



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εκπεμπόμενη Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία κατά την
Γήρανση Στερεών Μονωτικών υπό Κρουστικές Τάσεις
 $\pm 250/2500$ μs σε Θερμοκρασία Περιβάλλοντος 20°C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΜΑΡΓΑΡΗΣ

Επιβλέπων : Περικλής Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εκπεμπόμενη Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία κατά την
Γήρανση Στερεών Μονωτικών υπό Κρουστικές Τάσεις
 $\pm 250/2500$ μs σε Θερμοκρασία Περιβάλλοντος 20°C**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΜΑΡΓΑΡΗΣ

Επιβλέπων : Περικλής Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή.

.....
Περικλής Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2009

.....
Γεώργιος Π. Μάργαρης

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

Copyright © Μάργαρης Π. Γεώργιος

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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο των Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. κατά το ακαδημαϊκό έτος 2008-09 στα πλαίσια των εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων του εργαστηρίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Περικλή Μπούρκα για τις πολύτιμες συμβουλές, την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια ολοκλήρωσης της διπλωματικής εργασίας.

Η εργασία αυτή αφιερώνεται στο νεογέννητο αγοράκι μου που ήρθε στον κόσμο την περίοδο εκπόνησης της εργασίας, και φυσικά στην σύζυγό μου Κατερίνα που χωρίς την κατανόησή της θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωσή της εντός εύλογου χρονικού διαστήματος.

Γεώργιος Π. Μάργαρης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	8
Abstract.....	9
A ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1. Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών.....	10
1.1 Η διηλεκτρική αντοχή.....	11
1.2 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	11
1.3 Ο συντελεστής απωλειών.....	12
1.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα.....	13
1.5 Ο συντελεστής $\epsilon \tan\delta$	14
1.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα.....	16
1.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	16
1.8 Η μηχανική αντοχή.....	17
2. Διάκριση των ηλεκτρομονωτικών υλικών με βάση τη φυσική τους κατάσταση.....	17
2.1 Αέρια μονωτικά.....	18
2.1.1 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών.....	18
2.1.2 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με στερεά και υγρά μονωτικά..	21
2.2 Υγρά μονωτικά.....	21
2.3 Στερεά μονωτικά.....	22
2.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών.....	23
2.3.2 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.....	23
2.3.2.1 Η θερμική διάτρηση.....	24
2.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση.....	26
2.3.2.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων.....	28
2.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση.....	32
2.3.2.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση.....	32
2.3.2.6 Στατιστικές μετρήσεις των μερικών εκκενώσεων.....	33
2.3.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών.....	38
2.3.4 Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τη διάτρηση.....	41
2.3.5 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση.....	42
3. Παραγωγή και μέτρηση κρουστικών τάσεων.....	44

Β. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΝΟΙΩΝ – ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ

1. Διαδικασία μετρήσεων.....	45
1.1 Ορισμοί ηλεκτρικών μεγεθών.....	45
1.2 Κύκλωμα μέτρησης.....	47
1.3 Περιγραφή διεξαγωγής των μετρήσεων.....	48
2. Αποτελέσματα-πίνακες-γραφικές παραστάσεις	48
2.1 Δοκίμιο πάχους $d=1mm$, Μέση Τιμή Φορτίου, Θετική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	48
2.2 Δοκίμιο πάχους $d=1mm$, Μέση Τιμή Φορτίου, Αρνητική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	57
2.3 Δοκίμιο πάχους $d=2mm$, Μέση Τιμή Φορτίου, Θετική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	65
2.4 Δοκίμιο πάχους $d=2mm$, Μέση Τιμή Φορτίου, Αρνητική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	73
2.5 Δοκίμιο πάχους $d=1mm$, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, Θετική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	80
2.6 Δοκίμιο πάχους $d=1mm$, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, Θετική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης	88
2.7 Δοκίμιο πάχους $d=1mm$, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, Αρνητική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	95
2.8 Δοκίμιο πάχους $d=1mm$, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, Αρνητική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	102
2.9 Δοκίμιο πάχους $d=2mm$, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, Θετική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	109
2.10 Δοκίμιο πάχους $d=2mm$, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, Θετική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης	116
2.11 Δοκίμιο πάχους $d=2mm$, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, Αρνητική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	123
2.12 Δοκίμιο πάχους $d=2mm$, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, Αρνητική Πολικότητα Κρουστικής Τάσης.....	130

Γ. ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	137
--	------------

Βιβλιογραφία.....	141
--------------------------	------------

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μέτρηση, ο υπολογισμός και η γραφική αναπαράσταση ηλεκτρικών μεγεθών που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται κατά την γήρανση ενός οργανικού υλικού (π.χ Pertinax, βακελίτης, χαρτί) εντός μονωτικού ελαίου όταν προσβάλλεται από κρουστική τάση U_k της μορφής $\pm 250/2500\mu s$ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $20^\circ C$, όπως π.χ η ενέργεια της ακτινοβολίας, το είδος, η συχνότητα και το μήκος κύματος, η ταχύτητα, η κινητικότητα και ο αριθμός των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων. Ο στόχος της προσπάθειας αυτής είναι αφενός να μπορεί ο αναγνώστης να έχει άμεση εποπτική εικόνα της μεταβολής αυτών των μεγεθών ανάλογα με την πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης αλλά και του πάχους του εξεταζόμενου δοκιμίου, και αφετέρου να εξαχθούν συμπεράσματα που θα βοηθήσουν ακόμα περισσότερο στην κατανόηση του φαινομένου της γήρανσης των στέρεων μονωτικών υλικών.

Η εργασία είναι χωρισμένη σε τρία μέρη. Στο πρώτο και θεωρητικό γίνεται αναφορά στις βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομονωτικών υλικών, οι οποίες χρησιμεύουν ως απλά κριτήρια επιλογής τους στις διάφορες ηλεκτροτεχνικές κατασκευές. Τα υλικά αυτά διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες με βάση τη φυσική τους κατάσταση: τα υγρά, τα αέρια και τα στερεά μονωτικά. Θα περιγραφούν με λίγα λόγια τα υγρά και αέρια μονωτικά και θα αναλυθούν εκτενώς τα στερεά, που είναι και το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα θα μελετηθούν τα φαινόμενα που παρουσιάζουν πριν και κατά τη διάρκεια της διάσπασής τους.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναλυτική αναφορά στη διαδικασία διεξαγωγής των μετρήσεων, δίνεται ο ορισμός και οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη μορφή πινάκων και γραφικών παραστάσεων, μετά την επεξεργασία τους με το πρόγραμμα Microsoft Excel.

Τέλος στο τρίτο μέρος γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων μέσω παρατηρήσεων και γραφικών απεικονίσεων, ούτως ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω μελέτη και έρευνα.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to the measurement, calculation and graphic representation of electrical elements, relevant to the electromagnetic irradiation emitted when an organic material (Pertinax, Bakelite or Paper), imerged into insulating oil, gets old under impulse voltage of $\pm 250/2500\mu\text{s}$ distress and 20°C surroundings temperature. Such elements are, for example, the energy, categorie, frequency and wavelength of this irradiation, the speed, movability and the number of the electrons. The goal of this effort is not only that the reader to have a direct view of these elements' change according to the voltage polarity and thickness of the material, but also to come to conclusions that will give another hand to the better understanding of this phenomena.

The thesis is divided in three parts. In the first and theoretical part basic characteristics of nonconductive materials are mentioned, which can be used as choice criteria for basic electrotechnical structures. Those materials break into three main categories according to their physical state. Liquids, gases and nonconductive solids. Liquids and gases will be discussed in a few words while solids, which are the main subject of this thesis, will be discussed thoroughly. In particular we will go over phenomena before and after their breakdown.

In the second part there is a thorough description of the measurement procedure, the electrical elements are being defined and the mathematical equations that were used for the estimations are given. Furthermore measurements and estimations are presented in tables and graphs using Microsoft Excel.

Finally in the third part an effort to come to safe and useful for further study and research conclusions is given.

