0.196712	0.419	0.491
		0.86	0.008747	0.03	0.04
34.75	0.353452	22.77	0.2316	0.51	0.585
		1.02	0.010375	0.014	0.02
39.05	0.397188	19.74	0.200781	0.794	0.87
		2.41	0.024513	0.073	0.091
41.7	0.424142	19	0.193254	1.14	1.207
		4.21	0.042821	0.12	0.12
46.02	0.468082	19.44	0.19773	1.312	1.39
		0.29	0.00295	0.076	0.081

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}C$   
πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .

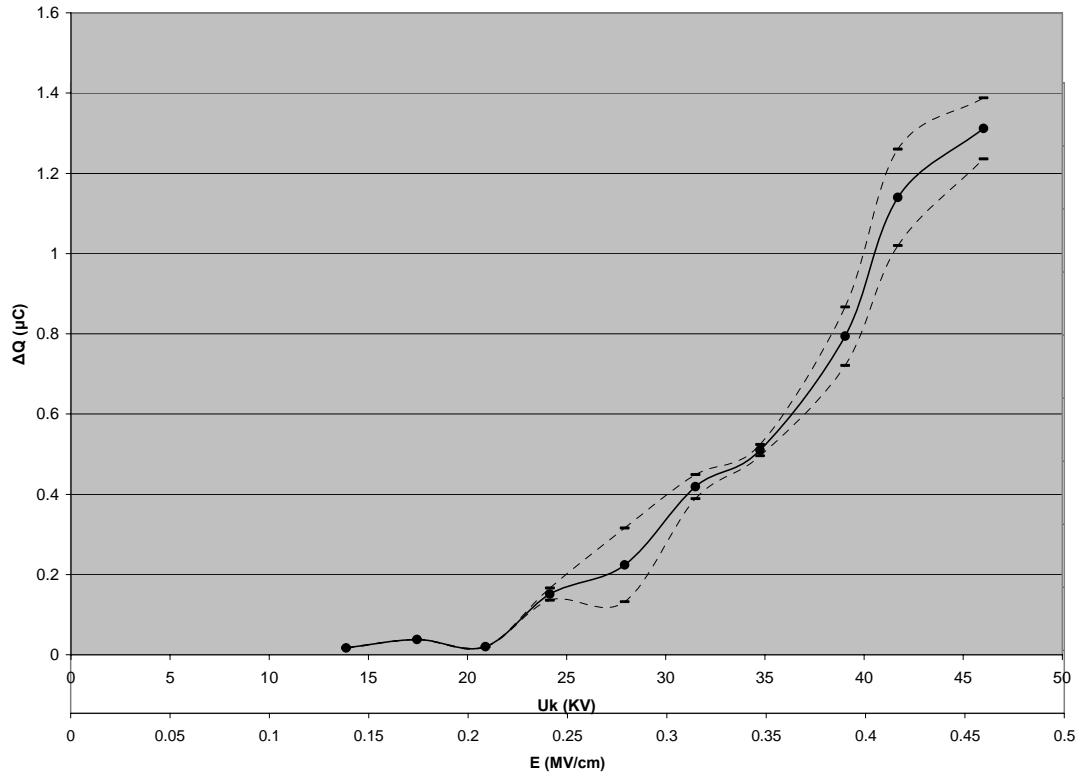
–



**Σχήμα 3.5-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

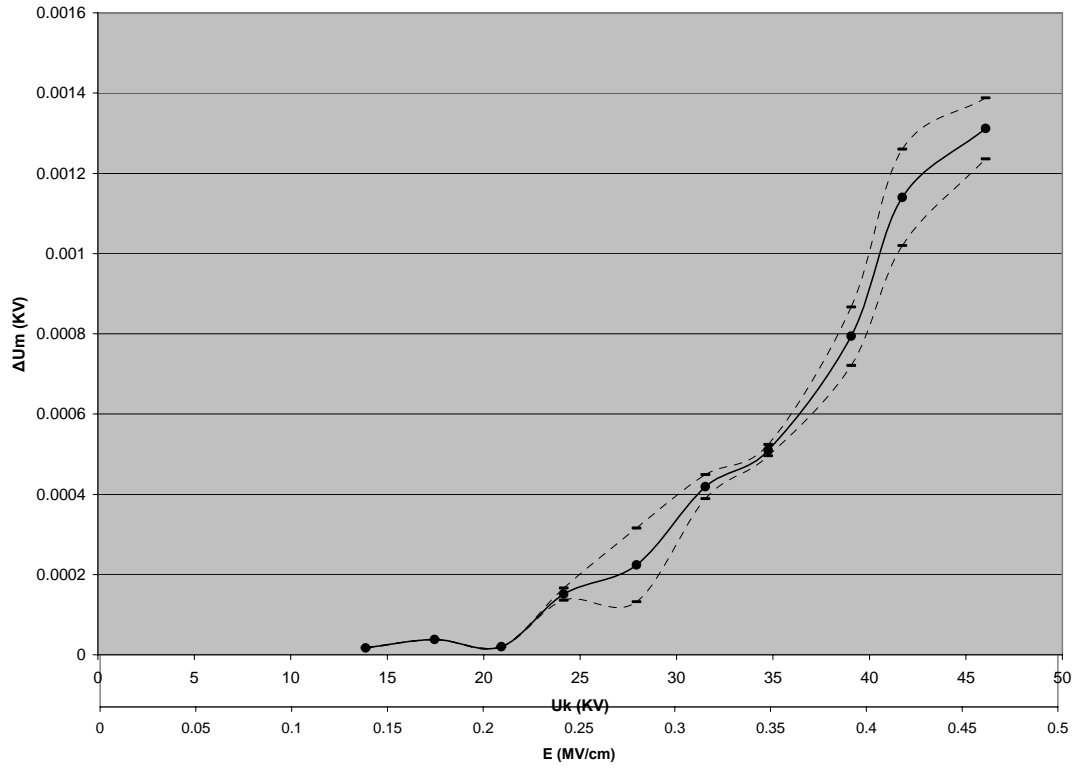


**Σχήμα 3.5-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

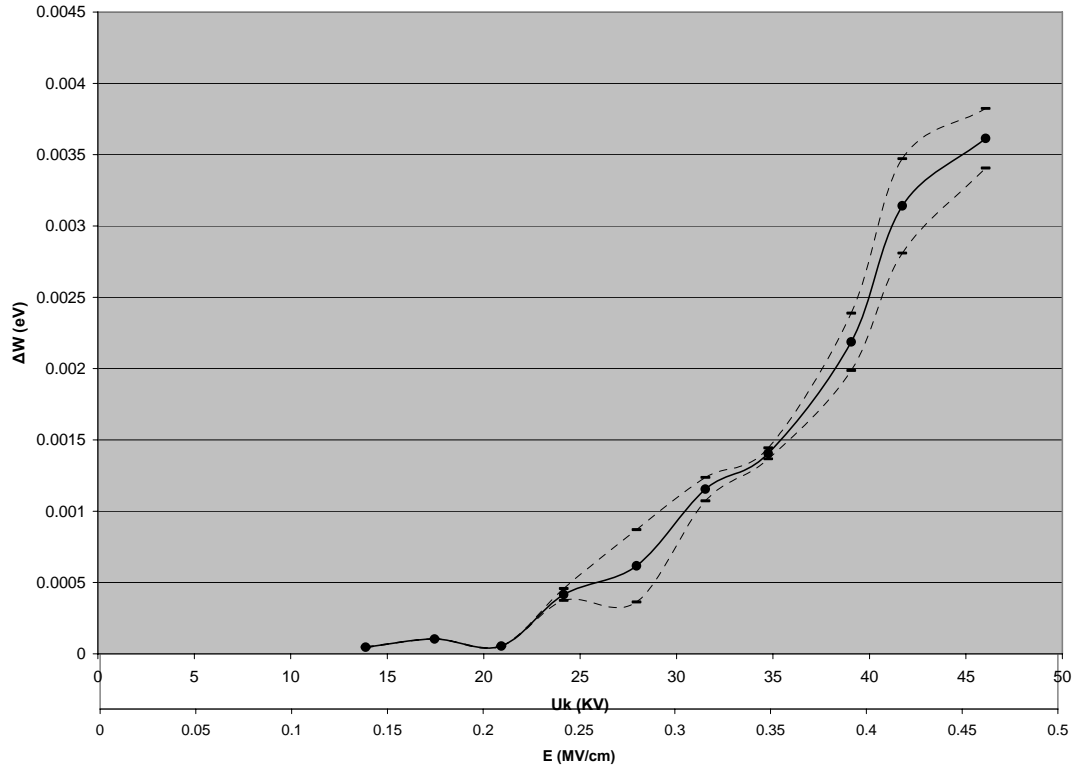


**Σχήμα 3.5-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

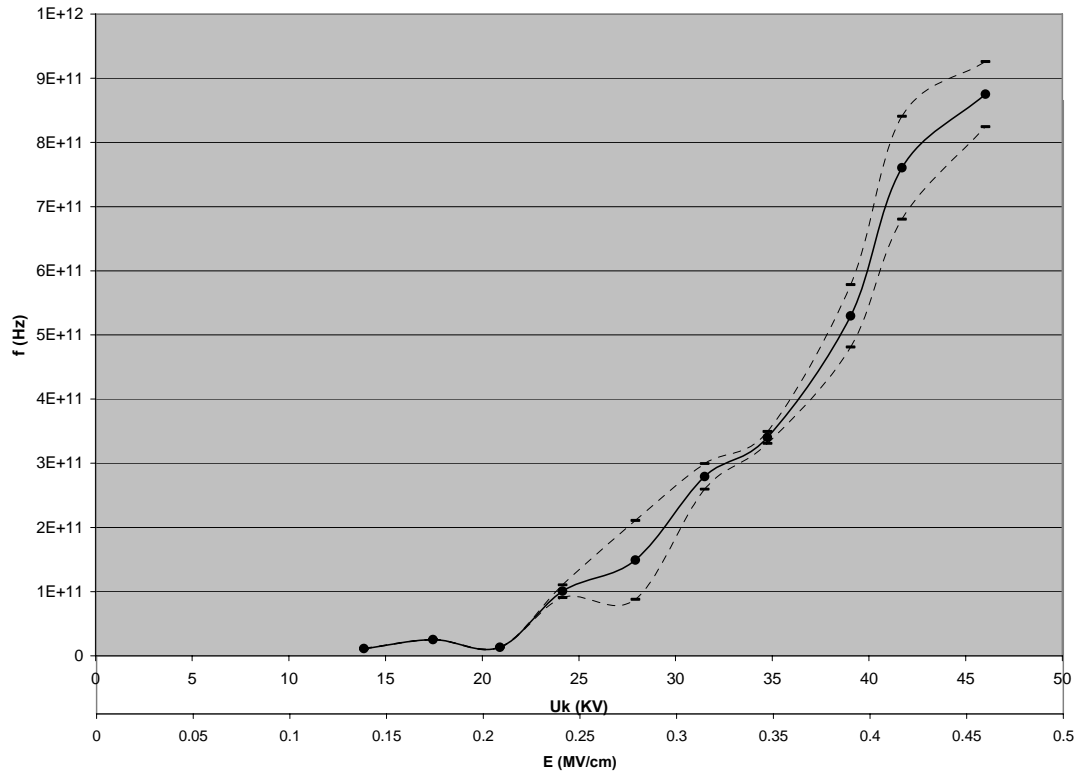




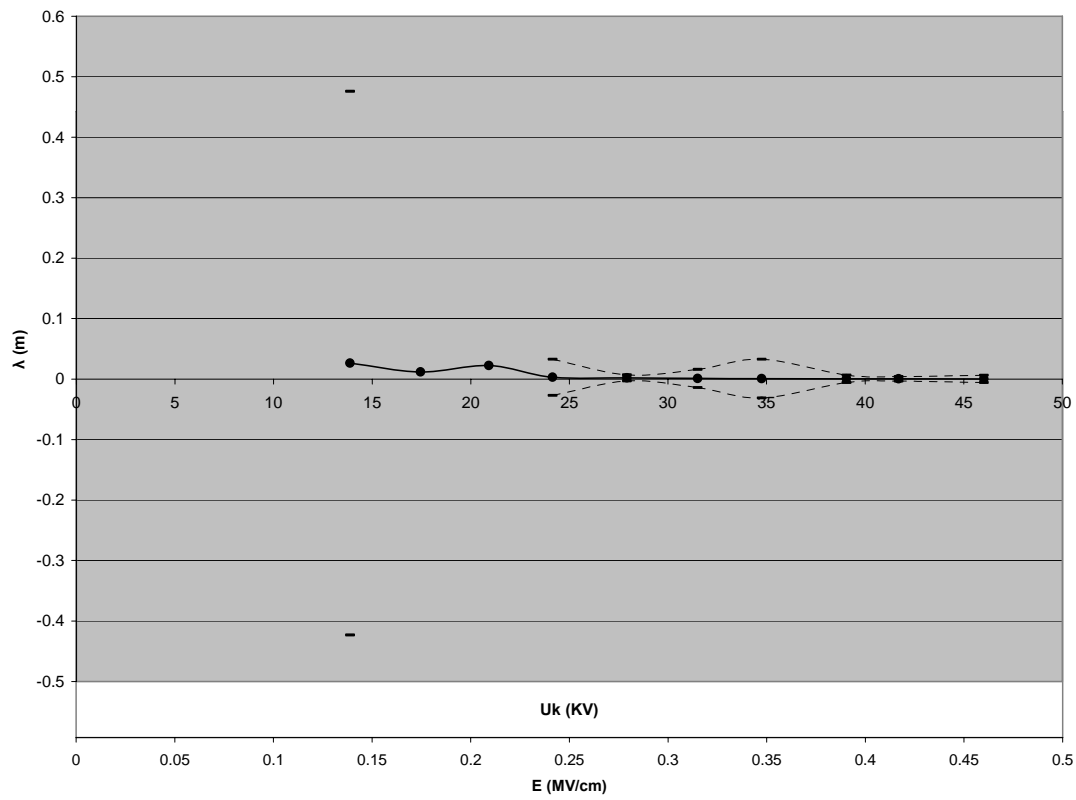
**Σχήμα 3.5-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



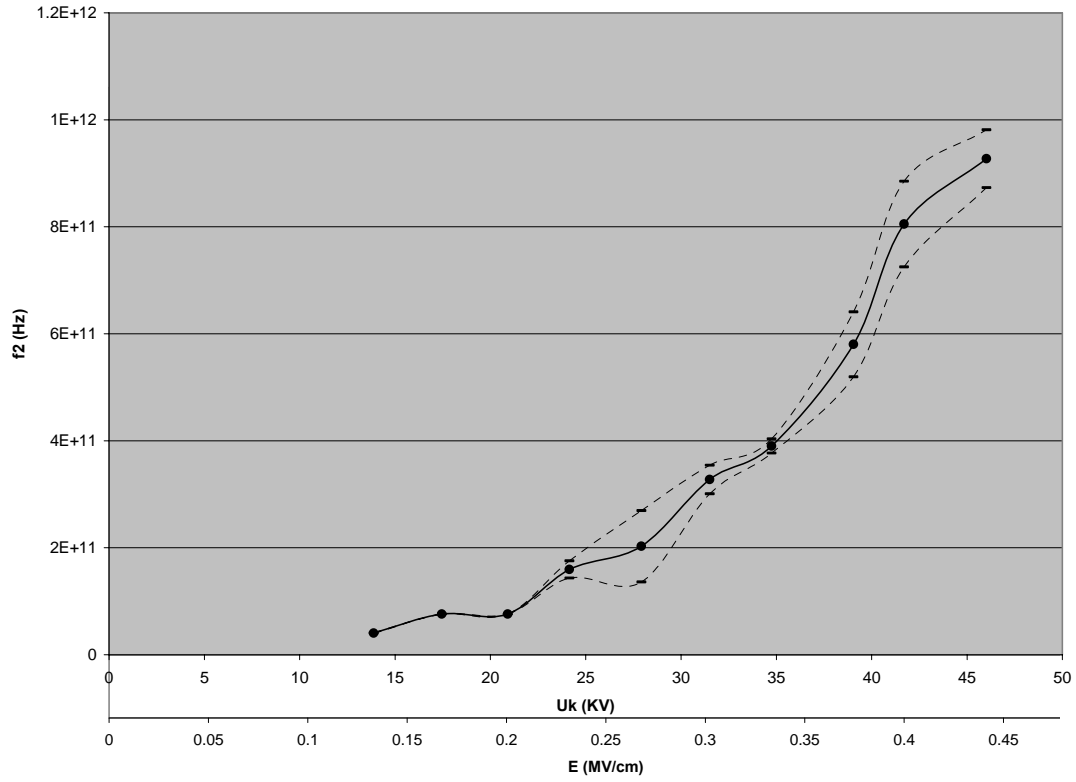
**Σχήμα 3.5-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



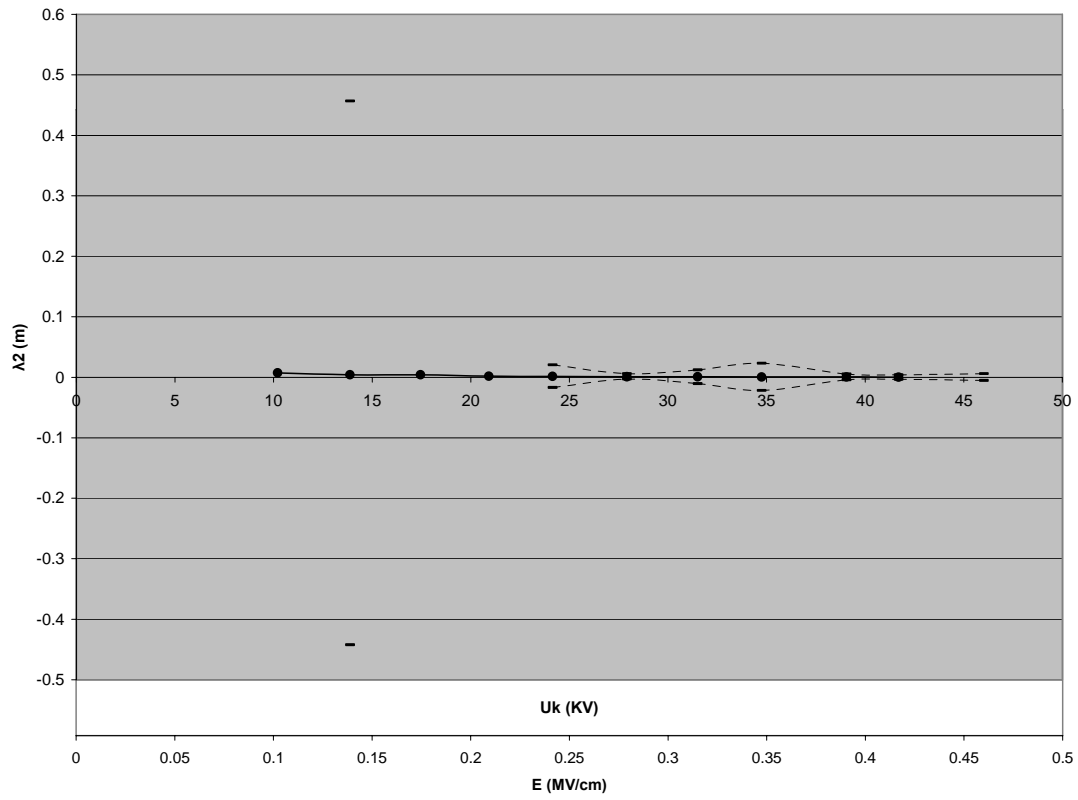
**Σχήμα 3.5-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^0\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



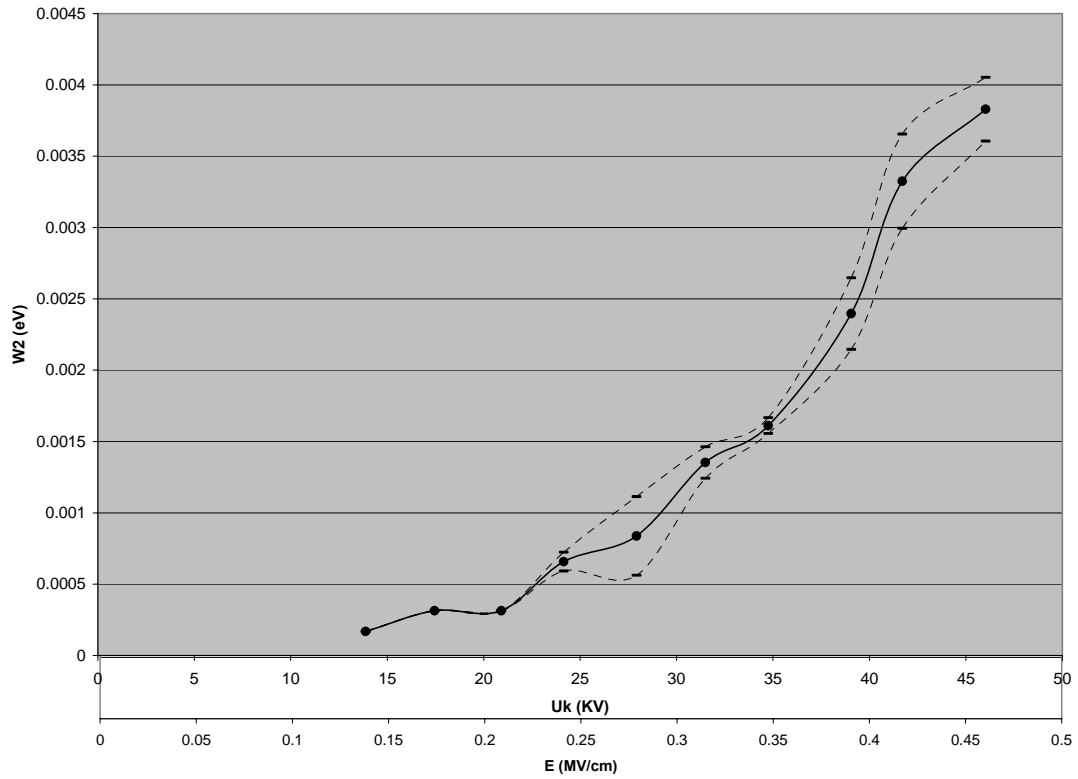
**Σχήμα 3.5-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