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

(Το εισαγωγικό μέρος της εργασίας αυτής προέρχεται κυρίως από την βιβλιογραφία [1,2,3,4,5])

Μονωτικά υλικά ονομάζονται τα υλικά που δεν έχουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην περίπτωση που βρίσκονται εντός ηλεκτρικού πεδίου. Έτσι, η ύπαρξη μονώσεων σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή απαιτείται για τον ηλεκτρικό διαχωρισμό μεταξύ ρευματοφόρων μερών, καθώς και ρευματοφόρων μερών προς τη γη με τέτοιο τρόπο, ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. Άλλη μια πολύ σημαντική εφαρμογή των μονωτικών είναι η χρήση τους ως διηλεκτρικών υλικών, ανάμεσα στις πλάκες των πυκνωτών. Γενικά με την χρήση μονώσεων ελαχιστοποιούμε την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της διάσπασης.

Με τον όρο **διάσπαση** εννοούμε την αγωγή 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 η διάσπαση ονομάζεται **επιφανειακή διάσπαση**. Η διάσπαση στο περιβάλλον μέσο ενός στερεού μονωτικού, λόγω μείωση της απόστασης μόνωσης από ξένες επικαθήσεις στην επιφάνεια του υλικού (π.χ. ρυπασμένοι μονωτήρες) ονομάζεται **υπερπήδηση**. Η διάσπαση δια του όγκου ενός μονωτικού υλικού καλείται **διάτρηση**.

Σε μια απλή διάταξη δύο ηλεκτροδίων τα χωρικά φορτία συγκεντρώνονται προ του ηλεκτροδίου με την αντίθετη προς αυτά πολικότητα, σχηματίζοντας έτσι ένα νέφος χωρικών φορτίων. Το πεδίο αυτό ονομάζεται **ηλεκτροστατικό** για όσο τα χωρικά αυτά φορτία είναι αμετακίνητα. Αυτή η κατάσταση ισορροπίας των εξασκούμενων δυνάμεων Coulomb συμβαίνει μέχρι μια τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Όταν μετά από την τιμή αυτή του εφαρμοζόμενου πεδίου καταστραφεί η κατάσταση ισορροπίας, χωρίς να συμβεί η συνολική διάσπαση, τότε εκδηλώνονται εκκενώσεις σε περιορισμένο μήκος του μονωτικού, που ονομάζονται **μερικές εκκενώσεις**.

Οι μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε θέσεις ανομοιογένειας στον όγκο ή στην επιφάνεια του υλικού (κυρίως φυσαλίδες αερίων στον όγκο του υλικού και διάφορες ξένες επικαθήσεις στην επιφάνειά του όπως σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Όταν οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται στον όγκο ενός στερεού μονωτικού ονομάζονται **εσωτερικές μερικές εκκενώσεις** και οι αντίστοιχες στην επιφάνειά του, **εξωτερικές μερικές εκκενώσεις**. Οι μερικές εκκενώσεις στον αέρα γύρω από γυμνούς αγωγούς έχουν την ξεχωριστή ονομασία **στεμματοειδείς μερικές εκκενώσεις (ή εκκενώσεις corona)**.

1 Βασικά κριτήρια αξιολόγησης των ηλεκτρομονωτικών υλικών

Η ανάγκη για την αξιόπιστη διαχρονική συμπεριφορά των διαφόρων μονωτικών υλικών σε μία κατασκευή υψηλών τάσεων έχει οδηγήσει σε ορισμένα βασικά κριτήρια αξιολόγησής τους, τα οποία δεν αφορούν μόνο τις ηλεκτρικές (ή διηλεκτρικές) ιδιότητές τους, άλλα και άλλες ιδιότητες που πρέπει να έχουν ανάλογα με την κατασκευή, όπως π.χ.: η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος, κ.λ.π. Τα κριτήρια αυτά είναι :

1.1 Η διηλεκτρική αντοχή

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

$$E_d = \frac{U_{d \min}}{d} \quad (\text{σε MV/cm}) \quad (\text{A1.1})$$

Ακολουθεί πίνακας με παραδείγματα μονωτικών υλικών και αντίστοιχες τιμές της διηλεκτρικής αντοχής τους :

Μονωτικό Υλικό	d [mm]	E_d [kV/cm]
Αέρας		21
Λάδι μετασχηματιστών		60...200
Πορσελάνη	0,5...3	340...380
Στεατίτης	0,5...3	200...300
Γυαλί	<1	160...450
Χαρτί	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 A1.1: Διηλεκτρική αντοχή E_d για καταπόνηση μικρής χρονικής διάρκειας ορισμένων μονωτικών υλικών σε ομογενές πεδίο συχνότητας 50 Hz.

1.2 Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα ($C = \epsilon_r \cdot C_0$). Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διάφορων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. Ο πίνακας A1.2 παρουσιάζει τις τιμές της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς για τα πιο γνωστά υλικά.

Υλικό	ϵ_r	Υλικό	ϵ_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	5-16	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 ₆	1,002049
Λάστιχο	2,8-6,5	Στεατίτης	6,4
Ξύλο	2,5-6,5	Χαλαζίας	3-7

Πίνακας Α1.2: Σχετική διηλεκτρική σταθερά ορισμένων υλικών στους 20 °C.

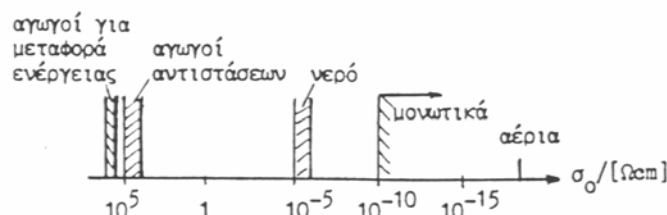
1.3 Ο συντελεστής απωλειών

Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται :

α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης,

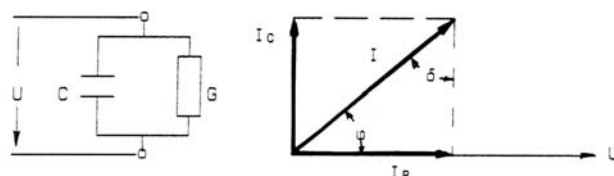
β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά (σχήμα Α1.3-1).

Έτσι, ο μονωτής έχει, εκτός από το χωρητικό ρεύμα I_C και ένα ρεύμα διαρροής I_R . Στην πράξη το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών.



Σχήμα Α1.3-1 : Τάξη μεγέθους της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας διαφόρων κατηγοριών υλικών.

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητάς του G).

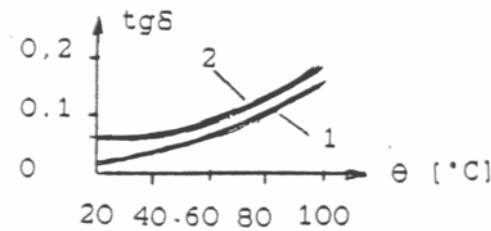


Σχήμα Α1.3-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του.

Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{G}{\omega C} \quad (\text{A1.3-1})$$

και είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού (ή μίας μονωτικής διάταξης γενικότερα), γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητά του (σχήμα A1.3-3). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό η $\text{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία.



Σχήμα A1.3-3 : $\text{tg}\delta$ ορισμένων διηλεκτρικών
1 : σκληρό χαρτί, 2 : πορσελάνη.

Οι απώλειες Joule (P_w) στην αγωγιμότητα G είναι :

$$P_w = I_R U = G U^2 = U^2 \omega C \cdot \text{tg}\delta = P_B \text{tg}\delta \quad (\text{A1.3-2})$$

όπου P_B η άεργος ισχύς (ισχύς στην χωρητικότητα C).

Αν υποθέσουμε ότι ο παραπάνω πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ , τότε η τιμή της χωρητικότητας C είναι :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{A1.3-3})$$

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση :

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (\text{A1.3-4})$$

όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού. Για τις απώλειες του πυκνωτή αυτού ισχύει :

$$P_w = U^2 \omega \cdot \epsilon \frac{A}{d} \cdot \text{tg}\delta \quad (\text{A1.3-5})$$

ή πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με d :

$$P_w = (U/d)^2 \omega \cdot \epsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot (Ad) = (U/d)^2 \omega \cdot \epsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot V \quad (\text{A1.3-6})$$

όπου V ο όγκος του διηλεκτρικού.