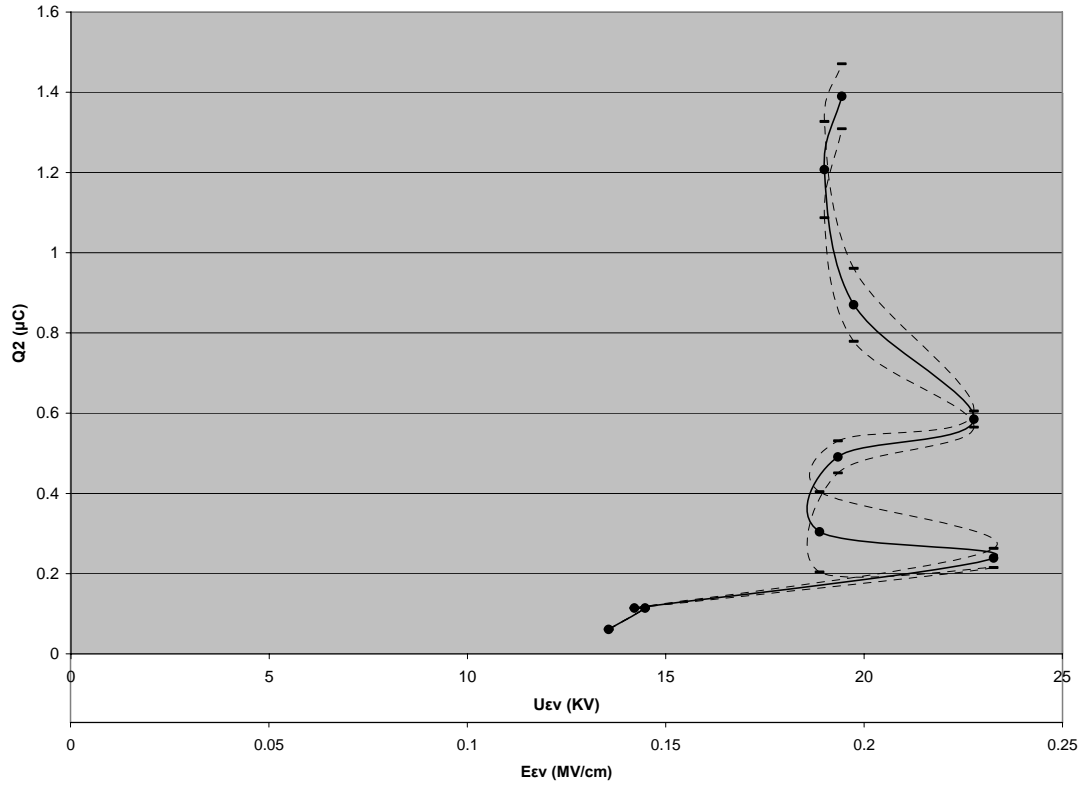
**Σχήμα 3.5-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.5-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

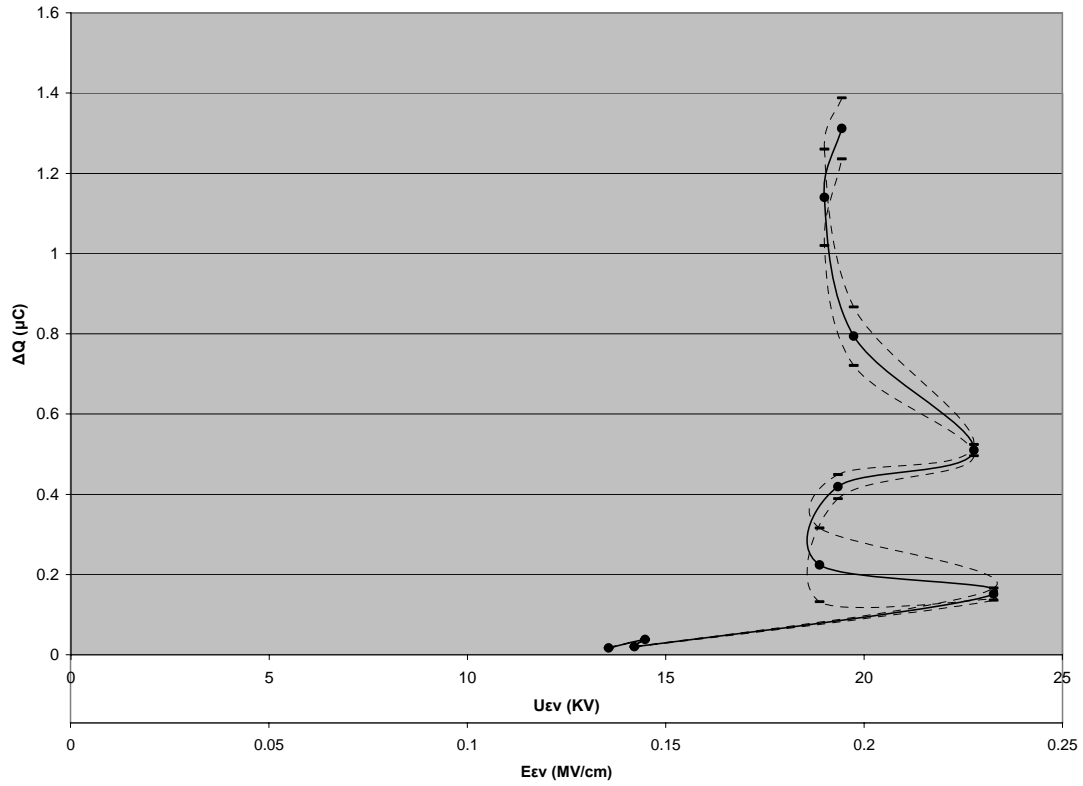


**Σχήμα 3.5-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

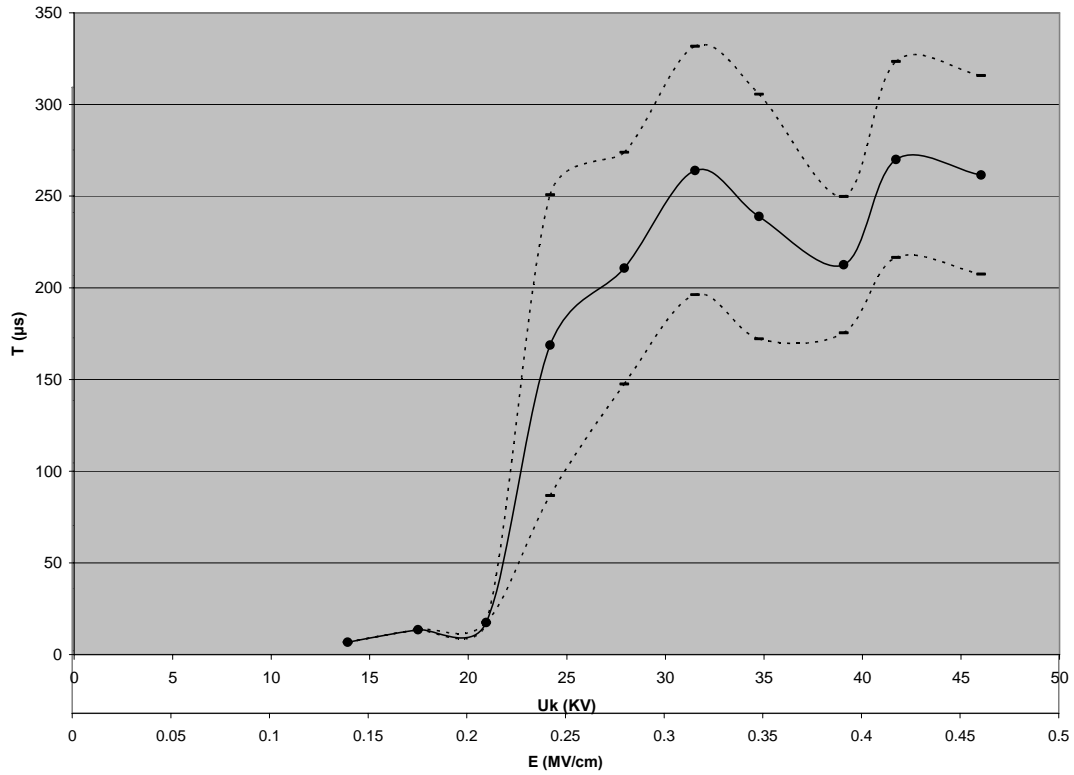


**Σχήμα 3.5-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .





**Σχήμα 3.5-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{\epsilon\nu}, E_{\epsilon\nu})$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^\circ\text{C}$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.5-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

### 3.6. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 6

ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=2\text{mm}$

U (KV)	$U_{\kappa}$ (KV)	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_{\text{ev}}$ (KV)	T ( $\mu\text{s}$ )	Q ( $\mu\text{C}$ )	$(Q/T)*10^{-3}$ ( $\mu\text{C}/\mu\text{s}$ )
15	10,35	-	-	0,0168	-	-	-	-	-
		-	-	0,001	-	-	-	-	-
20	14,1	73,44	280,8	0,02	0,04	11,44	207,32	0,023	0,112
		18,08	32,68	0,001	0,001	1,65	32,5	0,001	0,037
25	17,45	41,85	371,2	0,018	0,069	13,71	329,36	0,052	0,159
		5,07	42,02	0,002	0,002	0,86	43,37	0,003	0,014
30	21	30,37	394,5	0,014	0,104	14,33	363,49	0,089	0,246
		2,52	28,03	0,001	0,004	0,4	63,52	0,003	0,02
35	23,83	31,72	346,95	0,031	0,293	14,66	315,22	0,261	0,836
		8,43	35,1	0,069	0,012	2,5	28,76	0,008	0,1
40	27,4	28,75	400,95	0,066	0,702	15,39	372,19	0,635	1,728
		6,07	41,25	0,022	0,029	1,37	38,83	0,039	0,23
45	31,05	22,27	373,95	0,059	1,046	16,31	351,67	0,987	2,819
		1,65	34,31	0,008	0,076	0,81	35,43	0,073	0,19
50	34,5	18,49	363,15	0,07	1,45	16,6	344,65	1,38	4,123
		3,85	58,44	0,18	0,052	1,28	57,95	0,064	0,75
55	37,78	33,07	437,39	0,231	1,7	16,85	328,72	1,468	3,643
		12,87	30,01	0,11	0,081	1,38	31,4	0,082	0,22
60	41,64	17,55	446,85	0,116	2,433	16,72	429,3	2,327	5,416
		5,4	8,95	0,01	0,08	0,7	9,15	0,094	0,3
65	44,72	16,2	464,4	0,094	3,28	17,12	448,2	3,186	7,121
		3,3	13,08	0,01	0,081	0,88	15,15	0,089	0,41

$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta U_m$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
10.35	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.105273
			-	-	-	-	-	0.105273
14.1	1000	5.51	0.02	0.00002	5.51E-05	1.33E+10	0.022471	0.143415
			0	0	0	0	-	0.143415
17.45	1000	5.51	0.051	0.000051	0.000141	3.4E+10	0.008812	0.177489
			0	0	0	0	-	0.177489
21	1000	5.51	0.09	0.00009	0.000248	6E+10	0.004994	0.213597
			0.003	0.000003	8.27E-06	2E+09	0.149809	0.213597
23.83	1000	5.51	0.262	0.000262	0.000722	1.75E+11	0.001715	0.242381
			-0.057	-5.7E-05	-0.00016	-3.8E+10	-0.00788	0.242381
27.4	1000	5.51	0.636	0.000636	0.001752	4.24E+11	0.000707	0.278693
			0.007	0.000007	1.93E-05	4.67E+09	0.064204	0.278693
31.05	1000	5.51	0.987	0.000987	0.002719	6.58E+11	0.000455	0.315818
			0.068	0.000068	0.000187	4.54E+10	0.006609	0.315818
34.5	1000	5.51	1.38	0.00138	0.003802	9.21E+11	0.000326	0.350909
			0.034	0.000034	9.37E-05	2.27E+10	0.013218	0.350909
37.78	1000	5.51	1.469	0.001469	0.004047	9.8E+11	0.000306	0.384271
			-0.029	-2.9E-05	-8E-05	-1.9E+10	-0.0155	0.384271
41.64	1000	5.51	2.317	0.002317	0.006383	1.55E+12	0.000194	0.423532
			0.07	0.00007	0.000193	4.67E+10	0.00642	0.423532
44.72	1000	5.51	3.186	0.003186	0.008777	2.13E+12	0.000141	0.454859
			0.071	0.000071	0.000196	4.74E+10	0.00633	0.454859

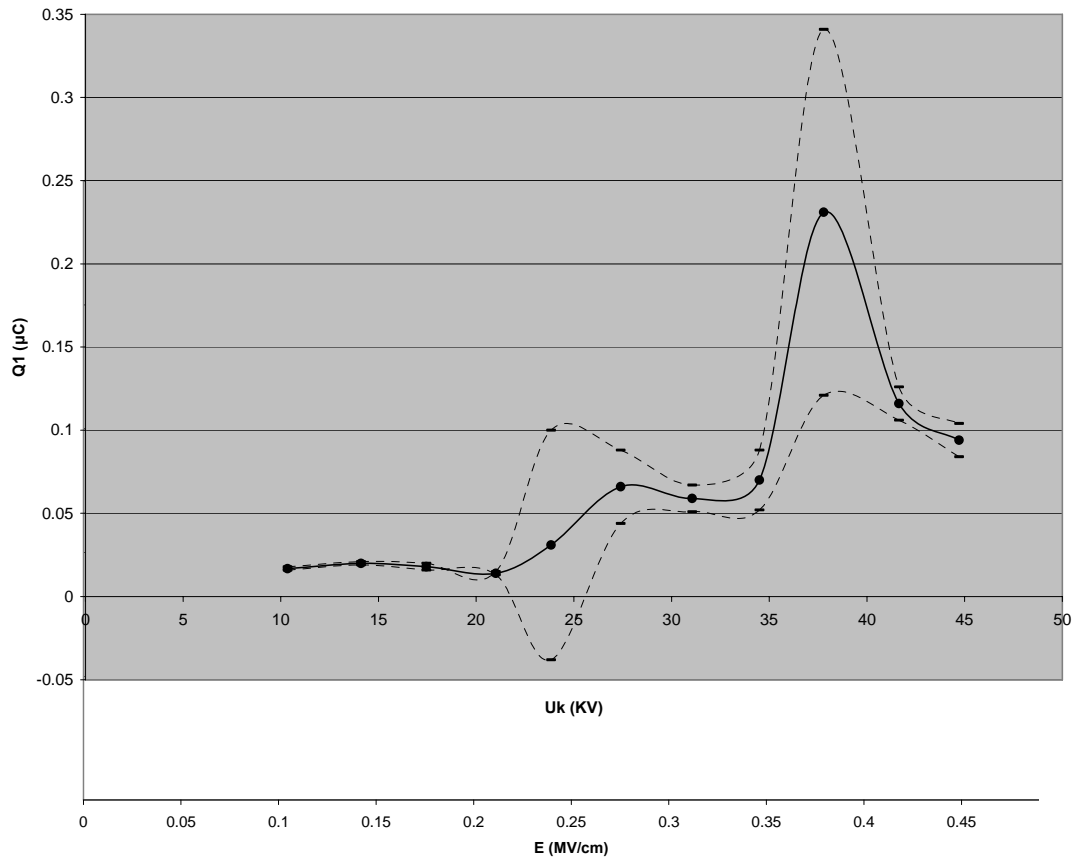
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta U_m$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ C$  – πάχος δοκιμίου d=2mm.

U <sub>κ</sub> (KV)	C <sub>m</sub> (nF)	K	Q <sub>2</sub> (μC)	W <sub>2</sub> (eV)	f <sub>2</sub> (Hz)	λ <sub>2</sub> (m)	E (MV/cm)
10.35	1000	5.51	-	-	-	-	0.105273
			-	-	-	-	0.105273
14.1	1000	5.51	0.04	0.00011	2668281	112.357	0.143415
			0.001	2.76E-06	66707.02	4494.279	0.143415
17.45	1000	5.51	0.069	0.00019	4602785	65.13449	0.177489
			0.002	5.51E-06	133414	2247.14	0.177489
21	1000	5.51	0.104	0.000287	6937530	43.21423	0.213597
			0.004	1.1E-05	266828.1	1123.57	0.213597
23.83	1000	5.51	0.293	0.000807	19545157	15.33884	0.242381
			0.012	3.31E-05	800484.3	374.5233	0.242381
27.4	1000	5.51	0.702	0.001934	46828329	6.402108	0.278693
			0.029	7.99E-05	1934504	154.9752	0.278693
31.05	1000	5.51	1.046	0.002882	69775545	4.296634	0.315818
			0.076	0.000209	5069734	59.13526	0.315818
34.5	1000	5.51	1.45	0.003995	96725182	3.099503	0.350909
			0.052	0.000143	3468765	86.42845	0.350909
37.78	1000	5.51	1.7	0.004684	1.13E+08	2.643694	0.384271
			0.081	0.000223	5403269	55.48493	0.384271
41.64	1000	5.51	2.433	0.006703	1.62E+08	1.847217	0.423532
			0.08	0.00022	5336562	56.17849	0.423532
44.72	1000	5.51	3.28	0.009036	2.19E+08	1.370207	0.454859
			0.081	0.000223	5403269	55.48493	0.454859

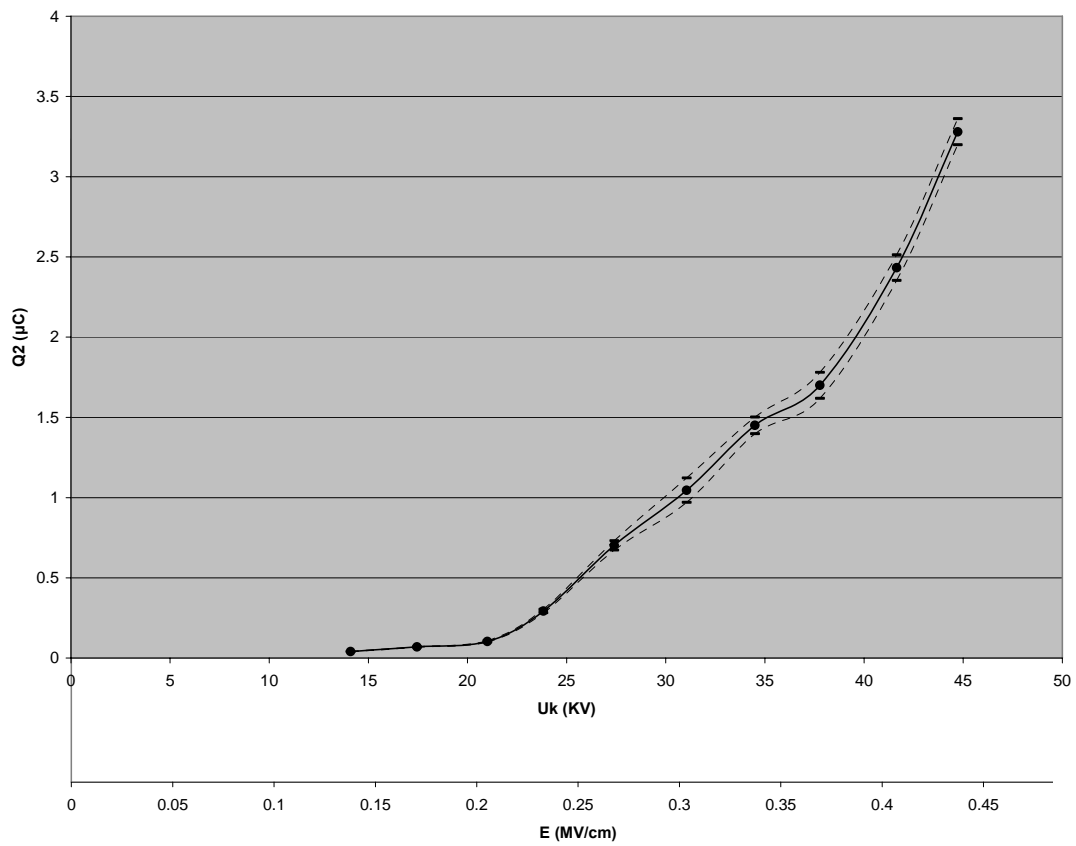
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6-2:** Υπολογισμός Q<sub>2</sub>, W<sub>2</sub>, f<sub>2</sub>, λ<sub>2</sub> για Θετική πολικότητα –  
Θ=80°C – πάχος δοκιμίου d=2mm.

$U_k$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{EN}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
10.35	0.105273	-	-	-	-
		-	-	-	-
14.1	0.143415	11.44	0.116359	0.02	0.04
		1.65	0.016783	0	0.001
17.45	0.177489	13.71	0.139448	0.051	0.069
		0.86	0.008747	0	0.002
21	0.213597	14.33	0.145754	0.09	0.104
		0.4	0.004069	0.003	0.004
23.83	0.242381	14.66	0.149111	0.262	0.293
		2.5	0.025428	-0.057	0.012
27.4	0.278693	15.39	0.156536	0.636	0.702
		1.37	0.013935	0.007	0.029
31.05	0.315818	16.31	0.165893	0.987	1.046
		0.81	0.008239	0.068	0.076
34.5	0.350909	16.6	0.168843	1.38	1.45
		1.28	0.013019	0.034	0.052
37.78	0.384271	16.85	0.171386	1.469	1.7
		1.38	0.014036	-0.029	0.081
41.64	0.423532	16.72	0.170064	2.317	2.433
		0.7	0.00712	0.07	0.08
44.72	0.454859	17.12	0.174132	3.186	3.28
		0.88	0.008951	0.071	0.081

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.6-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}C$  – πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .

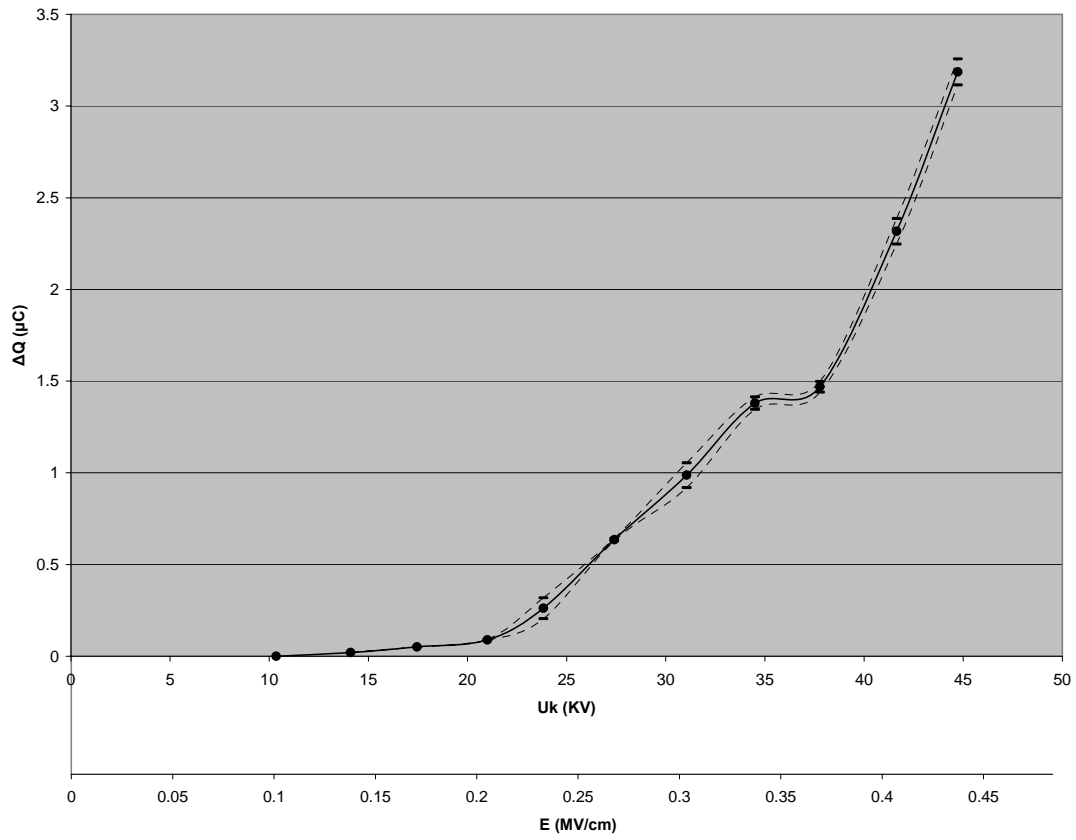


**Σχήμα 3.6-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

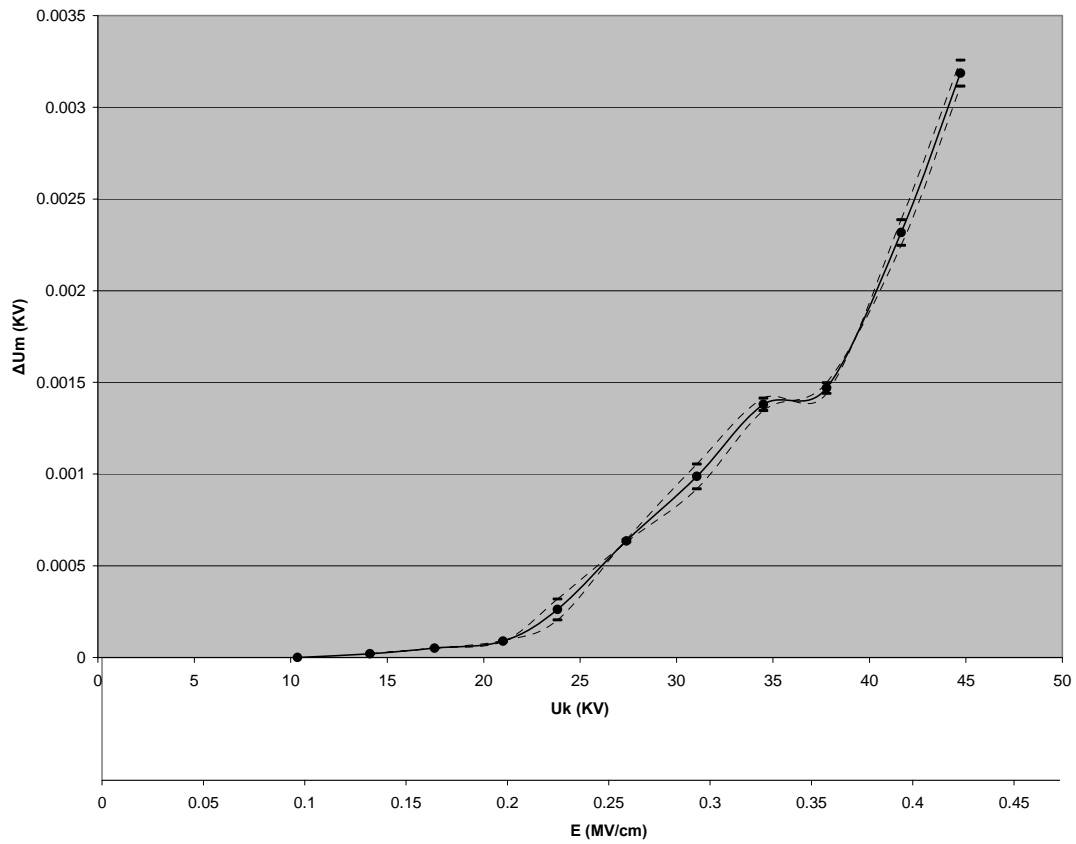


**Σχήμα 3.6-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta = 80^\circ\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d = 2\text{mm}$ .

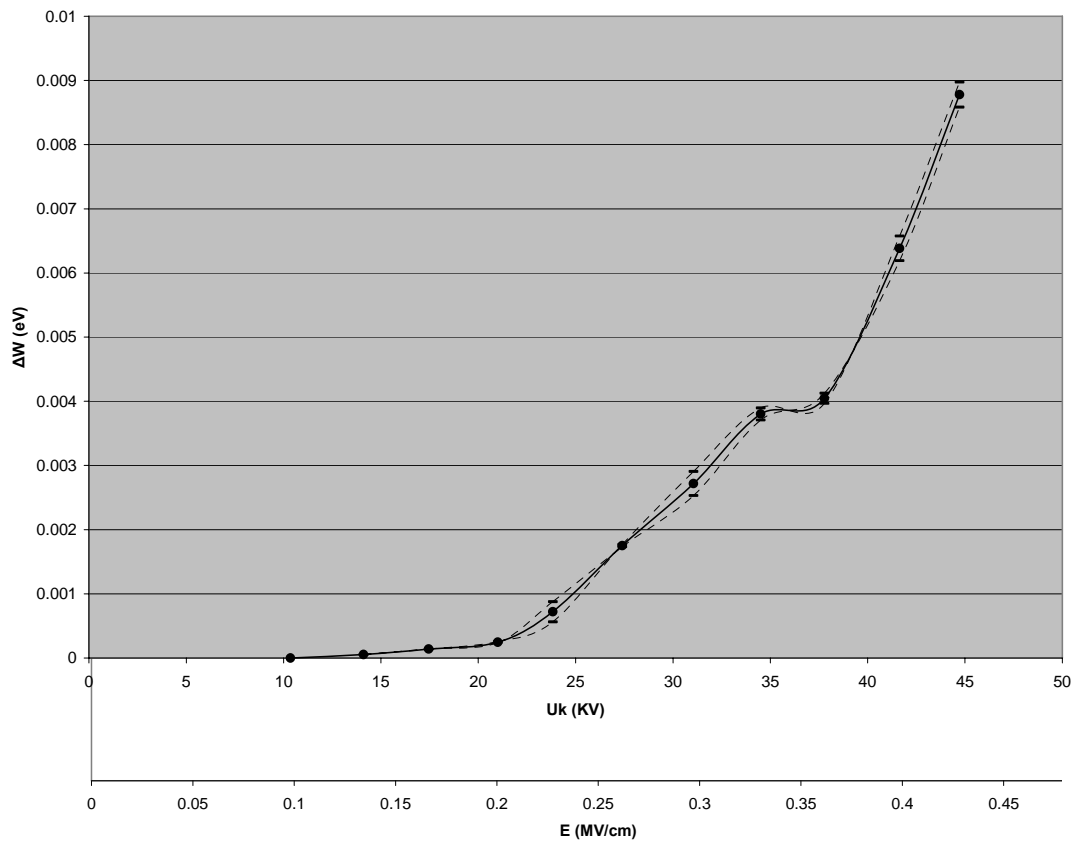




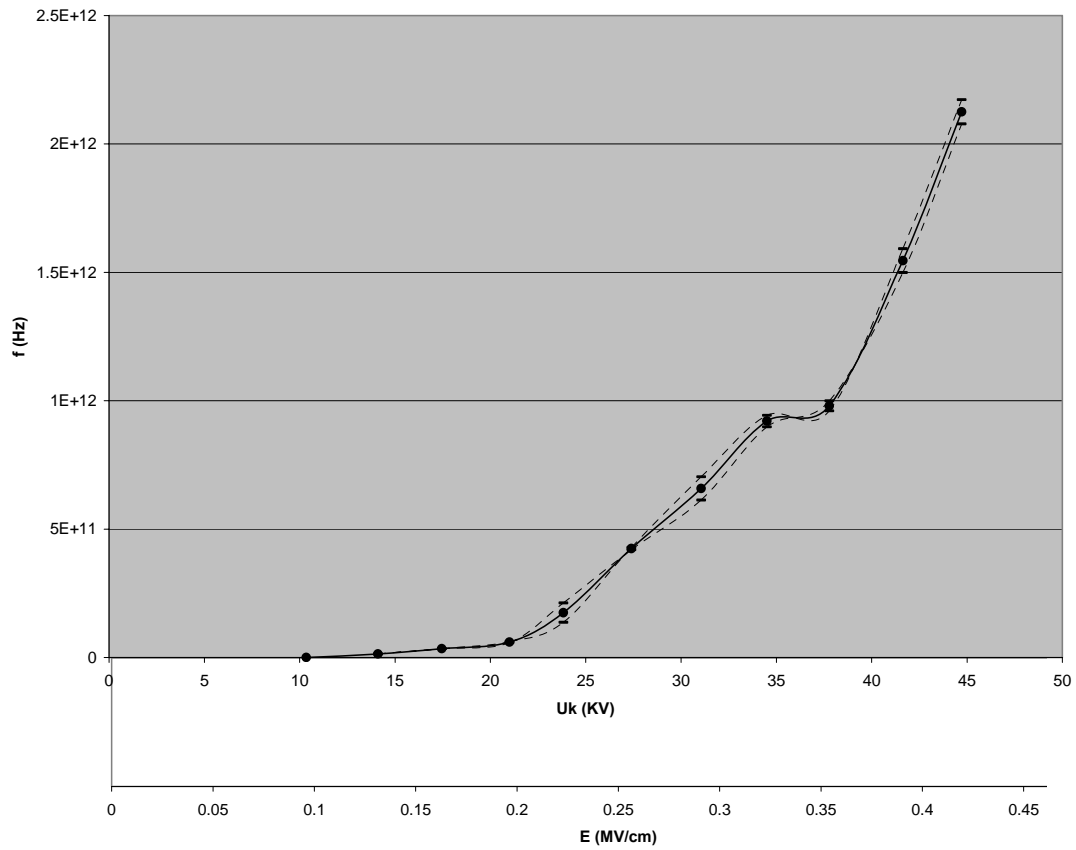
**Σχήμα 3.6-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



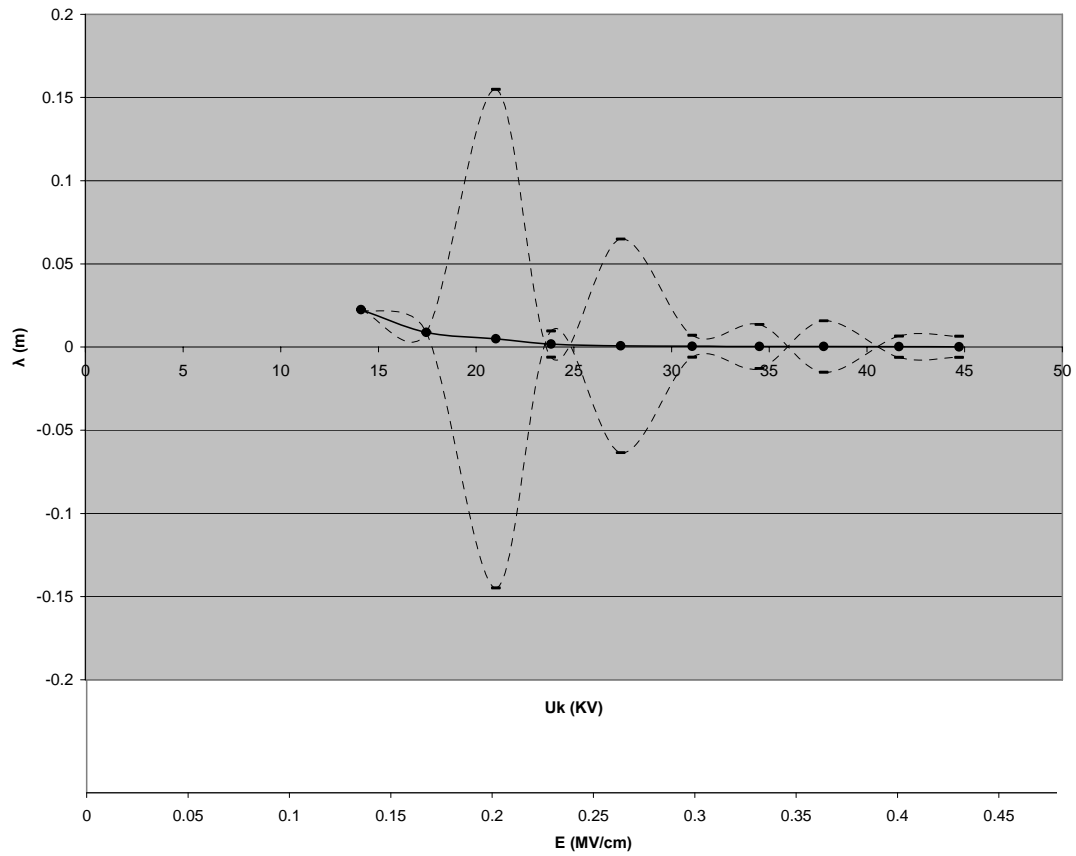
**Σχήμα 3.6-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



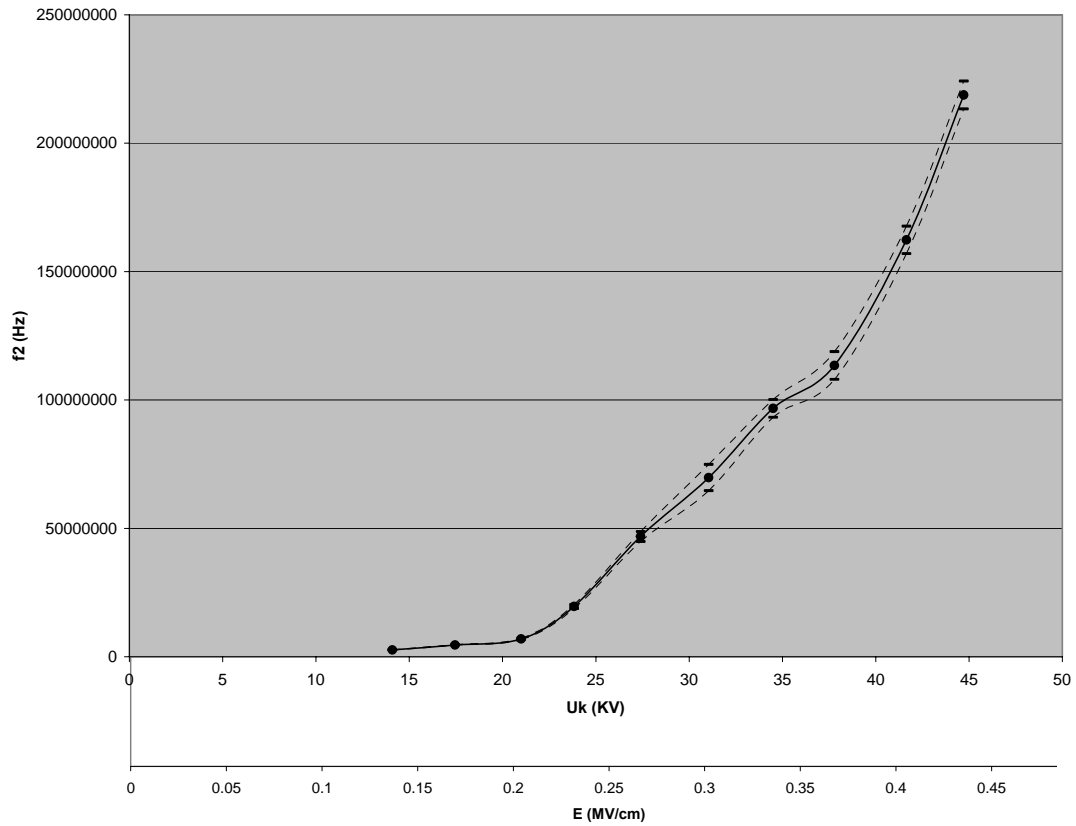
**Σχήμα 3.6-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