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

$$P_w = \omega \cdot \epsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot \int (U/d)^2 dV = \omega \cdot \epsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot \int E^2 dV \quad (\text{A1.3-7})$$

1.4 Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (σχήμα A1.3-1), που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

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

$$\sigma = \sigma_0 e^{-W/kT} = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (\text{A1.4-1})$$

σ_0 : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

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

k : η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού (π.χ. για το presspan $\beta \approx 0,02$)

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται, ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης.

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγούμενως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια.

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

$$\sigma = \sigma_0 \frac{\exp(\beta\theta)}{(1 - \delta E)^2} \quad (\text{A1.4-2})$$

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

Η αγωγιμότητα τέλος των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία X ειδικότερα μπορεί να μετατρέψει ένα μονωτή σε αγωγό. Φαίνεται ότι η ακτινοβολία προκαλεί διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών. Το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως επαγόμενη αγωγιμότητα, αποτελεί πρόβλημα στις διαστημικές κατασκευές, λόγω του υψηλού ποσοστού κοσμικής ακτινοβολίας.

1.5 Ο συντελεστής $\epsilon \cdot \text{tg} \delta$

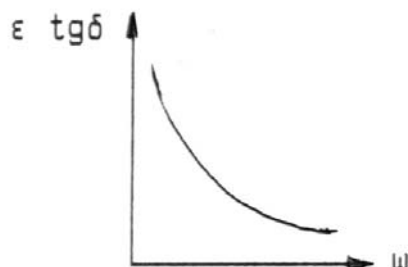
Από τις σχέσεις (A1.3-1), (A1.3-3) και (A1.3-4) έχουμε για ένα πυκνωτή επίπεδων πλακών :

$$\epsilon_r \cdot \text{tg} \delta = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (\text{A1.5-1})$$

ή με $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (\text{A1.5-2})$$

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής κατά την παραπάνω σχέση.



Σχήμα A1.5-1 : $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = f(\omega)$ για το ομοιογενές μονωτικό υλικό.
(Υποτίθεται ότι η τιμή σ είναι σταθερή με τη θερμοκρασία)

Το γινόμενο $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών (πίνακας A1.5).

Υλικό	Πάχος μόνωσης σε [mm]	$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004...0,0046
Πορσελάνη	0,5...3	0,085...0,16
Στεατίτης	0,5...3	0,006...0,02
Γυαλί	<1	
Χαρτόνι	0,5...1,5	0,03...0,1
Glimmer	0,01...0,1	0,009...0,012

Πίνακας A1.5 : Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C.

Από τις σχέσεις (A1.5-2) και (A1.4-1) έπεται ότι ο συντελεστής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ του ομοιογενούς στερεού μονωτικού υλικού (ή γενικότερα του στερεού διηλεκτρικού όταν δεν εκδηλώνονται σε αυτό μερικές εκκενώσεις, π.χ. λόγω $U < U_a$) αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία :

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} e^{\beta\theta} \quad (\text{A1.5-3})$$

Αν θεωρήσουμε την τιμή ε ως σταθερή, τότε από την παραπάνω σχέση έπεται ότι η αύξηση της $\operatorname{tg} \delta$ είναι εκθετική (σχήμα A1.3-3).

Για την αύξηση της τιμής $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ στην περιοχή του στερεού μονωτικού, όπου οι μερικές εκκενώσεις συντελούν στην αύξηση των απωλειών Joule, έχουμε αντίστοιχα (από τις σχέσεις A1.4-2 και A1.5-2) :

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e^{\beta \theta}}{(1 - \delta E)^2} \quad (\text{A1.5-4})$$

1.6 Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών.

Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους (όπως : αντοχή σε ρεύμα διαρροής, αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κ.λ.π.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή π.χ. μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπτών. Με κριτήριο π.χ. τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνειά τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή.

Πληροφορίες για τη μέτρηση της επιφανειακής αγωγιμότητας μπορούν να αναζητηθούν στις προδιαγραφές (π.χ. VDE 0303) και στη βιβλιογραφία περί ηλεκτρικών μετρήσεων.

1.7 Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις, όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπτών). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα A1.7 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά.

Υλικό	Πάχος μόνωσης [mm]	$\lambda \left[\frac{W \cdot cm}{cm^2 grad} \right]$
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 Α1.7 : Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα μονωτικά υλικά.

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μία διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους.

1.8 Η μηχανική αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν εκτός από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως π.χ. τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποζεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς. Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν για τον υπολογισμό του οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών.

Συχνά ενδιαφέρει η μηχανική αντοχή σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (π.χ. πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση π.χ. ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή, που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου.

2 Διάκριση των ηλεκτρομονωτικών υλικών με βάση τη φυσική τους κατάσταση

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά χωρίζονται, με βάση την φυσική τους κατάσταση σε τρεις κατηγορίες: τα αέρια, τα υγρά και τα στερεά μονωτικά. Ακολουθεί περιγραφή των αερίων και των υγρών μονωτικών και εκτενής ανάλυση των στερεών, όπως το συγκεκριμένο δοκίμιο της διπλωματικής αυτής εργασίας.

2.1 Αέρια μονωτικά

Τα αέρια μονωτικά έχουν την ιδιαιτερότητα ότι μετά το τέλος της διάσπασής τους αποκτούν και πάλι την μονωτική τους ικανότητα. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των στερεών μονωτικών, των οποίων η διάσπαση συνοδεύεται από παραμορφώσεις, ανάλογα με την καταπόνησή τους, όπως κάψιμο, διάτρηση, κ.τ.λ.

Από τα εκατομμύρια χιλιόμετρα των εναέριων γραμμών γίνεται φανερό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο μονωτικό της κατηγορίας αυτής. Αποτελεί επίσης τη μόνωση ενός πολύ μεγάλου αριθμού ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, όπως : διακόπτες μέσης τάσης (αποξεύκτες, γειωτές, διακόπτες φορτίου και ασφαλειοαποξεύκτες), πίνακες μέσης τάσης, αυτόματοι διακόπτες του δικτύου μεταφοράς της ενέργειας κ.λ.π. Όμως, συγκριτικά με άλλα μονωτικά υλικά, έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά, πολύ κοντά στη μονάδα, και κατά συνέπεια απαιτούνται μεγάλα διάκενα αέρος για να μην συμβούν φαινόμενα ιονισμού. Ωστόσο, τα τελευταία τριάντα χρόνια έχει γίνει αρκετή έρευνα με σκοπό την χρησιμοποίηση άλλων μονωτικών με καλύτερα χαρακτηριστικά από εκείνα του ατμοσφαιρικού αέρα (π.χ SF₆).

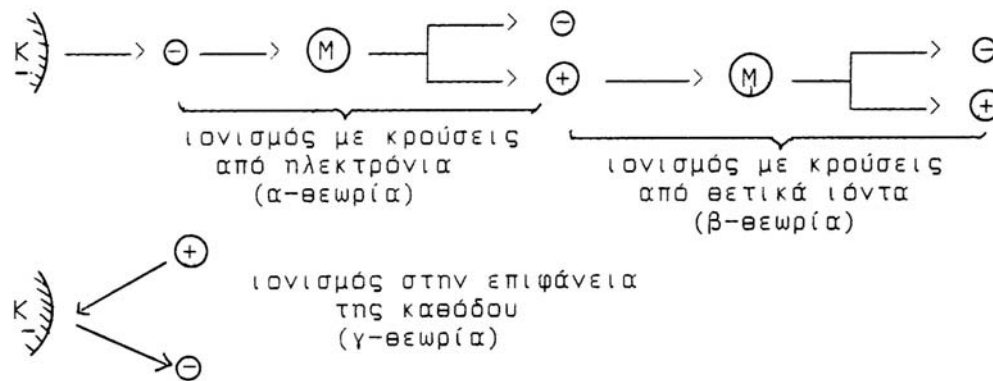
Η διηλεκτρική αντοχή ενός αερίου είναι συνάρτηση της πυκνότητάς του. Το γεγονός αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα διακοπών ισχύος, τα οποία χρησιμοποιούν αέριο υψηλής πυκνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η μείωση των ελεύθερων αποστάσεων μόνωσης, καθώς επίσης η σβέση του τόξου. Ένα τέτοιο σπουδαίο αέριο μονωτικό είναι το εξαφθοριούχο θείο(SF₆), που χρησιμοποιείται κυρίως σε διακόπτες και πίνακες υψηλής τάσης ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό. Στην ατμοσφαιρική πίεση, η διηλεκτρική αντοχή του SF₆ είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Τέλος το αέριο αυτό είναι εξαιρετικό υλικό για τη σβέση τόξων, γιατί αφ' ενός διευκολύνει τη διακοπή τους και αφ' ετέρου δεν επιτρέπει την επαναδημιουργία τους.