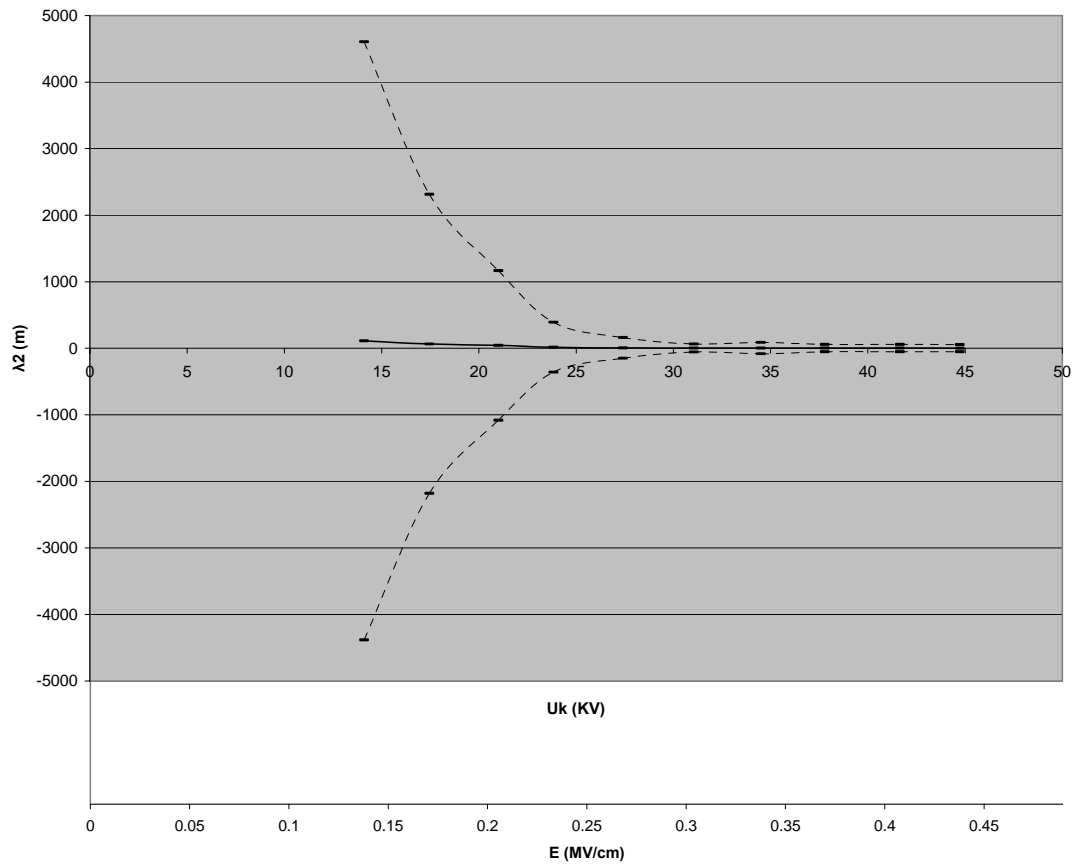
**Σχήμα 3.6-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



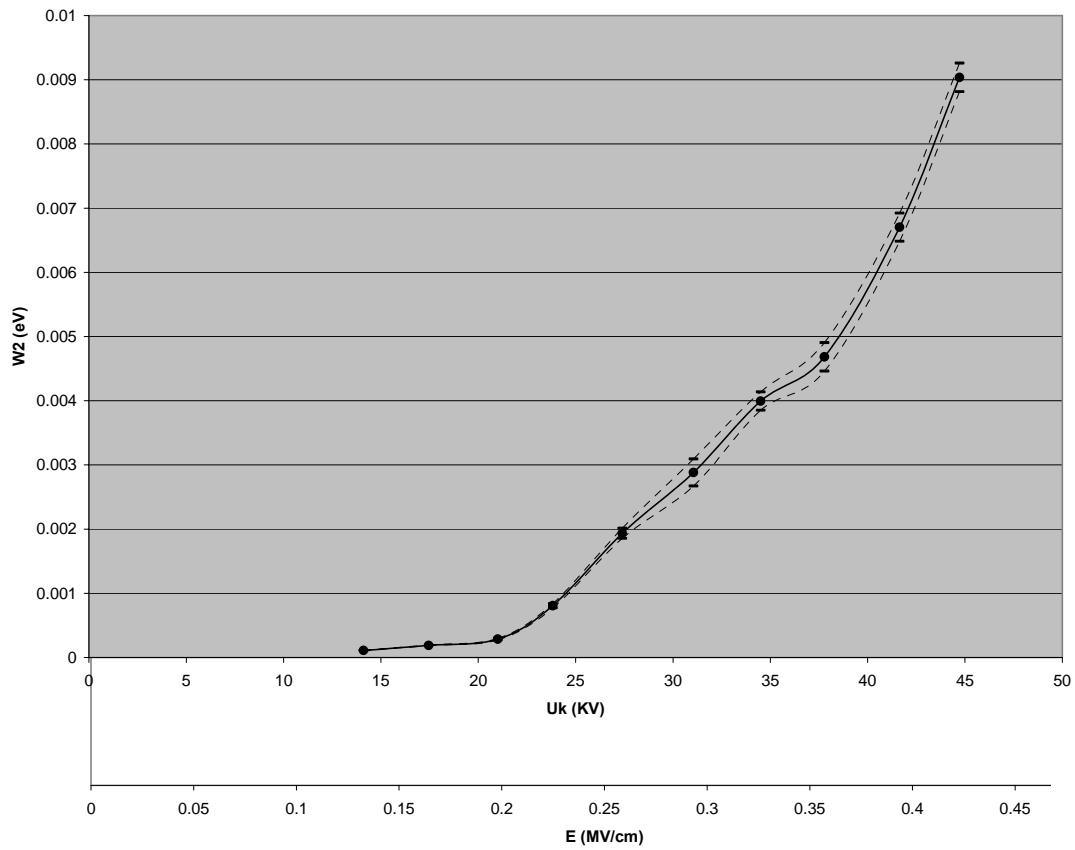
**Σχήμα 3.6-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.6-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

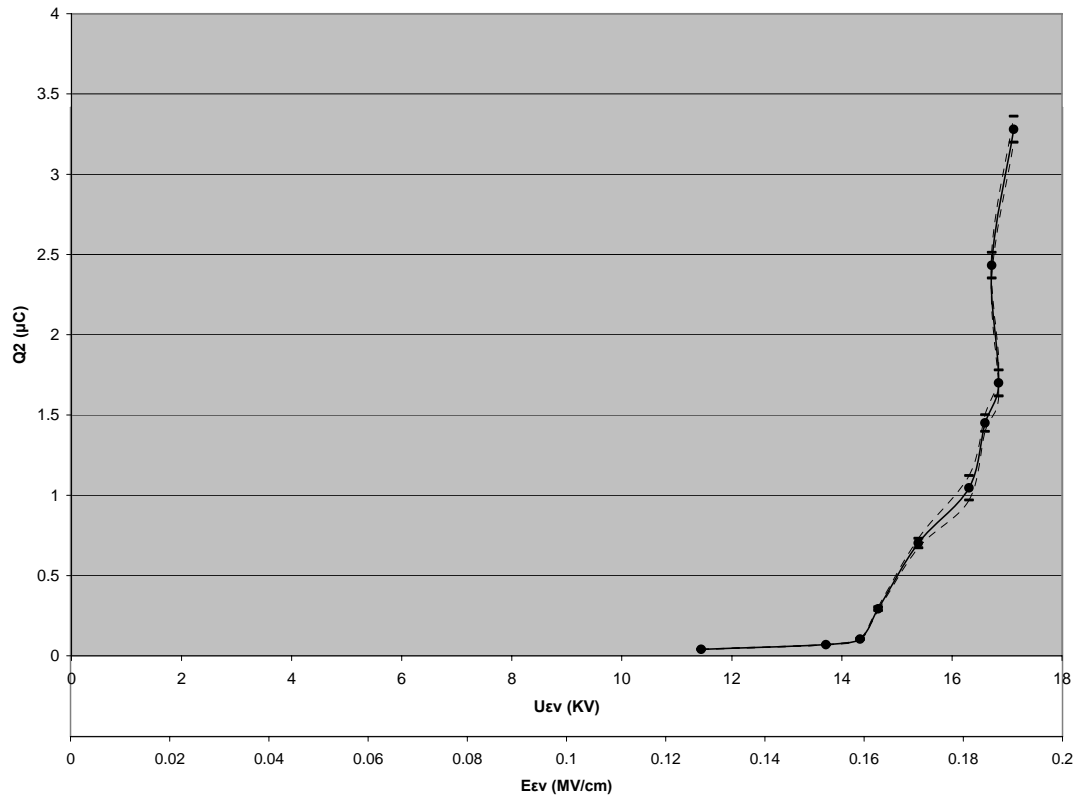


**Σχήμα 3.6-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

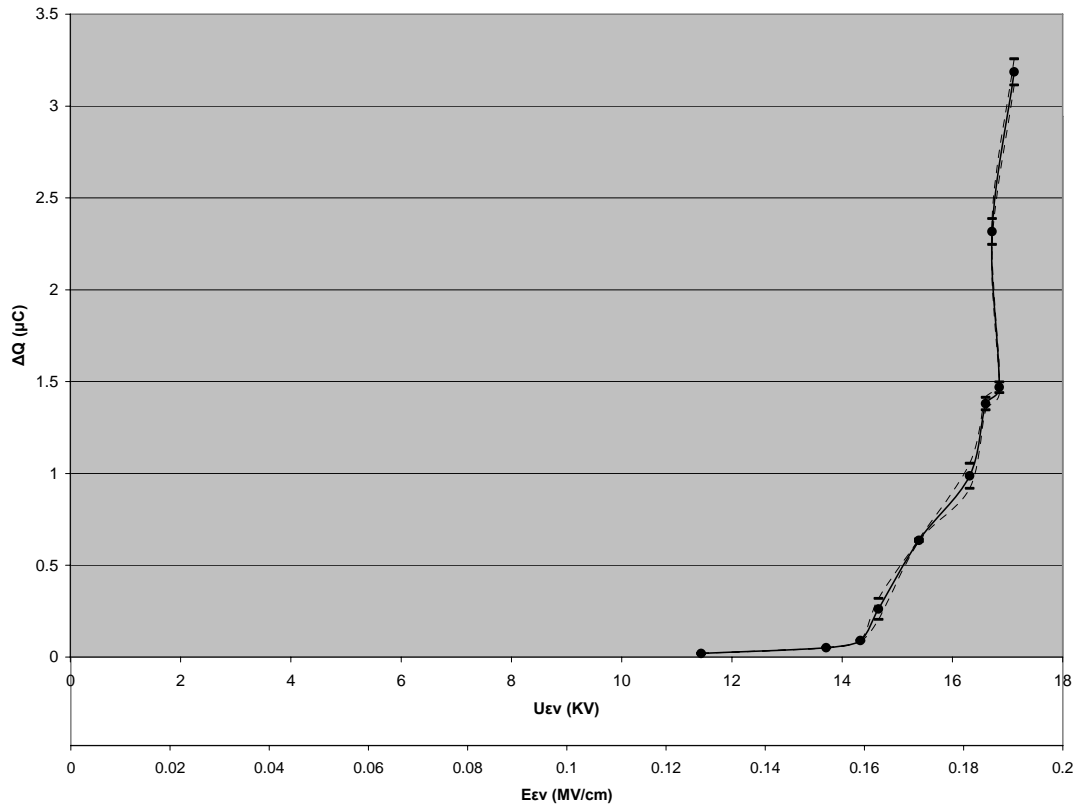


**Σχήμα 3.6-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ\text{C}$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

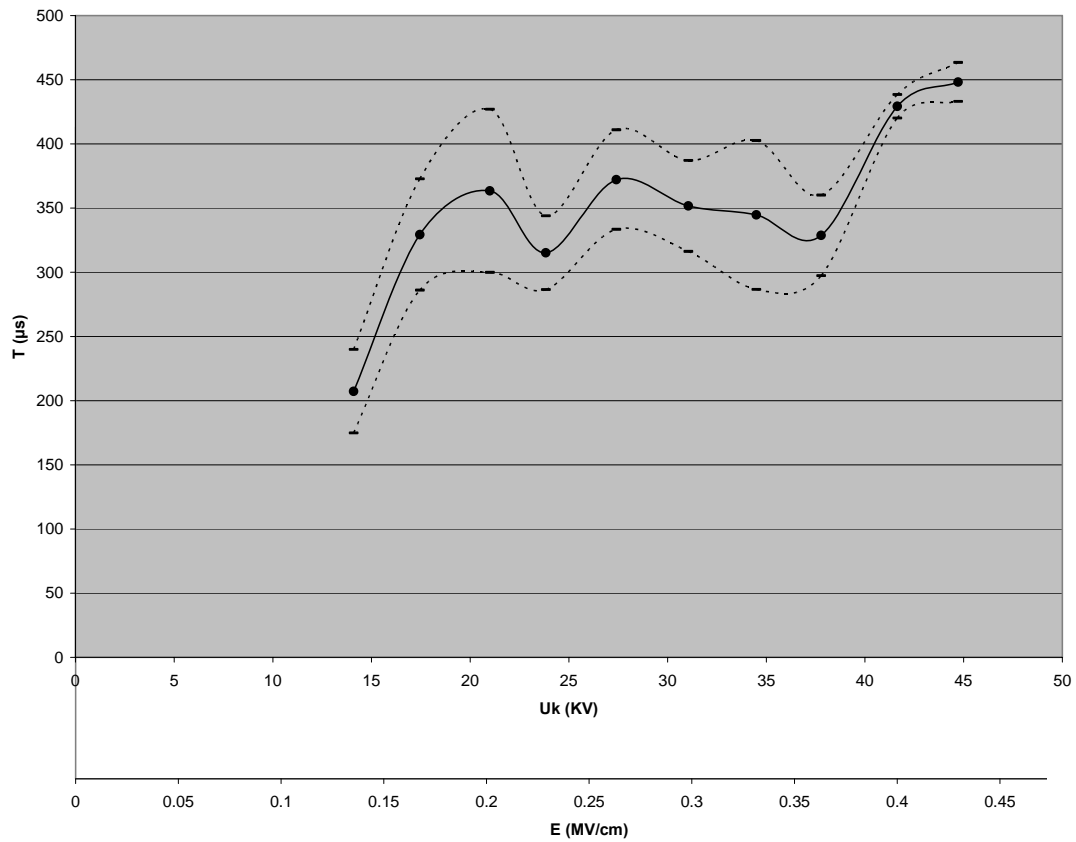




**Σχήμα 3.6-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.6-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{cv}, E_{cv})$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.6-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Θετική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

### 3.7. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 7

ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=2\text{mm}$

U (KV)	U <sub>κ</sub> (KV)	T <sub>1</sub> ( $\mu\text{s}$ )	T <sub>2</sub> ( $\mu\text{s}$ )	Q <sub>1</sub> ( $\mu\text{C}$ )	Q <sub>2</sub> ( $\mu\text{C}$ )	U <sub>EV</sub> (KV)	T ( $\mu\text{s}$ )	Q ( $\mu\text{C}$ )	(Q/T)*10 <sup>-3</sup> ( $\mu\text{C}/\mu\text{s}$ )
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-	-	-	-
20	14,18	-	-	0,055	-	-	-	-	-
		-	-	0,014	-	-	-	-	-
25	17,62	-	-	0,081	-	-	-	-	-
		-	-	0,003	-	-	-	-	-
30	21	-	-	0,102	-	-	-	-	-
		-	-	0,005	-	-	-	-	-
35	26,25	-	-	0,114	-	-	-	-	-
		-	-	0,004	-	-	-	-	-
40	28,2	108	235,57	0,099	0,256	23,01	127,57	0,156	3,923
		77,9	69,18	0,008	0,049	2,29	85,17	0,044	5,31
45	31,9	56,7	210,6	0,102	0,41	23,19	153,9	0,307	2,716
		10,96	85,63	0,006	0,055	0,94	85,74	0,05	1,37
50	35,35	48,59	247,05	0,097	0,642	24,35	198,43	0,545	2,946
		8,69	56,08	0,02	0,055	0,98	58,01	0,059	0,7
55	38,5	49,95	288,85	0,126	0,944	25,12	238,95	0,818	3,555
		5,4	54,23	0,015	0,13	0,65	49,1	0,12	0,89
60	40,8	33,74	260,5	0,098	1,366	24,96	226,8	1,237	6,375
		3,69	75,6	0,019	0,15	0,88	72,04	0,16	2,9
65	45,5	54	209,25	0,148	1,552	31,72	155,25	1,404	9,043
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta U_m$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
14.18	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.144229
			-	-	-	-	-	0.144229
17.62	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.179218
			-	-	-	-	-	0.179218
21	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.213597
			-	-	-	-	-	0.213597
26.25	1000	5.51	-	0.000157	0.000433	1.05E+11	0.002863	0.266996
			-	0.000041	0.000113	2.73E+10	0.010962	0.266996
28.2	1000	5.51	0.157	0.000308	0.000849	2.05E+11	0.001459	0.28683
			0.041	0.000049	0.000135	3.27E+10	0.009172	0.28683
31.9	1000	5.51	0.308	0.000545	0.001501	3.64E+11	0.000825	0.324464
			0.049	0.000035	9.64E-05	2.33E+10	0.012841	0.324464
35.35	1000	5.51	0.545	0.000818	0.002254	5.46E+11	0.000549	0.359555
			0.035	0.000115	0.000317	7.67E+10	0.003908	0.359555
38.5	1000	5.51	0.818	0.001238	0.003411	8.26E+11	0.000363	0.391594
			0.115	0.000131	0.000361	8.74E+10	0.003431	0.391594
40.8	1000	5.51	1.238	0.001404	0.003868	9.37E+11	0.00032	0.414988
			0.131	0	0	0	-	0.414988
45.5	1000	5.51	1.404	-	-	-	-	0.462793
			0	-	-	-	-	0.462793

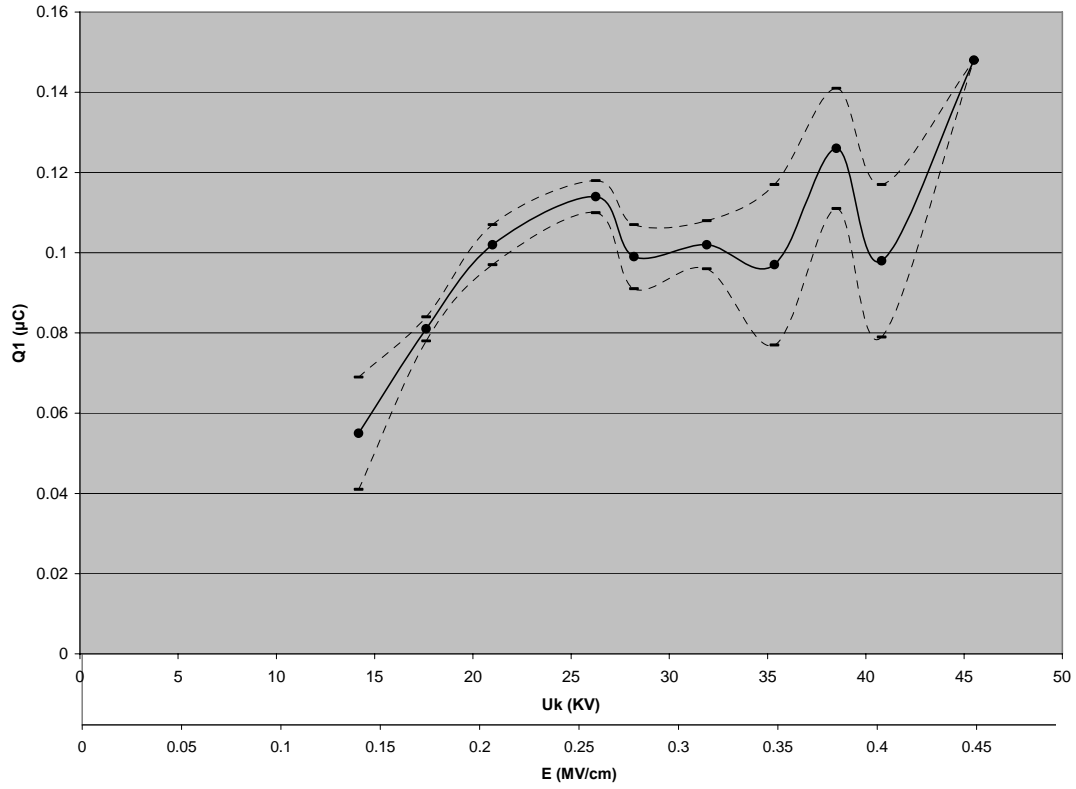
**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta U_m$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}C$  – πάχος δοκιμίου d=2mm.

$U_K$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$Q_2$ ( $\mu C$ )	$W_2$ (eV)	$f_2$ (Hz)	$\lambda_2$ (m)	E (MV/cm)
14.18	1000	5.51	-	-	-	-	0.144229
			-	-	-	-	0.144229
17.62	1000	5.51	-	-	-	-	0.179218
			-	-	-	-	0.179218
21	1000	5.51	-	-	-	-	0.213597
			-	-	-	-	0.213597
26.25	1000	5.51	-	-	-	-	0.266996
			-	-	-	-	0.266996
28.2	1000	5.51	0.256	0.000705	1.71E+10	0.017556	0.28683
			0.049	0.000135	3.27E+09	0.09172	0.28683
31.9	1000	5.51	0.41	0.00113	2.73E+10	0.010962	0.324464
			0.055	0.000152	3.67E+09	0.081714	0.324464
35.35	1000	5.51	0.642	0.001769	4.28E+10	0.007	0.359555
			0.055	0.000152	3.67E+09	0.081714	0.359555
38.5	1000	5.51	0.944	0.002601	6.3E+10	0.004761	0.391594
			0.13	0.000358	8.67E+09	0.034571	0.391594
40.8	1000	5.51	1.336	0.003681	8.91E+10	0.003364	0.414988
			0.15	0.000413	1E+10	0.029962	0.414988
45.5	1000	5.51	1.552	0.004276	1.04E+11	0.002896	0.462793
			0	0	0	-	0.462793

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7-2:** Υπολογισμός  $Q_2$ ,  $W_2$ ,  $f_2$ ,  $\lambda_2$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^\circ C$   
πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .

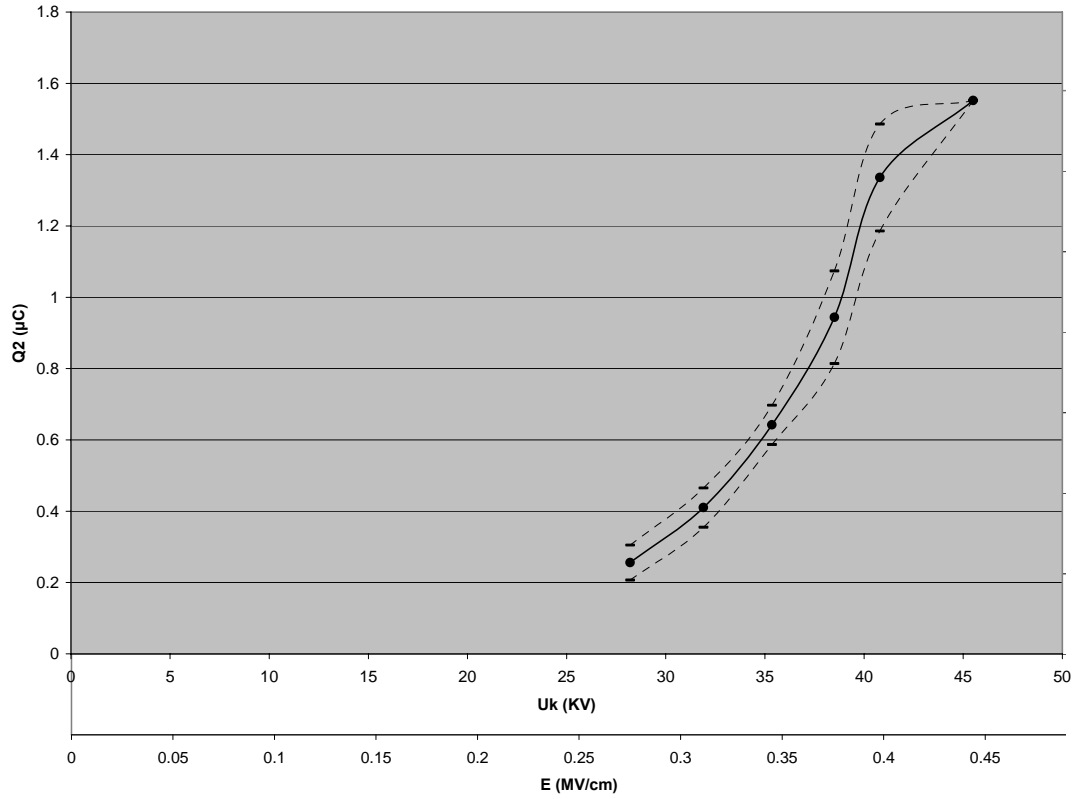
$U_k$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{ev}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
14.18	0.144229	-	-	-	-
		-	-	-	-
17.62	0.179218	-	-	-	-
		-	-	-	-
21	0.213597	-	-	-	-
		-	-	-	-
26.25	0.266996	-	-	-	-
		-	-	-	-
28.2	0.28683	23.01	0.234041	0.157	0.256
		2.29	0.023292	0.041	0.049
31.9	0.324464	23.19	0.235872	0.308	0.41
		0.94	0.009561	0.049	0.055
35.35	0.359555	24.35	0.247671	0.545	0.642
		0.98	0.009968	0.035	0.055
38.5	0.391594	25.12	0.255502	0.818	0.944
		0.65	0.006611	0.115	0.13
40.8	0.414988	24.96	0.253875	1.238	1.336
		0.88	0.008951	0.131	0.15
45.5	0.462793	31.72	0.322633	1.404	1.552
		0	0	0	0

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.7-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}C$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .

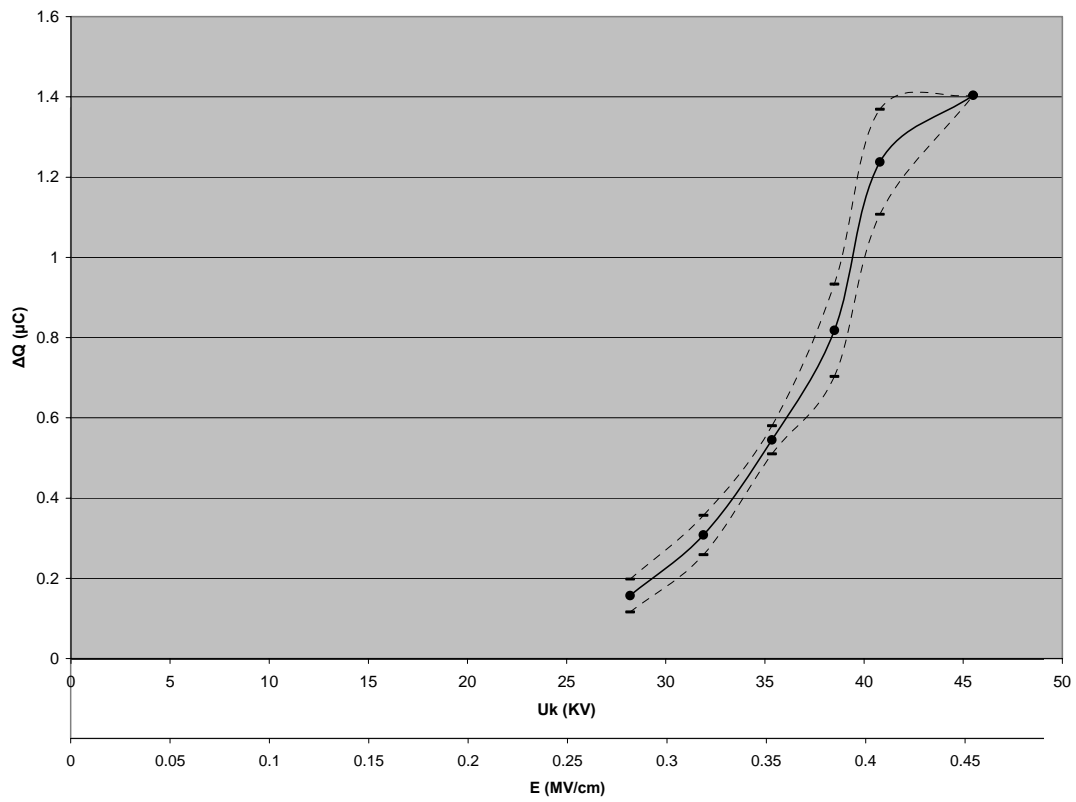


**Σχήμα 3.7-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

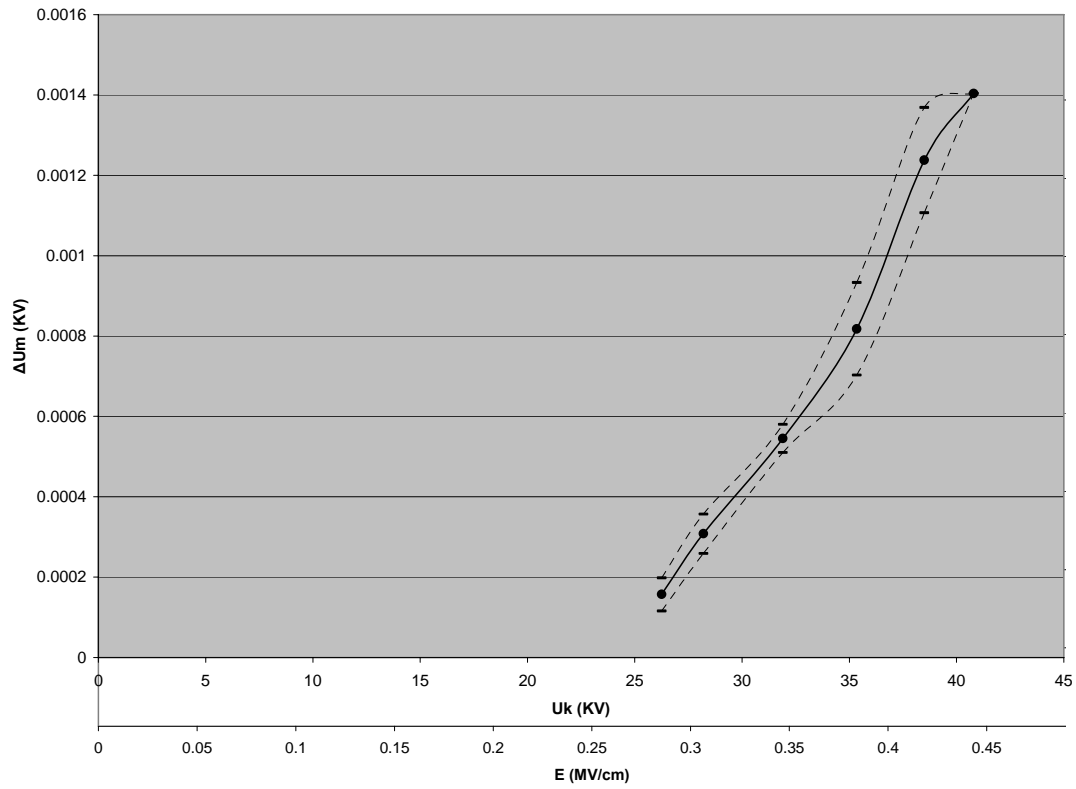




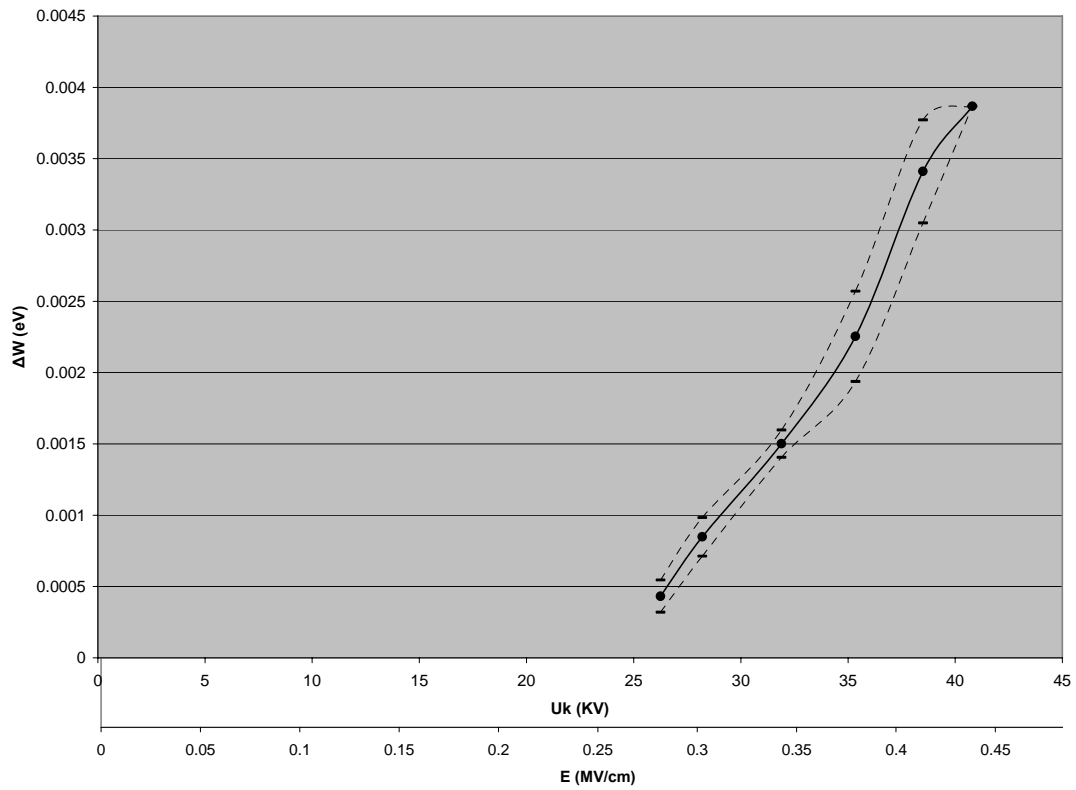
**Σχήμα 3.7-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



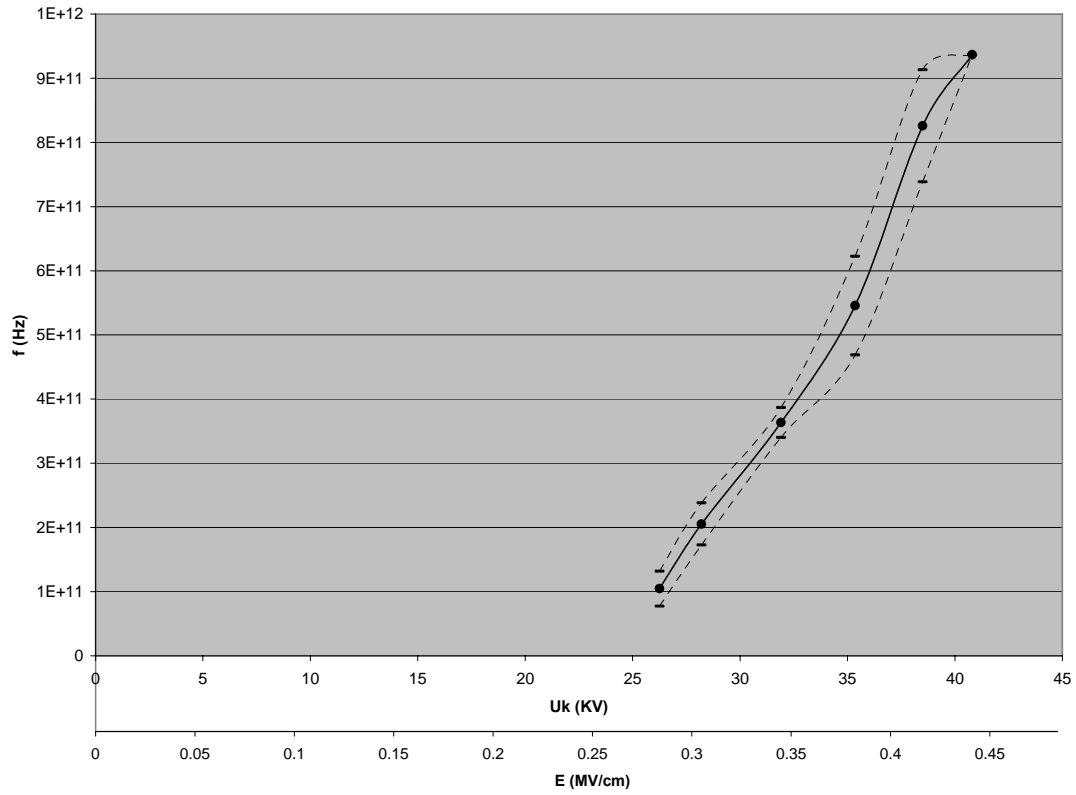
**Σχήμα 3.7-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



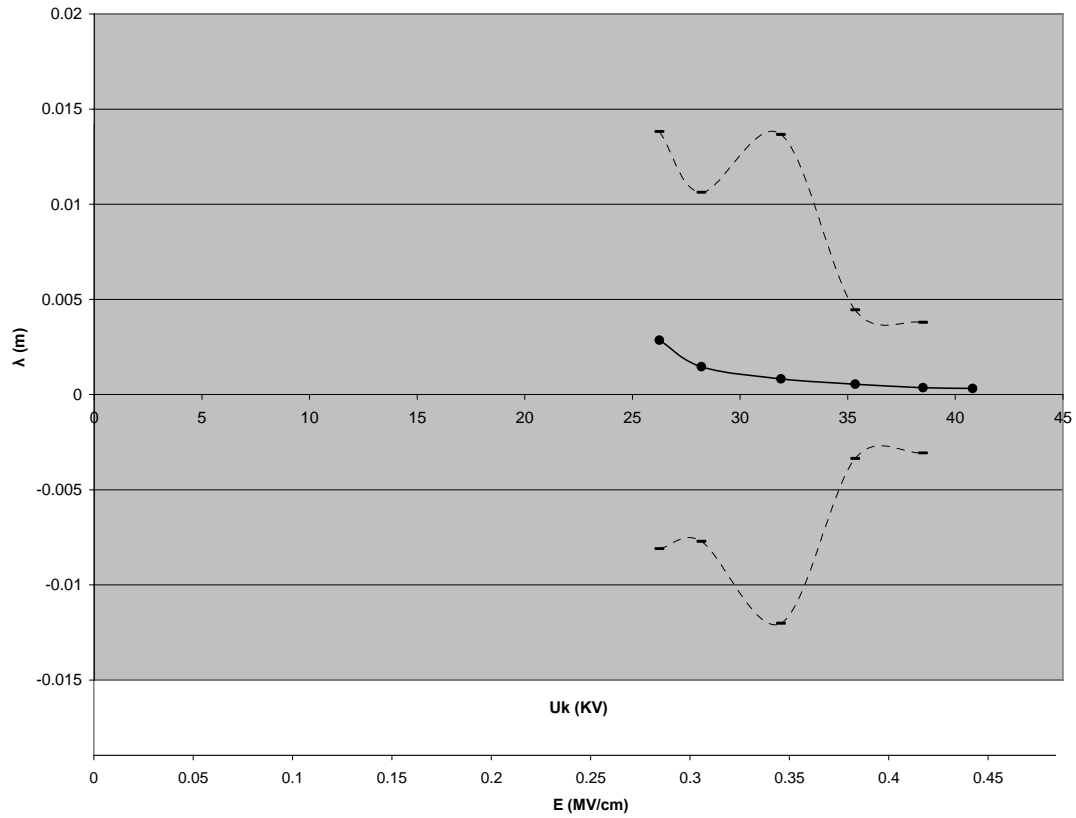
**Σχήμα 3.7-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



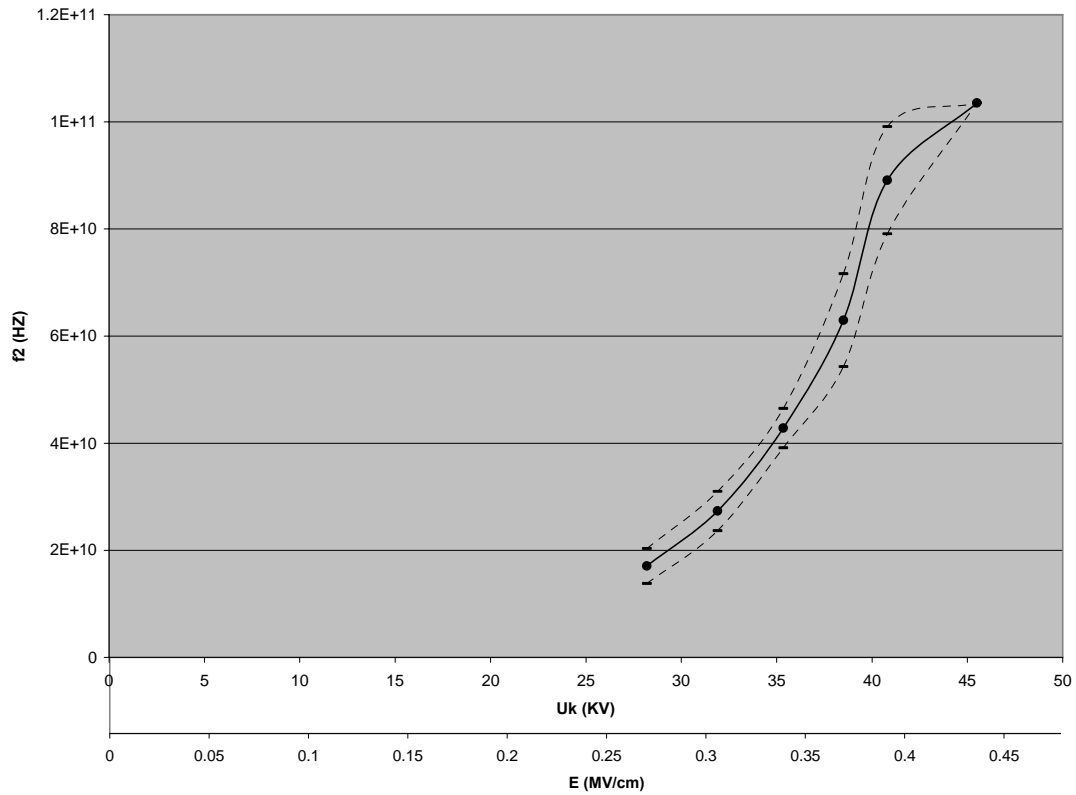
**Σχήμα 3.7-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