Άλλα αέρια μονωτικά υλικά είναι το άζωτο, τα ευγενή αέρια, με τάση διάσπασης πολύ μικρότερη της αντίστοιχης του αέρα, καθώς και ο εξαφθοριούχος άνθρακας (C₂F₆). Ο τελευταίος είναι αέριο μη εύφλεκτο, αντιεκρηκτικό και μη τοξικό.

Επιπλέον, επειδή τα αέρια δεν προσφέρουν μηχανική υποστήριξη χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με κάποια στερεά μονωτικά (μονωτήρες στήριξης). Η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και στερεού μονωτικού θα πρέπει να εξεταστεί με ιδιαίτερη προσοχή κατά την ηλεκτρική σχεδίαση μιας διάταξης, δεδομένου ότι οι αδυναμίες αυτής της περιοχής ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία της διάταξης με πιθανά αποτελέσματα τις μερικές εκκενώσεις, την υπερπήδηση ή και τη διάσπαση των μονωτικών. Όμως, ακόμη και όταν έχουν χρησιμοποιηθεί οι καλύτερες αρχές σχεδίασης, η διάσπαση μπορεί να συμβεί κάτω από αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η ρύπανση, σε συνδυασμό με την υγρασία.

2.1.1 Η διάσπαση των αερίων μονωτικών

Η διάσπαση των αερίων για μικρά διάκενα ερμηνεύεται από τη θεωρία Thowsend και τον νόμο του Paschen. Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τη θεωρία Thowsend δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα Α2.1.1-1: Ένα μακροσκοπικό μοντέλο για τις περιπτώσεις ιονισμού με κρούσεις κατά τη θεωρία Thowsend.

K : κάθοδος
 - : ηλεκτρόνιο
 + : θετικό ιόν
 M : μόριο

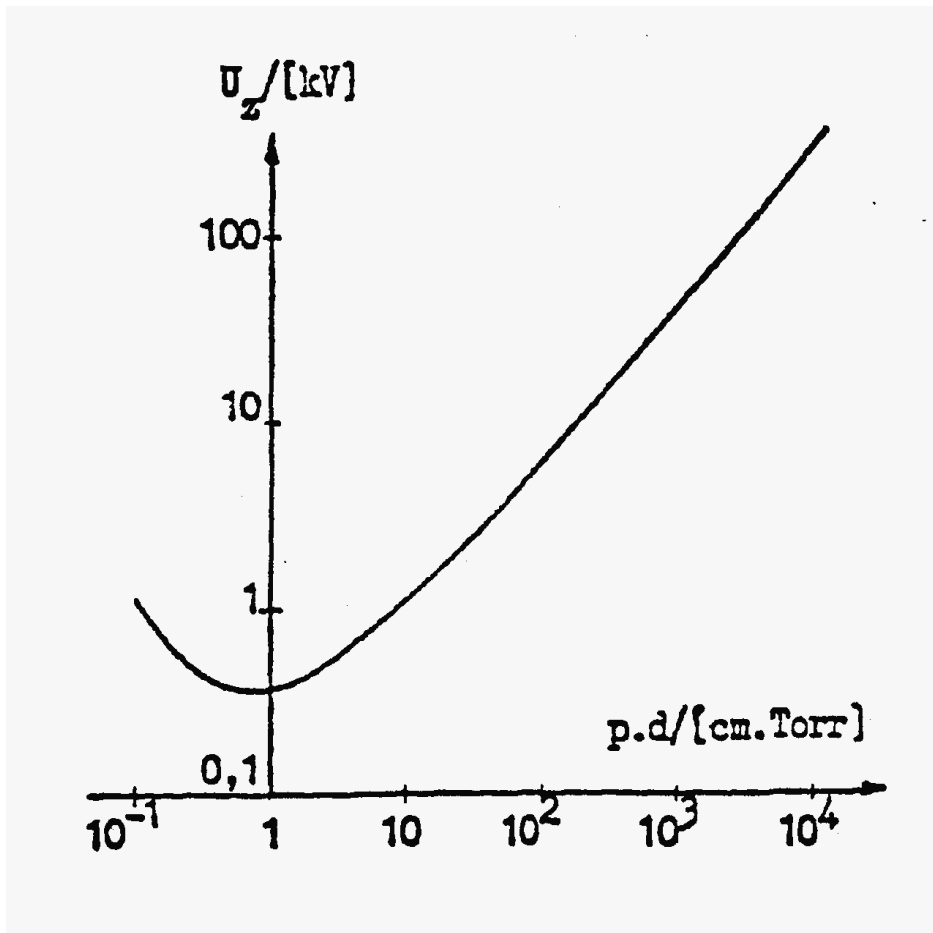
Σύμφωνα με αυτό, η δημιουργία των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται σε τρεις δυνατότητες ιονισμού:

- Ιονισμός με κρούσεις από ηλεκτρόνια.
- Ιονισμός με κρούσεις από θετικά ιόντα.
- Ιονισμός στην επιφάνεια της καθόδου.

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

$$U_z = f(p \cdot d) \quad (\text{A2.1.1})$$

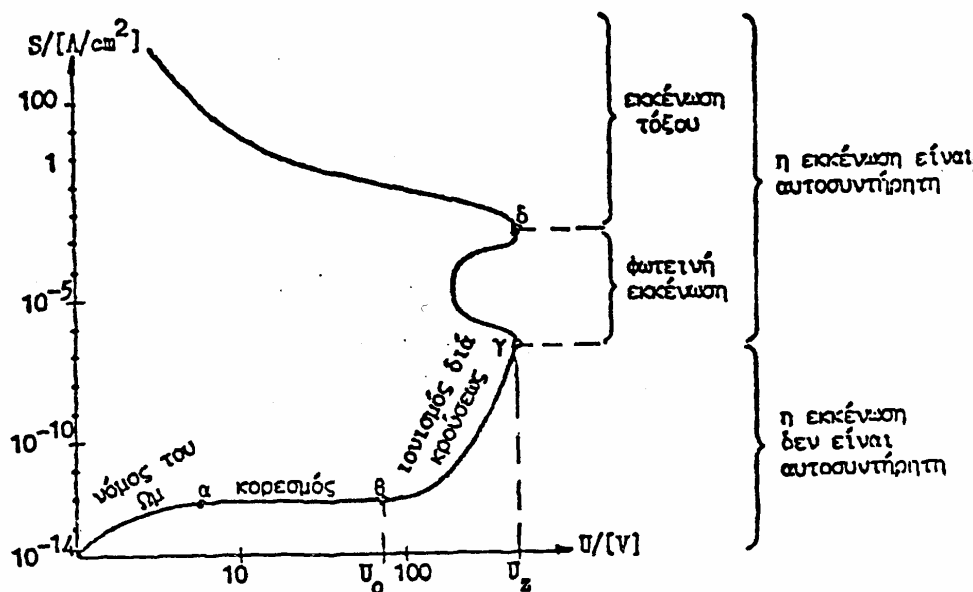
όπου p είναι η πίεση του αερίου και d η απόσταση των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης για τον αέρα σε ομογενές πεδίο δίνεται στο σχήμα Α2.1.1-2.



Σχήμα A2.1.1-2 : $U_z = f(p \cdot d)$ για τον αέρα σε κανονική θερμοκρασία

Από τις μετρήσεις που έχουν γίνει για την ερμηνεία των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και μετά τη διάσπαση των αέριων 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 A2.1.1-3 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 οχετών. Στην περίπτωση αυτή δεν ισχύει ο νόμος του Paschen. Η θεωρία της διάσπασης με διαδοχικούς οχετούς 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 οχετών, ανάλογα με τη μορφή του πεδίου και την απόσταση των ηλεκτροδίων.



Σχήμα Α2.1.1-3 : Χαρακτηριστική «τάσης-πυκνότητας ροής» των αερίων, υπό κανονικές συνθήκες, κατά G. Oberdoffer.