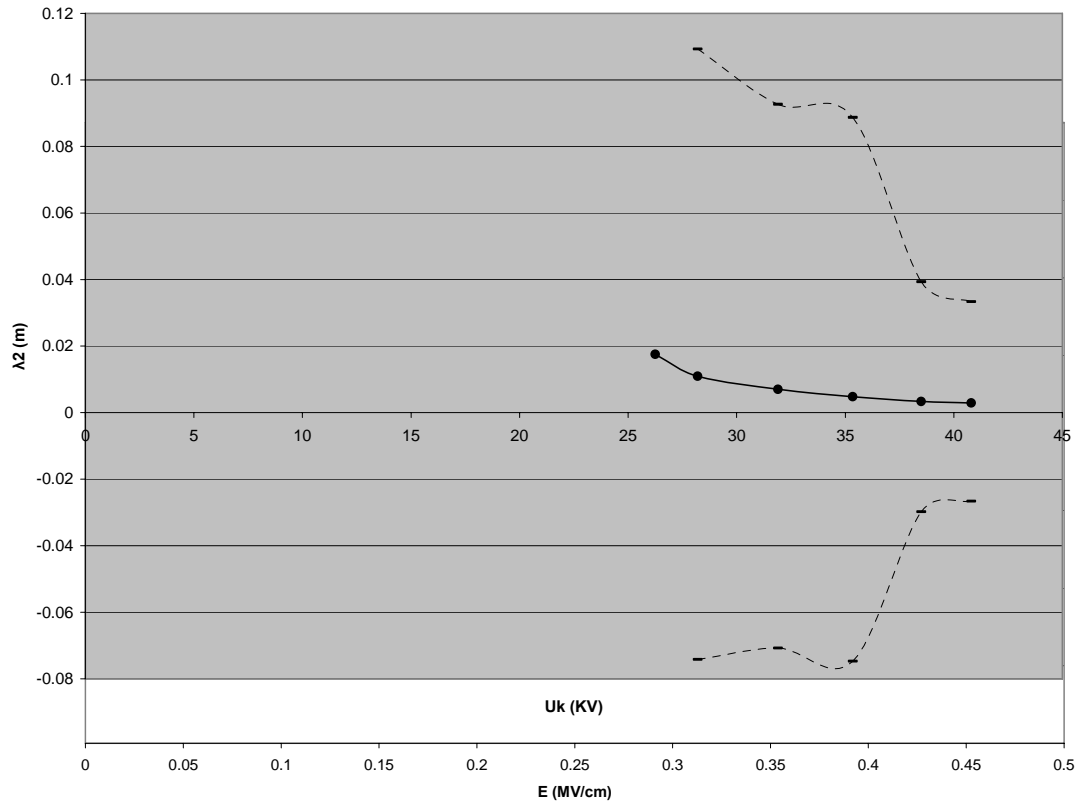
**Σχήμα 3.7-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.7-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

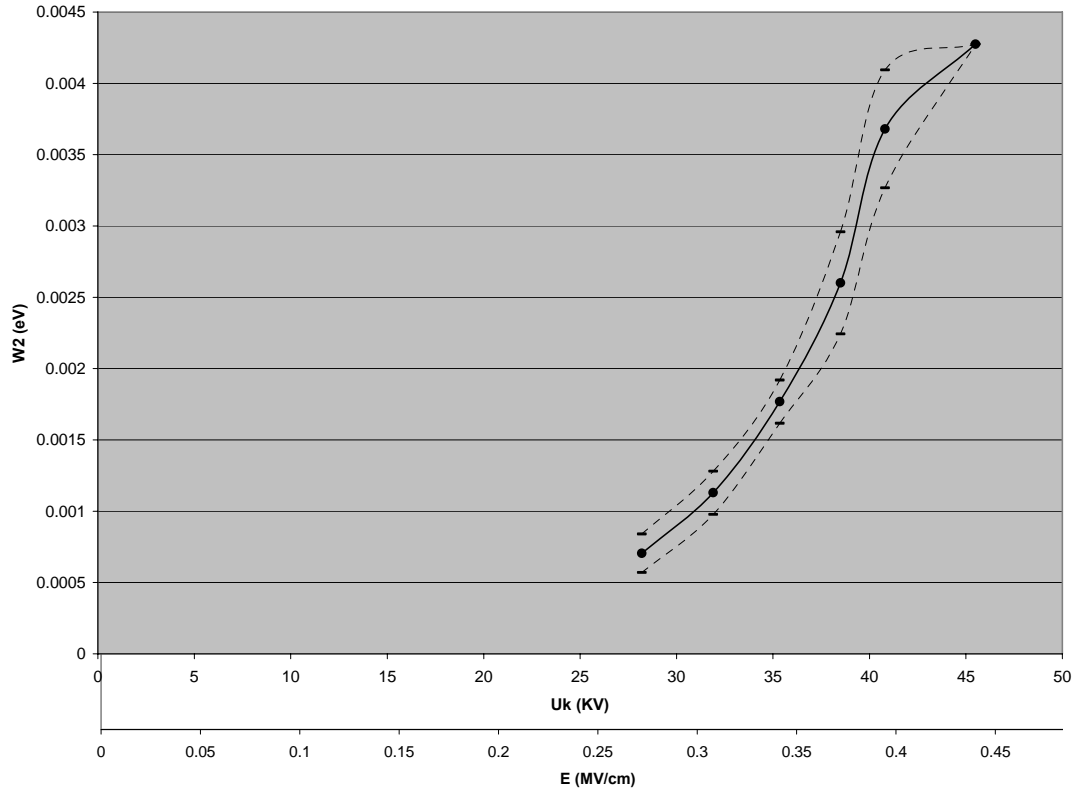


**Σχήμα 3.7-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

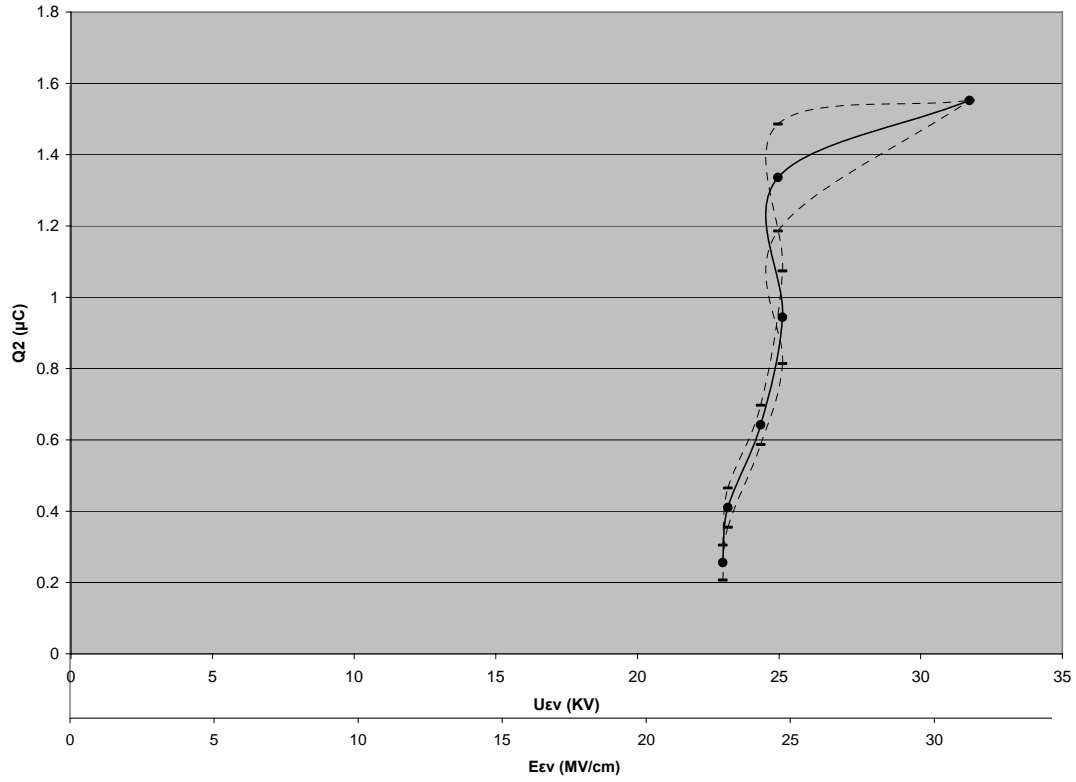


**Σχήμα 3.7-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

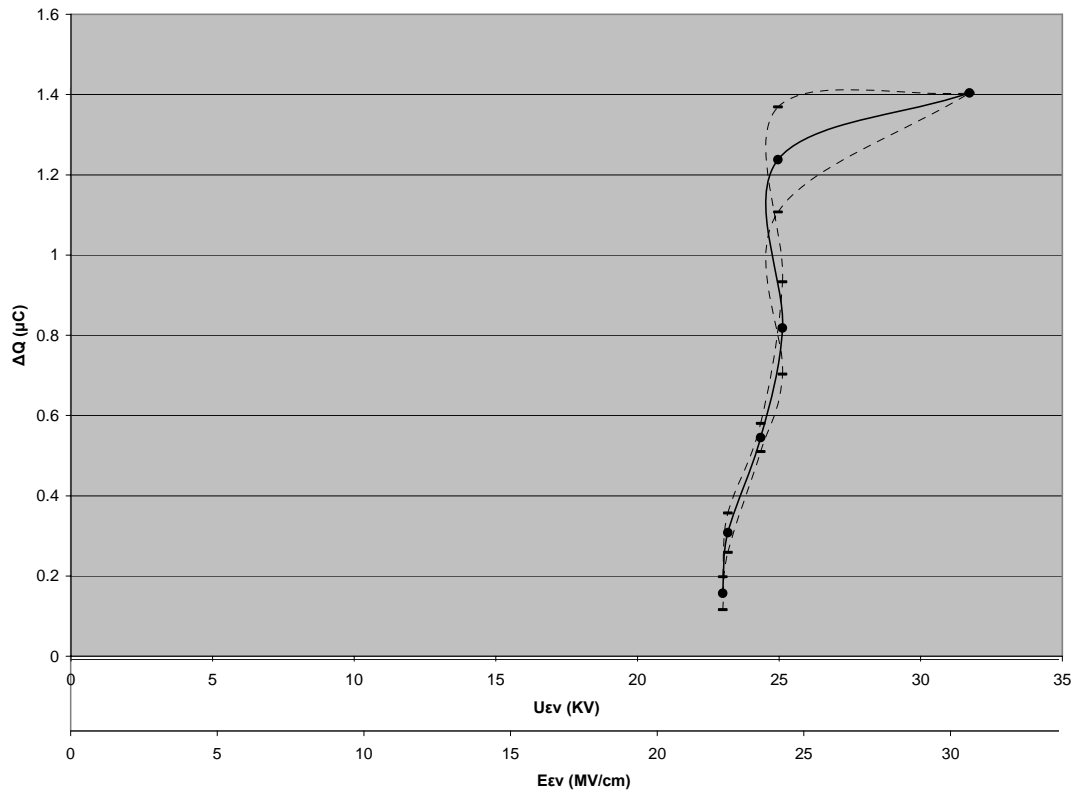




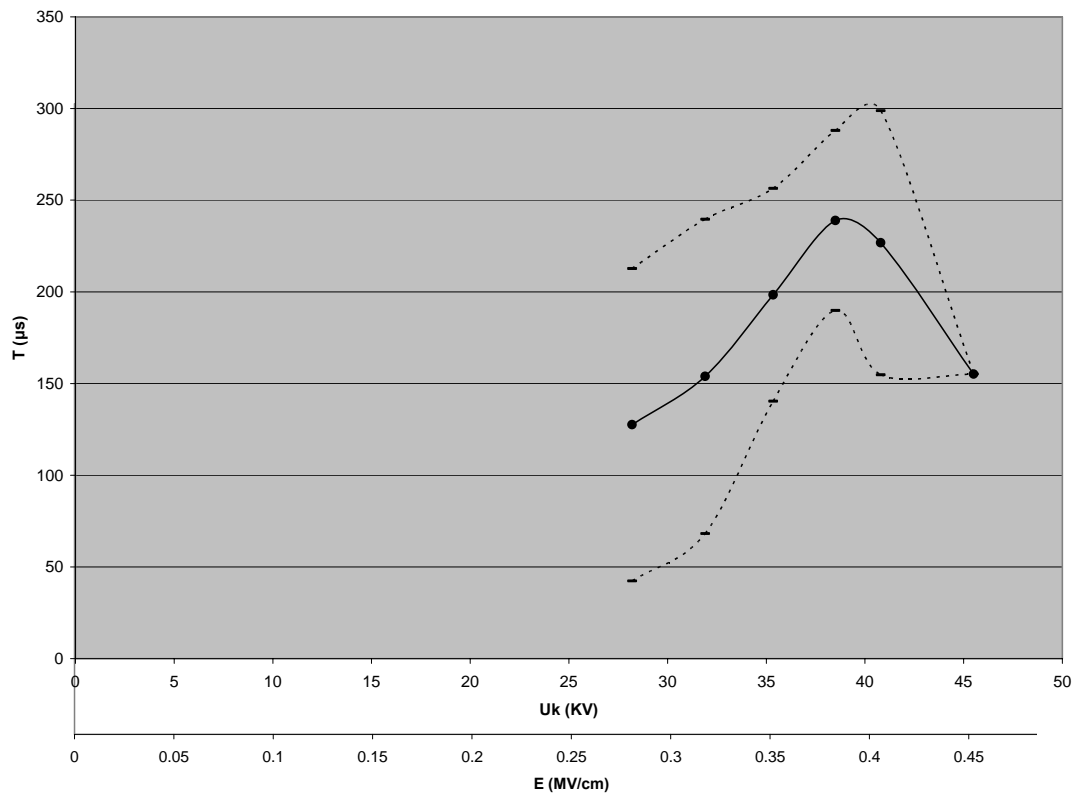
**Σχήμα 3.7-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.7-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^\circ\text{C}$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.7-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{ev}, E_{ev})$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}C$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .



**Σχήμα 3.7-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

### 3.8. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 8

ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$  - ΠΑΧΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ  $d=2\text{mm}$

U (KV)	$U_{\kappa}$ (KV)	$T_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$T_2$ ( $\mu\text{s}$ )	$Q_1$ ( $\mu\text{C}$ )	$Q_2$ ( $\mu\text{C}$ )	$U_{\text{ev}}$ (KV)	T ( $\mu\text{s}$ )	Q ( $\mu\text{C}$ )	$(Q/T)*10^{-3}$ ( $\mu\text{C}/\mu\text{s}$ )
15	10,47	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	-	0,001	-	-	-	-	-
20	13,6	-	-	0,073	-	-	-	-	-
		-	-	0,001	-	-	-	-	-
25	17,22	154,4	268,3	0,092	0,107	16,16	113,91	0,017	0,259
		38,95	70,69	0,007	0,009	1,08	109,5	0,01	0,45
30	21,03	125,55	259,2	0,098	0,163	16,88	133,65	0,064	1,219
		32,11	57,05	0,003	0,019	1,26	82,05	0,02	1,1
35	24,11	58,72	363,15	0,088	0,317	18,75	304,42	0,228	0,761
		2,7	32,8	0,004	0,01	0,32	32,67	0,013	0,1
40	27,88	53,32	296,59	0,102	0,525	17,41	243,13	0,422	1,823
		7,81	63,05	0,014	0,039	3,14	61,27	0,037	0,38
45	29,74	49,25	315,9	0,128	0,796	19,22	265,95	0,668	2,67
		5,4	61,18	0,025	0,045	0,96	63,11	0,055	0,72
50	34,95	39,14	299,7	0,103	1,107	21,02	260,55	1,001	4,062
		4,57	58,31	0,021	0,054	2,28	58,19	0,059	0,97
55	38,94	39,1	280,8	0,109	1,504	21,72	241,65	1,395	5,969
		3,44	39,95	0,03	0,05	0,64	43,35	0,044	1,13
60	41,82	34,42	306,4	0,148	1,835	21,08	272,02	1,687	6,727
		2,52	73,89	0,036	0,11	0,2	72,96	0,14	2,29
65	45,43	29,69	310,5	0,145	2,835	21,54	280,8	2,689	10,512
		3,93	69,49	0,035	0,17	0,77	67,68	0,19	3,97

$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	$\Delta U_m$ (KV)	$\Delta W$ (eV)	f (Hz)	$\lambda$ (m)	E (MV/cm)
10.47	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.106493
			-	-	-	-	-	0.106493
13.6	1000	5.51	-	-	-	-	-	0.138329
			-	-	-	-	-	0.138329
17.22	1000	5.51	0.015	0.000015	4.13E-05	1E+10	0.029962	0.175149
			0.002	0.000002	5.51E-06	1.33E+09	0.224714	0.175149
21.03	1000	5.51	0.065	0.000065	0.000179	4.34E+10	0.006914	0.213902
			0.016	0.000016	4.41E-05	1.07E+10	0.028089	0.213902
24.11	1000	5.51	0.229	0.000229	0.000631	1.53E+11	0.001963	0.245229
			0.006	0.000006	1.65E-05	4E+09	0.074905	0.245229
27.88	1000	5.51	0.423	0.000423	0.001165	2.82E+11	0.001062	0.283575
			0.025	0.000025	6.89E-05	1.67E+10	0.017977	0.283575
29.74	1000	5.51	0.668	0.000668	0.00184	4.46E+11	0.000673	0.302494
			0.02	0.00002	5.51E-05	1.33E+10	0.022471	0.302494
34.95	1000	5.51	1.004	0.001004	0.002766	6.7E+11	0.000448	0.355486
			0.033	0.000033	9.09E-05	2.2E+10	0.013619	0.355486
38.94	1000	5.51	1.395	0.001395	0.003843	9.31E+11	0.000322	0.396069
			0.02	0.00002	5.51E-05	1.33E+10	0.022471	0.396069
41.82	1000	5.51	1.687	0.001687	0.004648	1.13E+12	0.000266	0.425363
			0.074	0.000074	0.000204	4.94E+10	0.006073	0.425363
45.43	1000	5.51	2.69	0.00269	0.007411	1.79E+12	0.000167	0.462081
			0.135	0.000135	0.000372	9.01E+10	0.003329	0.462081

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8-1:** Υπολογισμός  $\Delta Q$ ,  $\Delta U_m$ ,  $\Delta W$ , f,  $\lambda$ , E για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ C$  – πάχος δοκιμίου d=2mm.

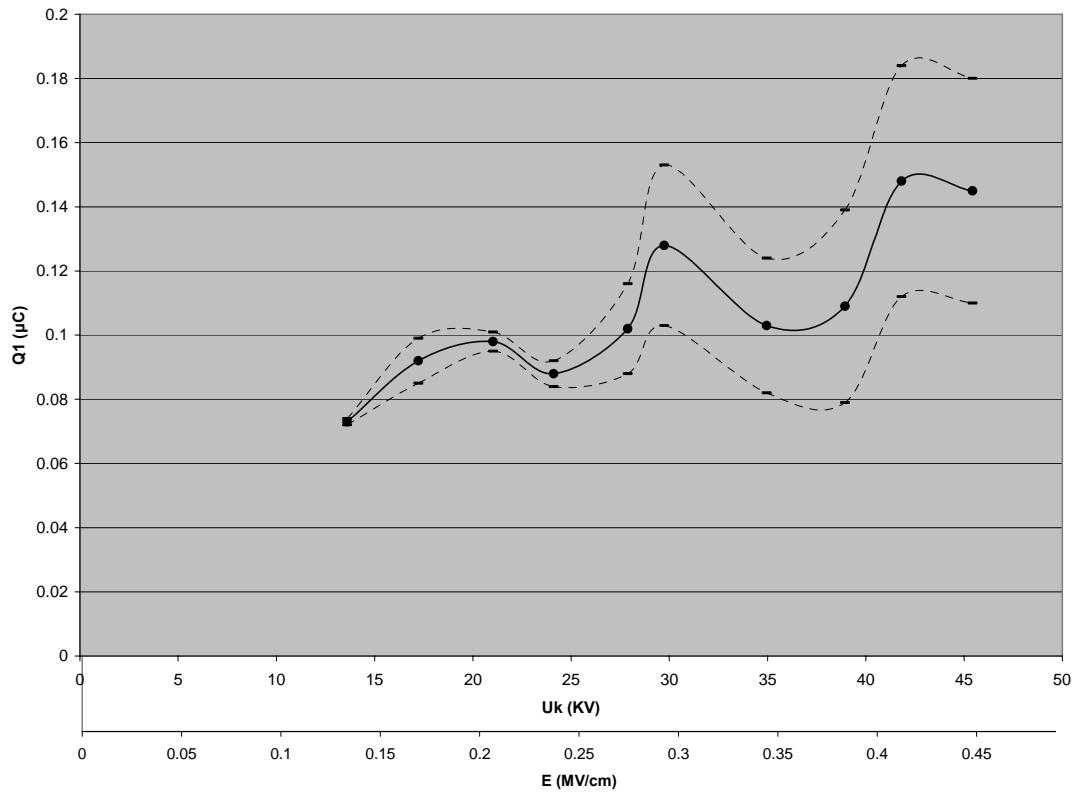
$U_k$ (KV)	$C_m$ (nF)	K	$Q_2$ ( $\mu C$ )	$W_2$ (eV)	$f_2$ (Hz)	$\lambda_2$ (m)	E (MV/cm)
10.47	1000	5.51	-	-	-	-	0.106493
			-	-	-	-	0.106493
13.6	1000	5.51	-	-	-	-	0.138329
			-	-	-	-	0.138329
17.22	1000	5.51	0.107	0.000295	7.14E+10	0.0042	0.175149
			0.009	2.48E-05	6E+09	0.049936	0.175149
21.03	1000	5.51	0.163	0.000449	1.09E+11	0.002757	0.213902
			0.019	5.23E-05	1.27E+10	0.023654	0.213902
24.11	1000	5.51	0.317	0.000873	2.11E+11	0.001418	0.245229
			0.01	2.76E-05	6.67E+09	0.044943	0.245229
27.88	1000	5.51	0.525	0.001446	3.5E+11	0.000856	0.283575
			0.039	0.000107	2.6E+10	0.011524	0.283575
29.74	1000	5.51	0.796	0.002193	5.31E+11	0.000565	0.302494
			0.045	0.000124	3E+10	0.009987	0.302494
34.95	1000	5.51	1.107	0.00305	7.38E+11	0.000406	0.355486
			0.054	0.000149	3.6E+10	0.008323	0.355486
38.94	1000	5.51	1.504	0.004144	1E+12	0.000299	0.396069
			0.05	0.000138	3.34E+10	0.008989	0.396069
41.82	1000	5.51	1.835	0.005055	1.22E+12	0.000245	0.425363
			0.11	0.000303	7.34E+10	0.004086	0.425363
45.43	1000	5.51	2.835	0.00781	1.89E+12	0.000159	0.462081
			0.17	0.000468	1.13E+11	0.002644	0.462081

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8-2:** Υπολογισμός  $Q_2$ ,  $W_2$ ,  $f_2$ ,  $\lambda_2$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ C$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .

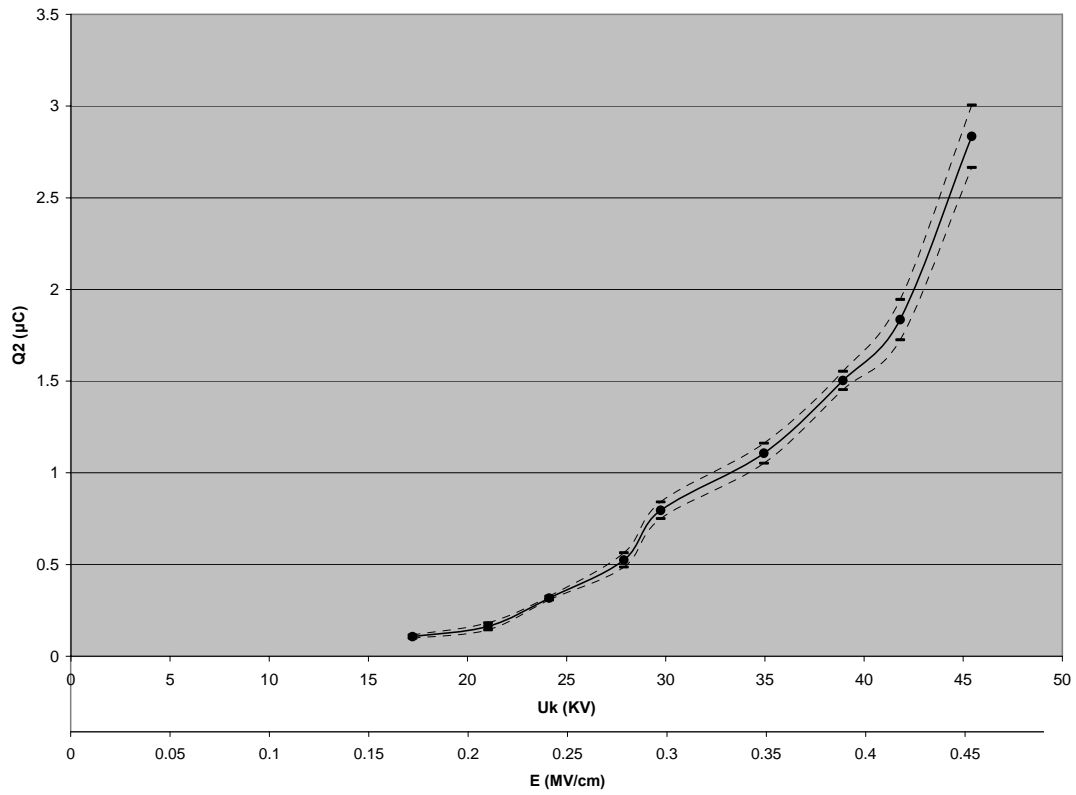
$U_k$ (KV)	E (MV/cm)	$U_{ev}$ (KV)	$E_{ev}$ (MV/cm)	$\Delta Q$ ( $\mu C$ )	Q2 ( $\mu C$ )
10.47	0.106493	-	-	-	-
		-	-	-	-
13.6	0.138329	-	-	-	-
		-	-	-	-
17.22	0.175149	16.16	0.164368	0.015	0.107
		1.08	0.010985	0.002	0.009
21.03	0.213902	16.88	0.171691	0.065	0.163
		1.26	0.012816	0.016	0.019
24.11	0.245229	18.75	0.190711	0.229	0.317
		0.32	0.003255	0.006	0.01
27.88	0.283575	17.41	0.177082	0.423	0.525
		3.14	0.031938	0.025	0.039
29.74	0.302494	19.22	0.195492	0.668	0.796
		0.96	0.009764	0.02	0.045
34.95	0.355486	21.02	0.2138	1.004	1.107
		2.28	0.023191	0.033	0.054
38.94	0.396069	21.72	0.22092	1.395	1.504
		0.64	0.00651	0.02	0.05
41.82	0.425363	21.08	0.21441	1.687	1.835
		0.2	0.002034	0.074	0.11
45.43	0.462081	21.54	0.219089	2.69	2.835
		0.77	0.007832	0.135	0.17

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.8-3:** Υπολογισμός  $E_{ev}$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=40^0C$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .

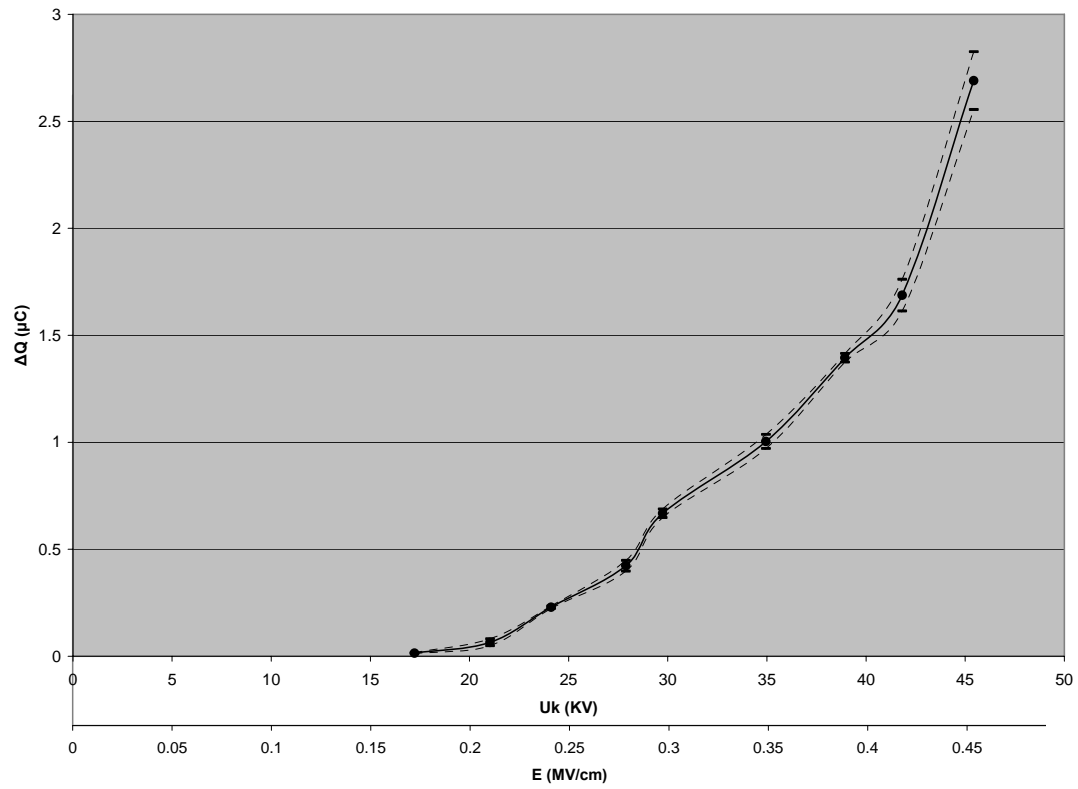




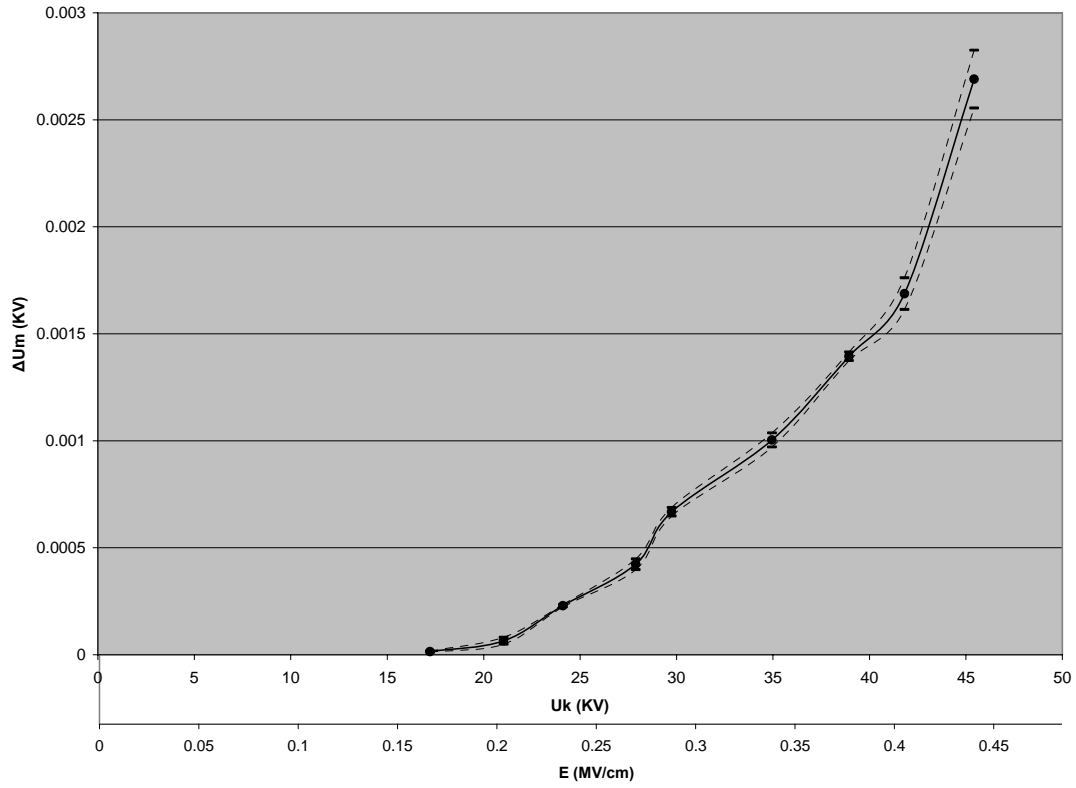
**Σχήμα 3.8-1:** Χαρακτηριστική  $Q_1 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



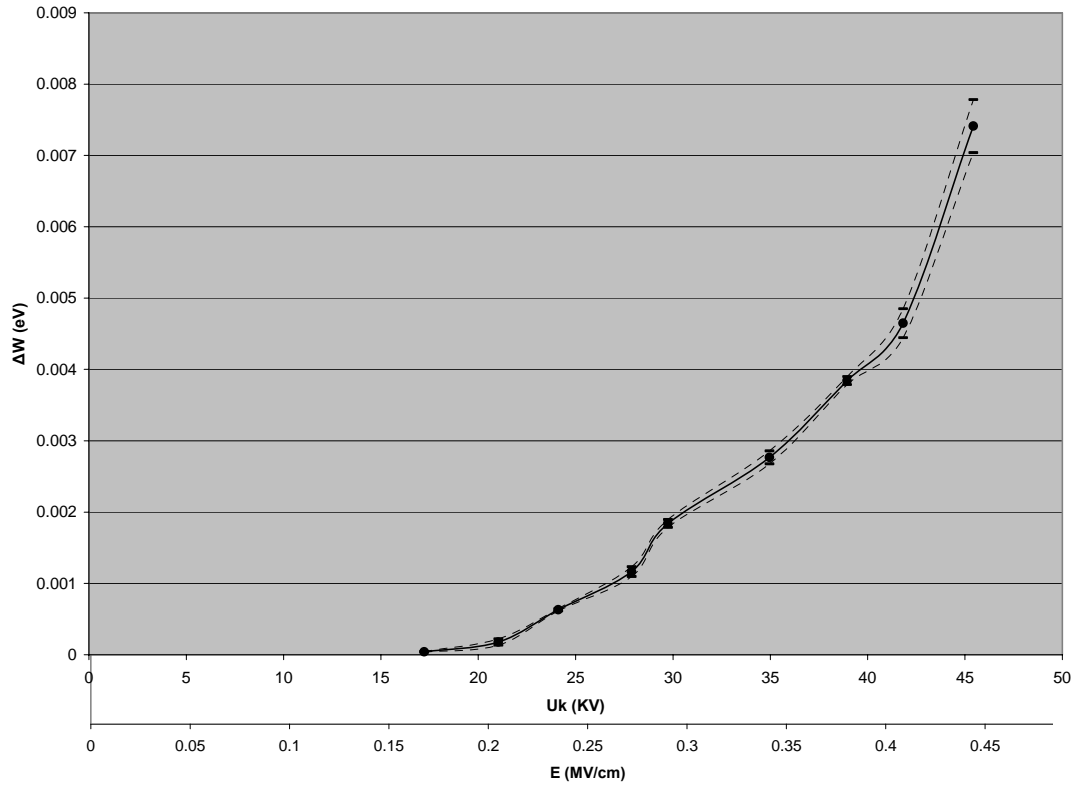
**Σχήμα 3.8-2:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



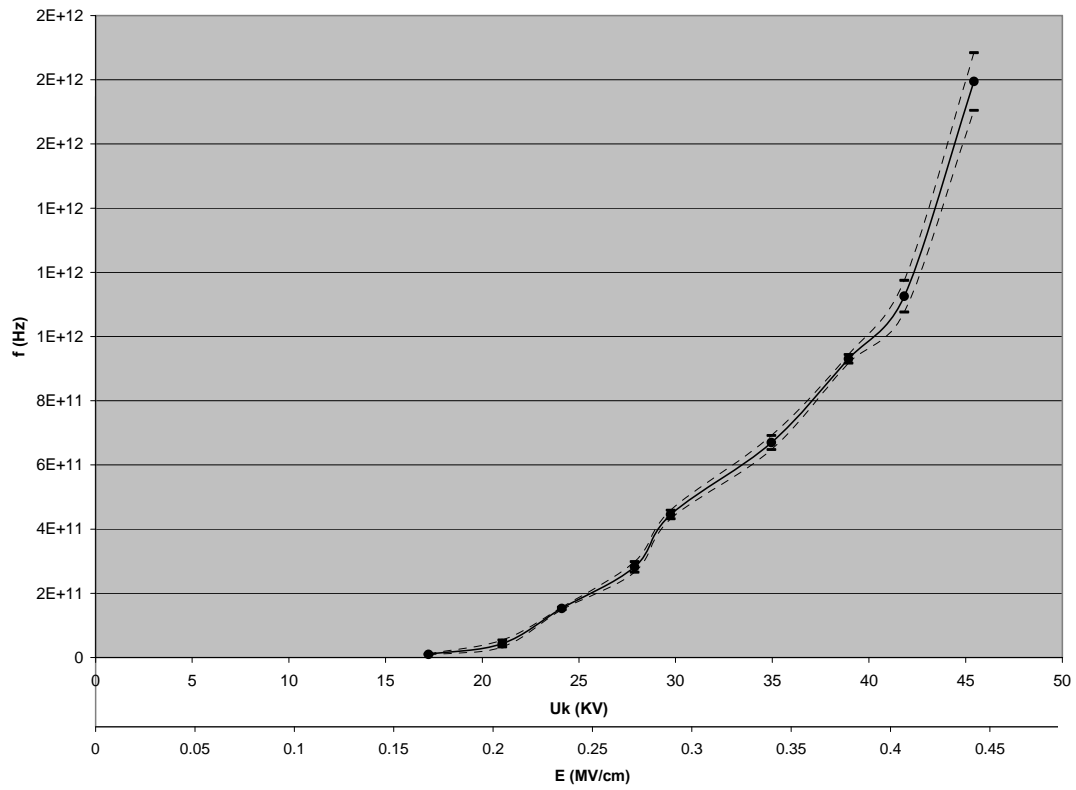
**Σχήμα 3.8-3:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



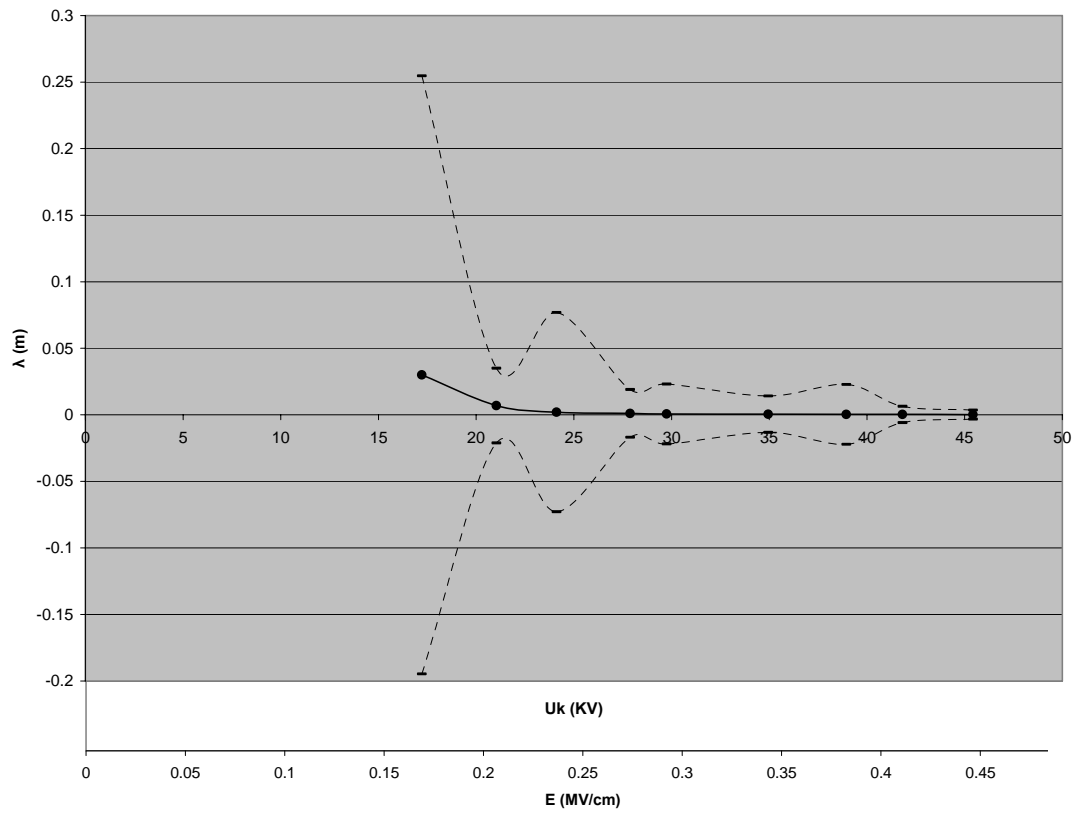
**Σχήμα 3.8-4:** Χαρακτηριστική  $\Delta U_m = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