U_0 : αρχική τάση
 U_z : τάση έναυσης
 S : πυκνότητας ροής

2.1.2 Τα μειονεκτήματα του συνδυασμού του αέρα με στερεά και 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.

Παράδειγμα : Ο συνδυασμός "χαρτί-μονωτικό λάδι" έχει δείξει στην πράξη ότι είναι μία πολύ καλή μόνωση γιατί, εκτός του ότι τα δύο παραπάνω μονωτικά έχουν την ίδια περίπου τιμή ϵ , εμποτίζει το λάδι το χαρτί και δεν επιτρέπει έτσι την ύπαρξη αέρα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποφυγής της ανεπιθύμητης συνεργασίας των αερίων μονωτικών με τα στερεά και υγρά μονωτικά είναι η πλήρωση του δοχείου των μετασχηματιστών υψηλής τάσης με μονωτικό λάδι υπό συνθήκες κενού.

2.2 Υγρά μονωτικά

Τα υγρά μονωτικά υλικά έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από ότι τα αέρια σε ατμοσφαιρική πίεση. Για παράδειγμα η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 21kV/cm και η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου μετασχηματιστών είναι 60-

200kV/cm. Η σημασία τους στις πρακτικές εφαρμογές είναι μεγάλη γιατί έχουν τα παρακάτω γνωρίσματα:

- Μεγάλο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, στις επαφές διακοπών και στους σιδηροπυρήνες των μετασχηματιστών.
- Ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη του αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των στερεών μονωτικών. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η πλήρωση του χώρου, που καταλαμβάνει το υγρό μονωτικό, γίνεται υπό συνθήκες κενού σε ορισμένη θερμοκρασία. Τυπικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής είναι η πλήρωση των δοχείων των μετασχηματιστών υψηλών τάσεων με λάδι.
- Ο συνδυασμός, ειδικότερα χαρτί-λάδι έχει μεγάλη εφαρμογή, λόγω της περίπου ίδιας σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

Το κυρίως χρησιμοποιούμενο υγρό μονωτικό, σε μετασχηματιστές, καλώδια, διακόπτες και πυκνωτές, είναι το μονωτικό λάδι. Παράγεται σαν κλάσμα της απόσταξης του πετρελαίου και η χημική του σύσταση διαφέρει με την προέλευση του πετρελαίου.

Στα μονωτικά υγρά ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες οι οποίοι έχουν υποστεί χλωρίωση (το χλώριο έχει αντικαταστήσει μεμονωμένα άτομα υδρογόνου), όπως : το Askarel, το pyranol, το Nerdin κ.λ.π. Τα μονωτικά αυτά είναι άκαυστα και έχουν περίπου διπλάσια έως τριπλάσια διηλεκτρική σταθερά ως προς το μονωτικό έλαιο. Δεν χρησιμοποιούνται πλέον, γιατί περιέχουν τοξικά συστατικά, που μετατρέπονται βιολογικά στη φύση σε επικίνδυνες ουσίες.

Μία άλλη κατηγορία συνθετικών μονωτικών υγρών είναι υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση. Η διηλεκτρική σταθερά τους είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μονωτικού ελαίου. Δεν προκαλούν φθορές στα στερεά μονωτικά και είναι άκαυστα υλικά. Η εφαρμογή τους είναι πρακτικά ανύπαρκτη λόγω του μεγάλου κόστους τους.

2.3 Στερεά μονωτικά

Τα στερεά ηλεκτρομονωτικά υλικά εξαιτίας της σταθερότητας της μοριακής τους δομής δεν έχουν τη δυνατότητα να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση ύστερα από μία διάσπαση. Η ικανότητα δημιουργίας ιόντων είναι κατά πολύ μικρότερη και η διάτρηση έχει σαν αποτέλεσμα κάποια μόνιμη βλάβη σ' αυτά (κάψιμο, τήξη, μηχανικές κακώσεις, κ.λ.π.). Επίσης, τα φαινόμενα που εκδηλώνονται προ της διάσπασης των στερεών μονωτικών, καθώς και εκείνα κατά την επιφανειακή διάσπαση ή την υπερπήδηση, προκαλούν συνήθως μόνιμες βλάβες σε βάρος της διηλεκτρικής αντοχής των στερεών διηλεκτρικών. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα των στερεών μονωτικών, να μην επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, αλλά να καταστρέφονται κατά τη διάσπαση ή να αποκτούν συνήθως μόνιμες βλάβες (λόγω επιφανειακής διάσπασης, υπερπήδησης και μερικών εκκενώσεων) είναι η βασική δυσκολία για τη μελέτη του μηχανισμού της γήρανσης, της διάσπασής τους.

Τα στερεά μονωτικά χρησιμεύουν στις μονώσεις ηλεκτρικών μηχανών, σε καλώδια, για την κατασκευή μονωτήρων κάθε είδους (όπως μονωτήρες εναέριων γραμμών, διακοπών κ.λ.π.). Επίσης, χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά υλικά στην κατασκευή των πυκνωτών. Τέλος, πολλές φορές συνδυάζονται με υγρά μονωτικά, όπως ο συνδυασμός χαρτί-λάδι. Ο συνδυασμός στερεού με υγρό μονωτικό αποσκοπεί κυρίως στον εμποτισμό του στερεού μονωτικού με το υγρό, ώστε να αποφεύγονται οι θύλακες αέρα.

2.3.1 Φαινόμενα προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών υλικών

Από τις διάφορες έρευνες , που έχουν γίνει, για τα φαινόμενα γήρανσης και διάσπασης των στερεών μονωτικών υλικών, μπορεί κανείς να ομαδοποιήσει τις μεθόδους που εφαρμόζονται σε δύο βασικές θεωρίες :

- 1) Τη μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.
- 2) Τη κβαντομηχανική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση των στερεών μονωτικών.

Σύμφωνα με τη μακροσκοπική θεωρία, τα αποτελέσματα των ερευνών βασίζονται (ή αποσκοπούν) σε κάποιο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο πηγάζει συνήθως από το συνδυασμό των ηλεκτρικών μετρήσεων με οπτικές παρατηρήσεις για την εκδήλωση ακουστικών και φωτεινών φαινομένων, καθώς και αλλαγές στην επιφάνεια του υλικού.

Στην κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η ενέργεια των ελεύθερων φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια), κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια. Πρόκειται δηλαδή για μία συσχέτιση των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση, με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας , που εκπέμπεται.

2.3.2 Μακροσκοπική θεωρία των φαινομένων προ και κατά τη διάσπαση 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, 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 :

1. Οι απώλειες Joule.
2. Οι δυνάμεις Coulomb.
3. Οι μερικές εκκενώσεις.
4. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

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

1. Η θερμική διάτρηση.
2. Η ηλεκτρική διάτρηση (που διακρίνεται στη δένδροειδή και στην ηλεκτρομηχανική).
3. Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση).
4. Η θερμοχημική διάτρηση.

Στην πράξη βέβαια οι παράγοντες αυτοί συνδυάζονται και υποβοηθούνται από διάφορες ειδικές συνθήκες , που επικρατούν (μορφή ηλεκτρικού πεδίου, περιβάλλον μέσο,

κ.λ.π.), έτσι ώστε η αλλαγή της μοριακής δομής να είναι κάποιο από κοινού αποτέλεσμα τους.

Σε οποιαδήποτε όμως περίπτωση, κρίνεται σημαντικό να μπορούμε βλέποντας την όποια αλλοίωση στο μονωτικό υλικό, να εξάγουμε συμπεράσματα για τα αίτια της. Τότε μπορούμε να προβούμε σε κατάλληλα μέτρα για αποφυγή παραπέρα αλλοίωσης ή ακόμα πιο σημαντικό να προλάβουμε την έναρξη του δυσμενούς αυτού φαινομένου. Έτσι, αν παρατηρήσουμε πως το μονωτικό έχει λιώσει αντιλαμβανόμαστε πως έχει υποστεί θερμική καταπόνηση λόγω του φαινομένου Joule. Αν όμως αντιληφθούμε μηχανική καταπόνηση στο μονωτικό, τότε η αλλοίωση του μονωτικού οφείλεται σε δυνάμεις Coulomb, οπότε και θα πρέπει να λάβουμε και τα ανάλογα μέτρα. Περισσότερες λεπτομέρειες για κάθε μία από τις καταπονήσεις-διατρήσεις παρατίθενται στη συνέχεια.