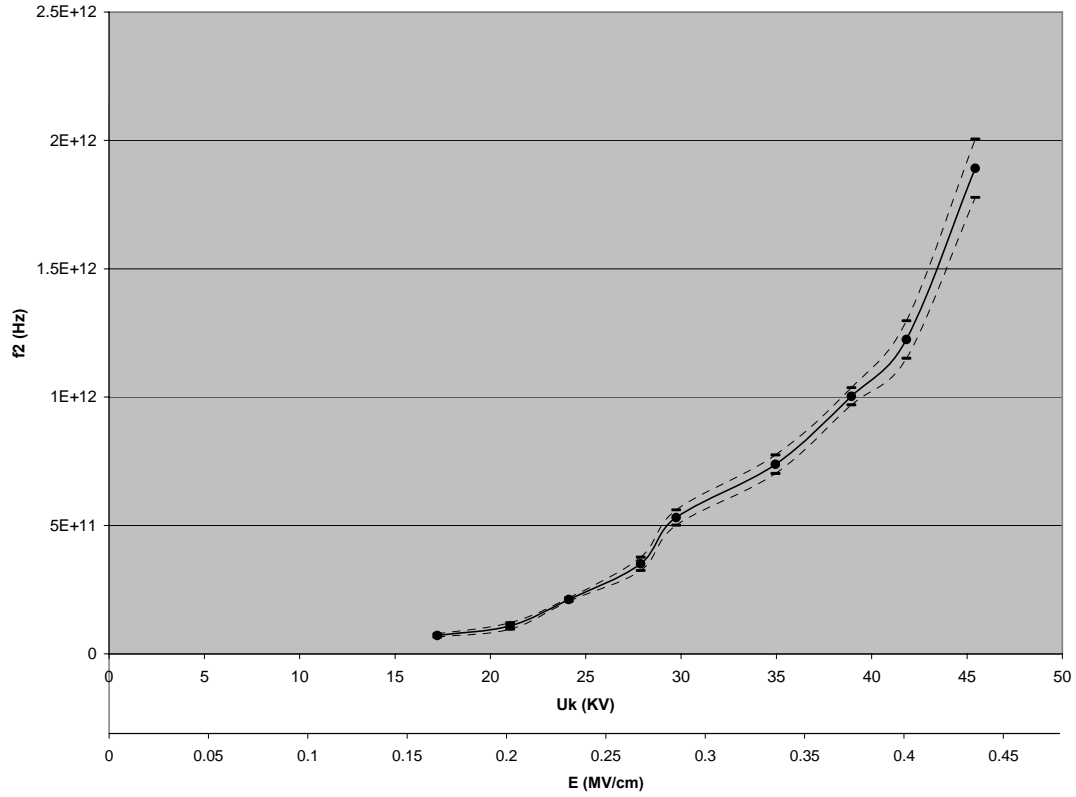
**Σχήμα 3.8-5:** Χαρακτηριστική  $\Delta W = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.8-6:** Χαρακτηριστική  $f = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

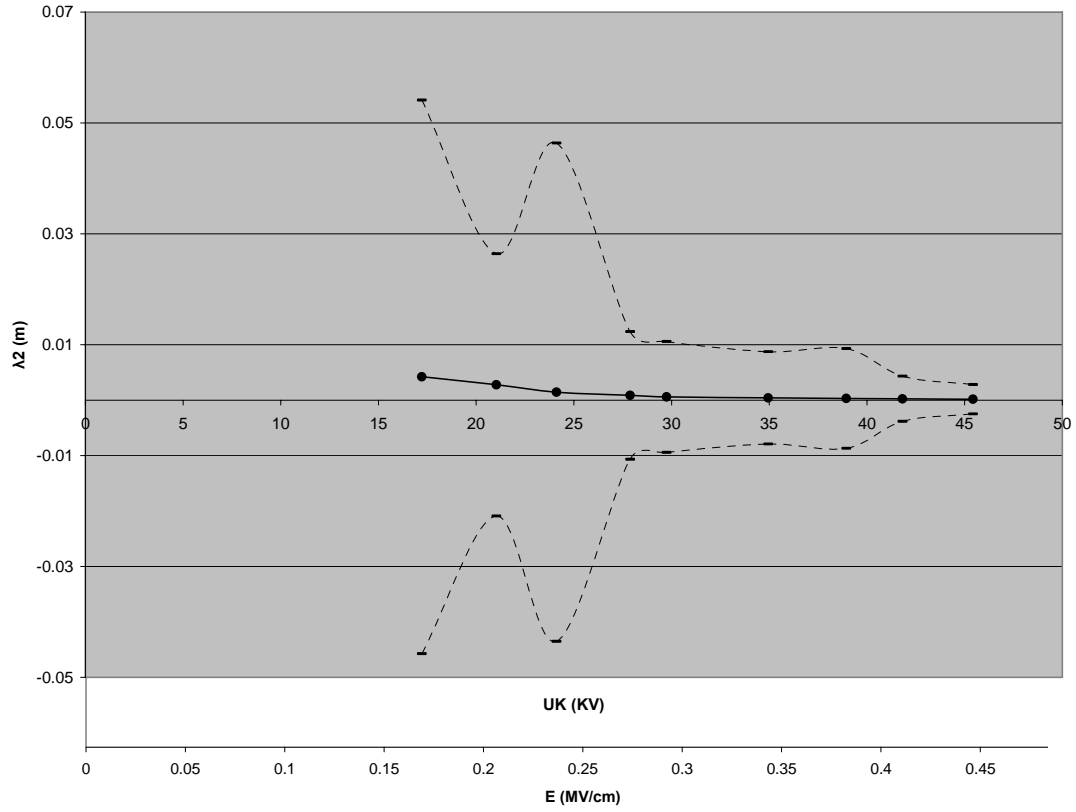


**Σχήμα 3.8-7:** Χαρακτηριστική  $\lambda = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

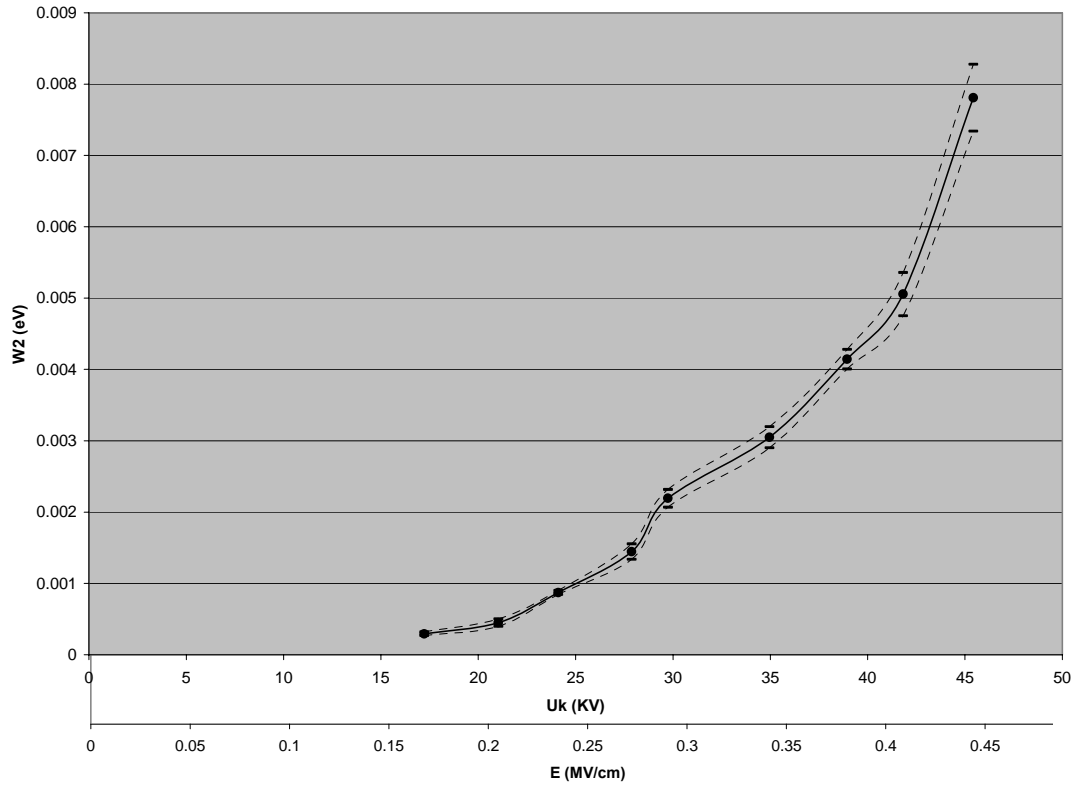


**Σχήμα 3.8-8:** Χαρακτηριστική  $f_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

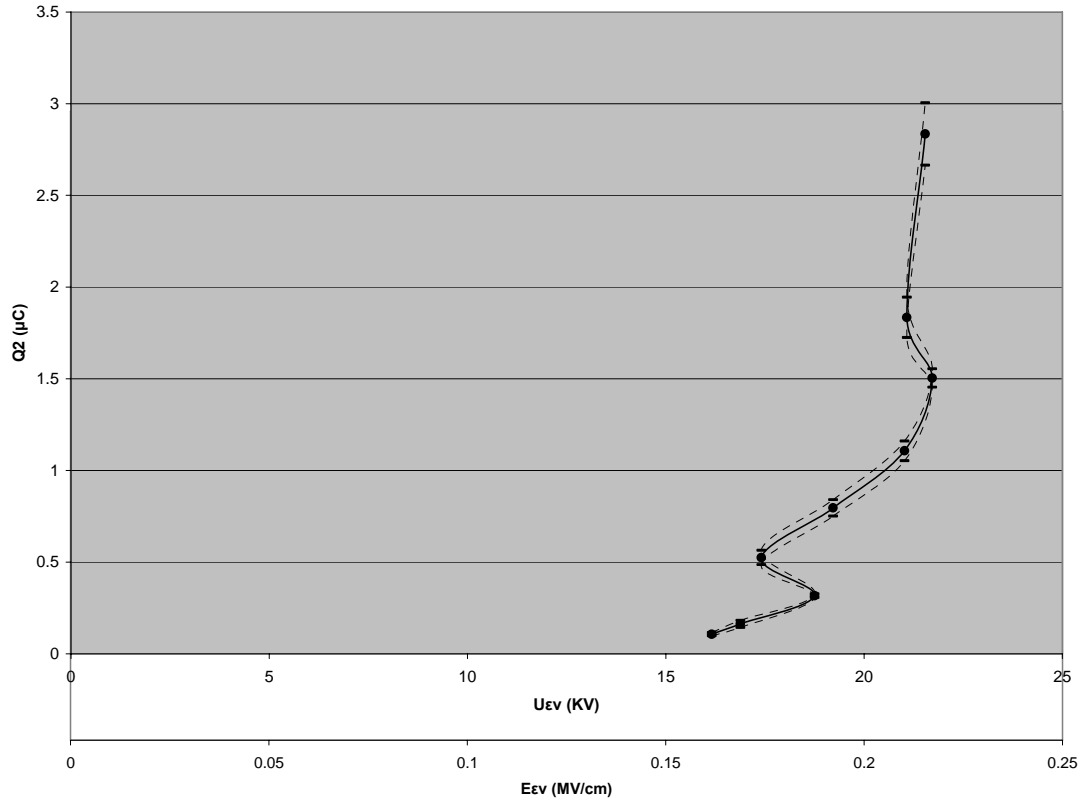




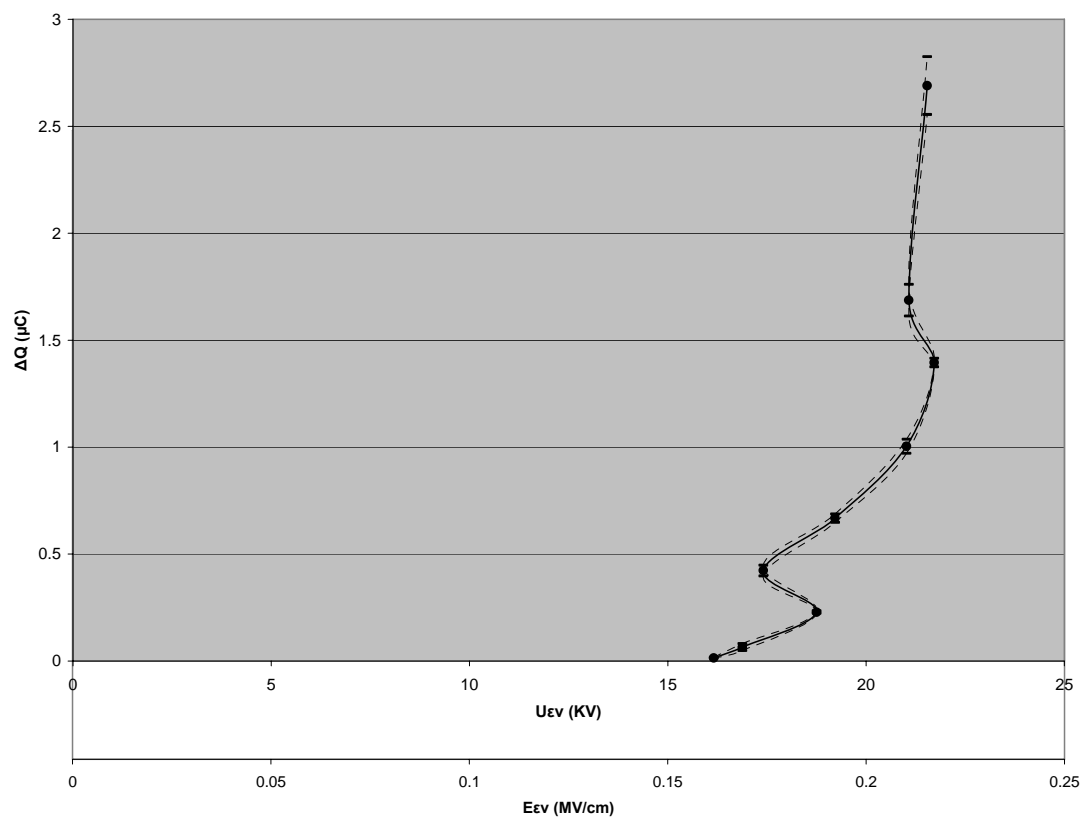
**Σχήμα 3.8-9:** Χαρακτηριστική  $\lambda_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^\circ\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



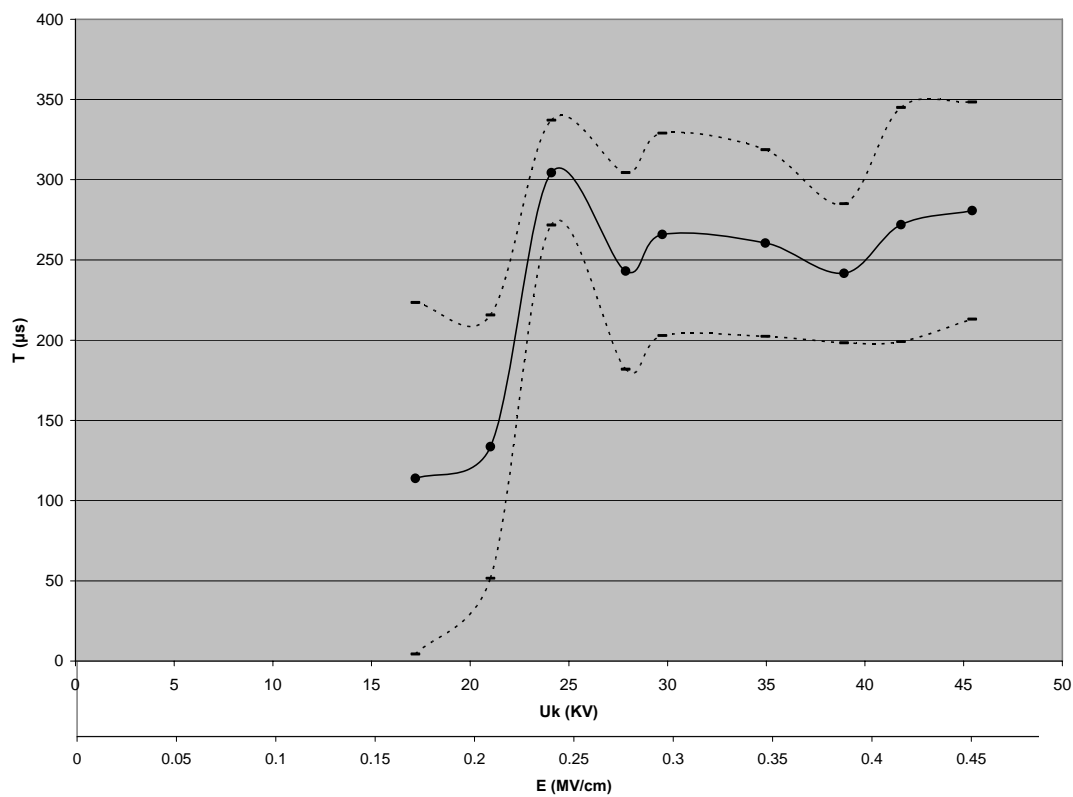
**Σχήμα 3.8-10:** Χαρακτηριστική  $W_2 = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.8-11:** Χαρακτηριστική  $Q_2 = f(U_{ev}, E_{ev})$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}C$   
– πάχος δοκιμίου  $d=2mm$ .



**Σχήμα 3.8-12:** Χαρακτηριστική  $\Delta Q = f(U_{EV}, E_{EV})$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .



**Σχήμα 3.8-13:** Χαρακτηριστική  $T = f(U_k, E)$  για Αρνητική πολικότητα –  $\Theta=80^{\circ}\text{C}$   
 – πάχος δοκιμίου  $d=2\text{mm}$ .

## 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην εισαγωγή της διπλωματικής αυτής εργασίας οι βασικοί παράγοντες γήρανσης των ηλεκτρομονωτικών υλικών είναι οι απώλειες Joule, οι δυνάμεις Coulomb, οι μερικές εκκενώσεις και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Οι παράγοντες αυτοί επιδρούν πάνω στα υλικά και αυτό φαίνεται από την ερμηνεία των γραφικών παραστάσεων από τις οποίες μπορούμε να βγάλουμε τα συμπεράσματά μας. Όσον αφορά τις απώλειες Joule, αυτές αποκλείονται γιατί ο χρόνος διάσπασης είναι μικρός και δεν προλαβαίνει να υπάρξει θερμική καταπόνηση.

Κάθε φορά που θα αναπτύσσονται δυνάμεις Coulomb έχουμε μείωση του φορτίου. Έτσι η αύξηση του φορτίου συνεπάγεται την αύξηση των μερικών εκκενώσεων. Με την κβαντική θεωρία εξηγείται η αύξηση των φορτίων. (Σύμφωνα με αυτήν, η αύξηση της τάσης δημιουργεί πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ιονισμός με κρούσεις.) Με τον ίδιο τρόπο συνεπώς θα αυξάνονται όλα τα μεγέθη, τα οποία είναι ανάλογα με τα μεγέθη των φορτίων, όπως τα άλματα δυναμικού, η συχνότητα κλπ. (σχέσεις 3.1 - 3.2 - 3.3 - 3.5), ενώ θα μειώνονται τα μεγέθη που είναι αντιστρόφως ανάλογα με τα μεγέθη των φορτίων (σχέση 3.4). Συνδυάζοντας τη μακροσκοπική και την κβαντομηχανική θεωρία μπορούμε να καταλάβουμε τη μείωση των φορτίων, οπότε και την αύξηση των δυνάμεων Coulomb. Οι μεταβολές στις καμπύλες οφείλονται λοιπόν σε έναν από τους παραπάνω παράγοντες, επομένως τα άλματα στις καμπύλες φανερώνουν αλλαγές στη δομή του υλικού.

Οι χαρακτηριστικές των μεγεθών που μας δόθηκαν, καθώς και αυτών που υπολογίσθηκαν, επιβεβαιώνουν τα όσα αναφέραμε παραπάνω. Βλέπουμε ότι αύξηση της κρουστικής τάσης προκαλεί εκθετική αύξηση των μεγεθών που είναι ανάλογα με τα φορτία και μείωση αυτών που είναι αντιστρόφως ανάλογα με τα φορτία. (Στην κάθε χαρακτηριστική υπάρχει και ο άξονας που δείχνει τις αντίστοιχες τιμές της έντασης του πεδίου, καθώς επίσης φαίνονται και οι θετικές και αρνητικές αποκλίσεις του κάθε μεγέθους)

Το κάθε μέγεθος το υπολογίσαμε με θετική και με αρνητική πολικότητα και σε συνδυασμό με θερμοκρασία περιβάλλοντος  $40^{\circ}\text{C}$  και  $80^{\circ}\text{C}$ . Από τις χαρακτηριστικές που σχεδιάσαμε καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα, που ήταν αναμενόμενο και με βάση τη θεωρία. Έτσι βλέπουμε ότι η τάση διάσπασης (για κάθε μέγεθος) έχει μεγαλύτερες τιμές στη θετική πολικότητα απ' ό τι στην αρνητική πολικότητα για την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης παρατηρούμε ότι αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος προκαλεί μείωση της τιμής της τάσης για την αντίστοιχη πολικότητα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- (1) Π. Δ. Μπούρκας : Εφαρμογές Κτιριακών Και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων  
Εκδόσεις Ε.Μ.Π  
Αθήνα 1998
  
- (2) Π. Δ. Μπούρκας, Κ.Γ.Καραγιαννόπουλος : Μετρήσεις Σε Βιομηχανικές Διατάξεις Και Υλικά  
Εκδόσεις Ε.Μ.Π  
Αθήνα 2004
  
- (3) Π. Δ. Μπούρκας : Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων (Σημειώσεις Σεμιναρίου Για Μηχανικούς Της Δ.Ε.Η.)  
Αθήνα 2001
  
- (4) Δ. Δ. Δημητριάδου : Διπλωματική Εργασία <<Στατιστική Ανάλυση Των Μερικών Εκκενώσεων Σε Βιομηχανικά Ηλεκτρομονωτικά Υλικά Υπό Κρουστικές Τάσεις Χειρισμών Και Υπό Κεραυνικές Τάσεις>>.  
Αθήνα 2004