2.3.2.1 Η θερμική διάτρηση

Η μορφή της διάτρησης αυτής συναντάται κυρίως σε χαμηλές τιμές της τάσης, όταν το στερεό μονωτικό καταπονείται θερμικά μόνο από τις απώλειες Joule. Η εικόνα που παρουσιάζει το θερμικά καταπονούμενο υλικό είναι συνήθως η απανθράκωση και η τήξη του, στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες .

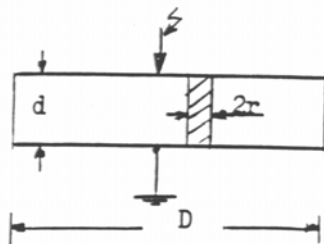
Ο σχετός διάτρησης δημιουργείται, όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποια θέση του υλικού έχει αποκτήσει την απαιτούμενη για τη διάτρηση οριακή τιμή σ_1 , οπότε έχουμε σύμφωνα με προηγούμενη σχέση (A1.4-1)

$$\sigma_1 = \sigma_0 e^{\beta\theta} \quad (A2.3.2.1-1)$$

Με την προϋπόθεση σταθερής διατομής (A) του σχετού διάτρησης (σχήμα A2.3.2.1-1) και ειδική αγωγιμότητα σ_1 , η θερμική ισχύς που παράγεται είναι :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} \quad (A2.3.2.1-2)$$

όπου U η ενδεικνύμενη τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.



Σχήμα A2.3.2.1-1: Απλοποιημένη παράσταση του σχετού διάτρησης λόγω των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού .

D : διάμετρος δοκιμίου

d : πάχος του μονωτικού

2r: διάμετρος του σχετού διάτρησης.

Αν P_a είναι η τιμή της απαγόμενης θερμικής ισχύος, C_0 η θερμοχωρητικότητα και t ο χρόνος, ισχύει γενικά ότι:

$$P = P_a + C_0 (d\theta / dt) \quad (A2.3.2.1-3)$$

Η απαγόμενη θερμική ισχύς είναι (για $d \gg r$) :

$$P_a = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (\text{A2.3.2.1-4})$$

όπου κ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Στην περίπτωση όμως της θερμικής διάτρησης ισχύει, ότι η θερμική ισχύς που παράγεται είναι ίση με εκείνη που απάγεται, δηλαδή ότι:

$$\frac{U^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \cdot \theta \quad (\text{A2.3.2.1-5})$$

Η παραπάνω σχέση αποτελείται από δύο συναρτήσεις της θερμοκρασίας ($P=f(\theta)$ και $P_a=f(\theta)$). Για το λόγο αυτό, η οριακή τιμή της τάσης για τη θερμική διάτρηση (U_θ) δίνεται όταν εφάπτονται οι χαρακτηριστικές τους. Έτσι, από τη διαφορίση ως προς θ , τόσο του αριστερού όσο και του δεξιού τμήματος της σχέσης (A2.3.2.1-5), έχουμε:

$$\frac{\beta U_\theta^2 \sigma_0 e^{\beta\theta} A}{d} = 2\pi \cdot r \cdot d \cdot \kappa \quad (\text{A2.3.2.1-6})$$

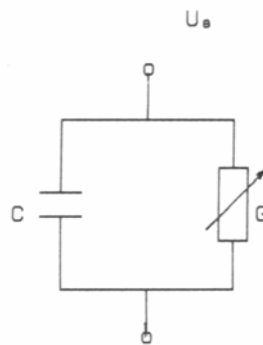
Από τις σχέσεις (A2.3.2.1-5) και (A2.3.2.1-6) φαίνεται ότι:

$$\beta \cdot \theta = 1 \quad (\text{A2.3.2.1-7})$$

και
$$U_\theta = d \sqrt{\frac{2\kappa}{e\beta\sigma_0 r}} \quad (\text{A2.3.2.1-8})$$

Την αύξηση των απωλειών Joule του στερεού μονωτικού κατά την εφαρμογή της εναλλασσόμενης τάσης με ενεργό τιμή U_θ μπορεί να παραστήσει κανείς με ένα ισοδύναμο κύκλωμα, κατά το σχήμα A2.3.2.1-2, όπου η αύξηση των απωλειών Joule συμβολίζεται με μία μεταβλητή αγωγιμότητα G .

Η διάτρηση στην τιμή U_θ συμβαίνει, όταν η αγωγιμότητα αποκτήσει (λόγω αύξησης της ειδικής αγωγιμότητας από σ_0 στην τιμή σ_1), μία οριστική τιμή G_{\max} .



Σχήμα A2.3.2.1-2 : Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού λόγω αύξησης των απωλειών Joule.

$$G = G_0 \dots G_{\max}.$$

G_0 : αγωγιμότητα του ιδανικού μονωτή.

G_{\max} : αγωγιμότητα για τη διάτρηση.

C : χωρητικότητα του ιδανικού μονωτή.

2.3.2.2 Η ηλεκτρική διάτρηση

Όταν η ενεργός τιμή της τάσης, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη για τη θερμική διάτρηση, τότε η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και επομένως μπορεί να αυξηθεί η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μέσα στο μονωτικό υλικό.

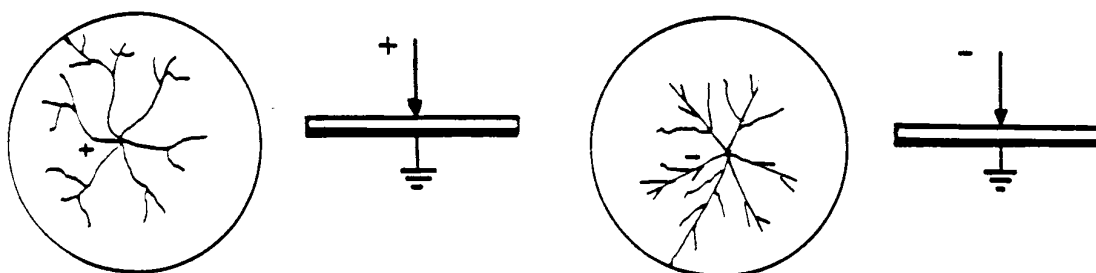
Από μία τιμή της τάσης και μετά η διάτρηση του υλικού αποδίδεται κυρίως στις δυνάμεις Coulomb. Θεωρείται, ότι η διάτρηση οφείλεται σε :

- 1) Αυτοσυντηρούμενο ιονισμό.
- 2) Μηχανική τάνση του υλικού (διαχωρισμό του σε αρνητικούς και θετικούς φορείς, υπό την επίδραση των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου).
- 3) Συνδυασμό των δύο παραπάνω περιπτώσεων.

Η μορφή της διάτρησης αυτής ονομάζεται ηλεκτρική και διακρίνεται ανάλογα με την εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό τόξο κατά τη διάτρηση. Έτσι υπάρχει:

- Η δενδροειδής (θύσανοι κάθετοι προς το ηλεκτρικό πεδίο) μορφή.
- Η μορφή οχετού κατά τη διεύθυνση του πεδίου.

Η **δενδροειδής διάτρηση** είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρότερης χρονικής διάρκειας από εκείνο της θερμικής διάτρησης, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της έντασης, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η εικόνα του υλικού μετά τη διάτρηση σχετίζεται με θερμική καταπόνηση στα ίχνη του δενδρίτη. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μία διακλάδωση του δενδρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγώγιμη σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στο σχήμα A2.3.2.2-1 δίνεται ένα παράδειγμα για τη μορφή του δενδρίτη, ανάλογα με την πολικότητα της τάσης, για τη δυσμενέστερη περίπτωση των πρακτικών εφαρμογών (δηλαδή την περίπτωση ηλεκτροδίων τύπου ακίδας-πλάκας).



Σχήμα A2.3.2.2-1 : Επεξήγηση της μορφής του δενδρίτη.

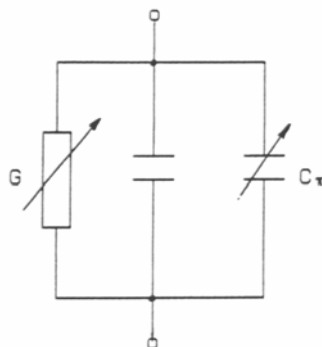
Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης έχει, λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων κατά την κίνησή τους προς την ακίδα, αρκετές διακλαδώσεις, κατά κανόνα μη ευθύγραμμες. Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών

ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του.

Η διάτρηση υπό μορφή οχετού (ή ηλεκτρομηχανική διάτρηση) οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη τιμή της πεδιακής έντασης, από ότι κατά τη δενδροειδή διάτρηση. Στα πολυμερή υλικά διαχωρίζονται τα μόρια σε αρνητικούς και θετικούς φορείς. Η διάτρηση συμβαίνει κυρίως από τις δυνάμεις Coulomb, που εξασκούνται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η χρονική διάρκεια του φαινομένου είναι μερικά μs. Η εικόνα που παρουσιάζει το υλικό είναι κυρίως το αποτέλεσμα μιας ακαριαίας εξάσκησης δυνάμεων, στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα μεγάλη (μηχανική τάση υπό την επίδραση των δυνάμεων του πεδίου).

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις, έχει διαπιστωθεί, ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης $U_{k_{min}}$, που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων.

Μία ερμηνεία της ηλεκτρικής διάτρησης, μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να δοθεί ως ακολούθως :



Σχήμα A2.3.2.2-2: Ισοδύναμο κύκλωμα του στερεού μονωτικού κατά την ηλεκτρική διάτρηση.

C : ιδανική χωρητικότητα.

$C_{\pi}=0...C_{max}$: χωρητικότητα, που συμβολίζει την πόλωση του στερεού μονωτικού στη θέση θα συμβεί η διάτρηση.

$G=0...G_{max}$: αγωγιμότητα λόγω αύξησης των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στη θέση όπου θα συμβεί η διάτρηση.

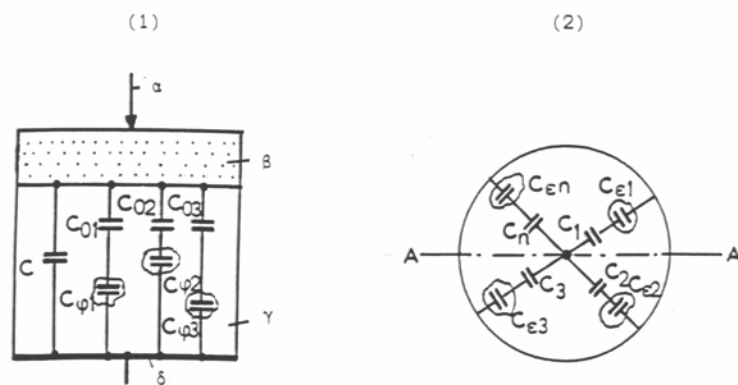
Όταν από την αύξηση των ηλεκτρικών φορέων, λόγω κάποιας ανομοιογένειας (δεν υπάρχουν πρακτικά ιδανικοί μονωτές), η ειδική αγωγιμότητα έχει αποκτήσει μία κρίσιμη για το υλικό τιμή σ_2 τότε η πόλωση του υλικού είναι αρκετή για να συμβεί η διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων και ηλεκτροδίων. Η πόλωση αυτή του υλικού στην περιοχή, όπου θα συμβεί η διάτρηση, μπορεί να παρασταθεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα A2.3.2.2-2), ως αύξηση της χωρητικότητας από την παράλληλη σύνδεση ενός μεταβλητού πυκνωτή C_{π} (που συμβολίζει την πόλωση) προς την ιδανική χωρητικότητα C . Όταν η αγωγιμότητα G και ο πυκνωτής C_{π} έχουν αποκτήσει μόλις

προ της διάτρησης τις τιμές G_{\max} και C_{\max} (που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ειδική αγωγιμότητα σ_2 , λόγω κάποιας ανομοιογένειας), τότε συμβαίνει η διάτρηση.

2.3.2.3 Η διάσπαση λόγω μερικών εκκενώσεων (ηλεκτροχημική διάσπαση ή γήρανση).

α) Γενικά περί μερικών εκκενώσεων

Η διάσπαση των στερεών μονωτικών έχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, την αφετηρία της στις μερικές εκκενώσεις στην επιφάνεια και στον όγκο τους. Οι μερικές εκκενώσεις εμφανίζονται σε φυσαλίδες αερίων ή γενικά θέσεις ανομοιογένειας μέσα στον όγκο του μονωτικού (εσωτερικές μερικές εκκενώσεις), καθώς και σε θέσεις ανομοιογένειας ή ξένες επικαθίσεις (ηλεκτρικές ακαθαρσίες) στην επιφάνειά του (εξωτερικές εκκενώσεις). Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής δίνεται στο σχήμα A2.3.2.3-1. Σύμφωνα με αυτό, οι επιφανειακές θέσεις διαταραχής έχουν παρασταθεί με τους πυκνωτές $C_{e1} \dots C_{en}$ και οι εσωτερικές με τους πυκνωτές $C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$. Οι πυκνωτές $C_1 \dots C_n$ και $C_{01} \dots C_{0n}$ παριστάνουν αντίστοιχα το υπόλοιπο υγιές τμήμα του μονωτικού (κάθε ένας από αυτούς δίνει την ολική χωρητικότητα δύο πυκνωτών, εκ των οποίων ο ένας είναι η χωρητικότητα μεταξύ ακίδας και της θέσης διαταραχής και ο άλλος η χωρητικότητα μεταξύ της πλάκας και της θέσης διαταραχής).



Σχήμα A2.3.2.3-1: Μία μακροσκοπική παράσταση των θέσεων διαταραχής σε στερεό μονωτικό εντός μονωτικού ελαίου

(1) Τομή A-A της διάταξης πειραματισμού :

α : ηλεκτρόδιο ακίδα.

β : επιφανειακό φιλμ του μονωτικού ελαίου και επιφάνεια του στερεού μονωτικού.

γ : στερεό μονωτικό.

δ : ηλεκτρόδιο πλάκα

(2) Κάτοψη της διάταξης πειραματισμού :

$C_1 \dots C_n$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος της επιφάνειας του στερεού μονωτικού και του επιφανειακού φιλμ ελαίου.

$C_{e1} \dots C_{en}$: πυκνωτές επιφανειακών (εξωτερικών) θέσεων διαταραχής

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

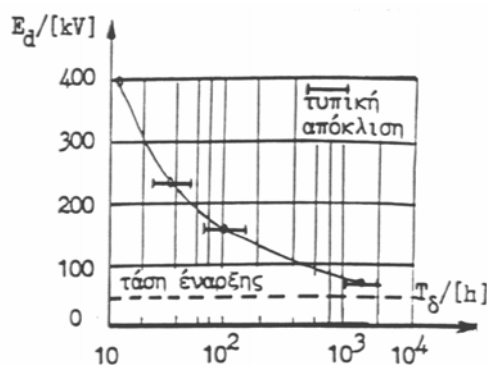
$C_{\phi 1} \dots C_{\phi n}$: πυκνωτές εσωτερικών θέσεων διαταραχής (κυρίως φυσαλίδες αερίων).

$C_{01} \dots C_{0n}$: πυκνωτές του "υγιούς" τμήματος του στερεού μονωτικού.

Από τη στιγμή της έναρξης των μερικών εκκενώσεων προκαλείται συνήθως σταδιακή αλλαγή της μοριακής δομής του στερεού μονωτικού, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε

περιορισμένο τμήμα του, όπου δηλαδή έτυχε οι θέσεις ανομοιογένειας να είναι περισσότερο αγώγιμες. Πρόκειται για ένα ηλεκτροχημικό φαινόμενο, που σε κάποιο απροσδιόριστο χρονικό διάστημα οδηγεί στη διάσπαση του στερεού μονωτικού.

Συγκριτικά με τις άλλες μορφές διάσπασης, η ηλεκτροχημική διάσπαση προκαλεί βαθμιαία μείωση της ηλεκτρικής αντοχής, ανάλογα με το ρυθμό αύξησης της χημικής μεταβολής και είναι συνήθως μακροπρόθεσμη, γι' αυτό ονομάζεται και γήρανση του μονωτικού υλικού. Στο σχήμα A2.3.2.3-2 δίνεται ένα παράδειγμα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, λόγω γήρανσης του υλικού από τη μεγαλύτερη συμμετοχή των θέσεων διαταραχής.



Σχήμα A2.3.2.3-2 : Μείωση της διηλεκτρικής αντοχής στο νάιλον πάχους 0,125mm, λόγω μερικών εκκενώσεων.

Αριθμός δοκιμών : 10 ανά σημείο μέτρησης.

T_d : χρόνος διάσπασης.

β) Η τεχνητή γήρανση

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης (εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχή), διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης (ανάλογα με τη μορφή της) εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις.

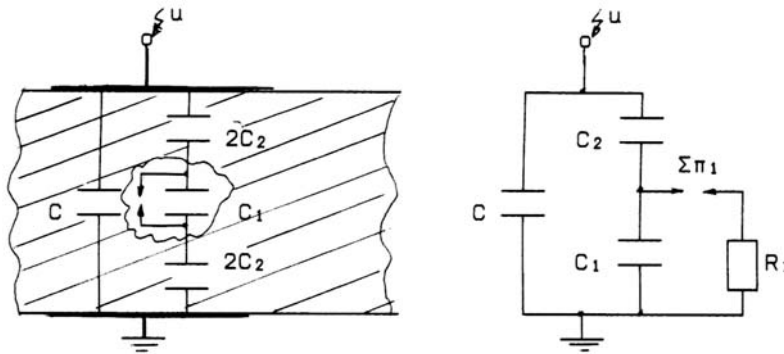
Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται τεχνητή γήρανση. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση, που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο), δίνει όμως τη δυνατότητα ανίχνευσης των παραγόντων διάσπασης, που τελικά δεν μπορεί να είναι διαφορετικοί από τους πραγματικούς.

γ) Τα ισοδύναμα κυκλώματα των μερικών εκκενώσεων

Όπως είναι γνωστό, με τη γέφυρα Schering μετρά κανείς το σύνολο των απωλειών ενός μονωτικού υλικού ή μιας διάταξης υψηλής τάσης, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, πόλωσης και εκείνες λόγω εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων. Όταν άρχισε να γίνεται αντιληπτό το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών εμφανίστηκε η πρώτη μέθοδος ανίχνευσης των μερικών εκκενώσεων. Πρόκειται για τη μέθοδο Callender, η οποία είναι παραλλαγή της γέφυρας Schering και με την οποία κατορθώθηκε η εξουδετέρωση των

παράσιτων χωρητικότητων του κυκλώματος μέτρησης κατά το διαχωρισμό των απωλειών αγωγιμότητας και πόλωσης από εκείνες λόγω μερικών εκκενώσεων.

Η ανάγκη για τη φυσική εξήγηση και τη μαθηματική ανάλυση του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων μέσα στον όγκο του στερεού μονωτικού, οδήγησε τους Gemant και Philipoff στο ισοδύναμο κύκλωμα του (σχήμα A2.3.2.3-3), γιατί διατυπώθηκε η άποψη ότι οι εσωτερικές μερικές εκκενώσεις οφείλονται σε φυσαλίδες αερίου.



Σχήμα A2.3.2.3-3: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του (κατά Gemant και Philipoff).

α : σχηματική παράσταση.

β : ισοδύναμο κύκλωμα.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης.

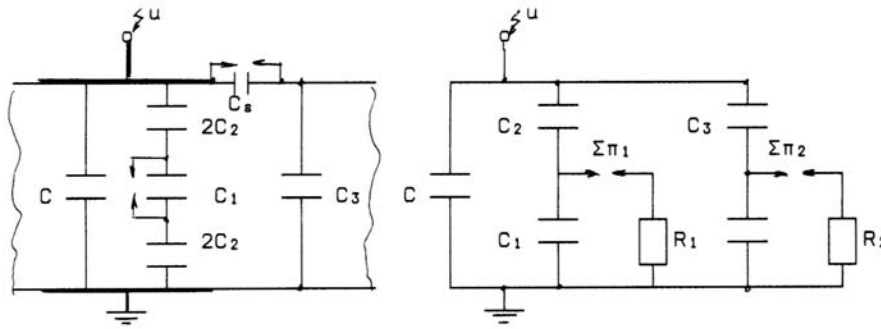
C_1 : χωρητικότητα της φυσαλίδας.

C_2 : χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού.

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

Στο επόμενο σχήμα A2.3.2.3-4 έχει συμπληρωθεί το μακροσκοπικό αυτό μοντέλο και για τις εξωτερικές μερικές εκκενώσεις, που οφείλονται σε θέσεις διαταραχής στην επιφάνεια του υλικού. Η ύπαρξη των εσωτερικών και εξωτερικών εκκενώσεων παριστάνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα με την αύξηση της χωρητικότητας, η οποία επιτυγχάνεται αντίστοιχα κατά τη διάσπαση της φυσαλίδας (C_1) και του πυκνωτή εξωτερικών μερικών εκκενώσεων (C_e). Με τον τρόπο δηλαδή αυτό γίνεται παράλληλη σύνδεση του υπόλοιπου "υγιούς τμήματος" του μονωτικού (C_2 και C_3 αντίστοιχα) προς την ιδανική χωρητικότητα C. Οι σπινθήρες $\Sigma\pi_1$ και $\Sigma\pi_2$ στα ισοδύναμα κυκλώματα διασπώνται όταν διασπάται η αντίστοιχη θέση διαταραχής. Έτσι, μέσω της αντίστασης του τόξου που σχηματίζεται (R_1, R_2) γίνεται η εκφόρτιση του αντίστοιχου πυκνωτή διαταραχής (C_1, C_e).

Η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων κατά το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff σημαίνει αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της διάταξης, στο ρυθμό που διασπώνται χρονικά οι διάφορες θέσεις διαταραχής. Μπορούμε δηλαδή να υποθέσουμε, ότι οι θέσεις ανομοιογένειας επενεργούν ως ένα είδος διακόπτη. Με βάση την υπόθεση αυτή συναντά κανείς συχνά στη βιβλιογραφία το ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά το σχήμα A2.3.2.3-5.



Σχήμα A2.3.2.3-4: Σχηματική παράσταση και ισοδύναμο κύκλωμα ενός στερεού μονωτικού με φυσαλίδα αερίου στον όγκο του και με επιφανειακή θέση διαταραχής.

α : σχηματική παράσταση

β : ισοδύναμο κύκλωμα

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

C₁: χωρητικότητα της φυσαλίδας

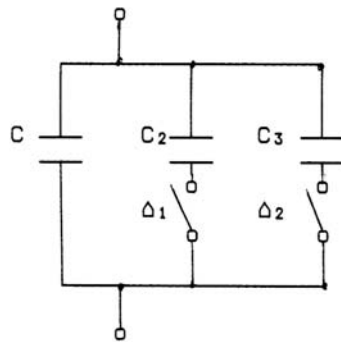
C_ε: χωρητικότητα της επιφανειακής θέσης διαταραχής

C₂: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του στερεού μονωτικού

C₃: χωρητικότητα του υπόλοιπου υγιούς τμήματος του επιφανειακού φιλμ

R₁: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₁

R₂: αντίσταση του τόξου του σπινθηριστή Σπ₂



Σχήμα A2.3.2.3-5: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων (παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος των Gemant και Philipoff).

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

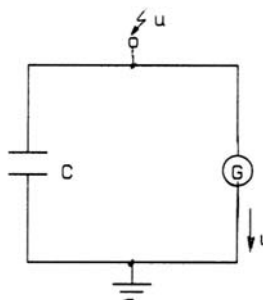
C₂: χωρητικότητα του υγιούς στον όγκο του μονωτικού

C₃: χωρητικότητα του υγιούς στην επιφάνεια του μονωτικού

Δ₁ και Δ₂ : διακόπτες, που όταν κλείνουν συμβολίζουν την διάσπαση αντίστοιχα των εσωτερικών και των εξωτερικών μερικών εκκενώσεων.

Εκτός από το ισοδύναμο κύκλωμα των Gemant και Philipoff, έχουν προταθεί για τη μελέτη του φαινομένου της γήρανσης των στερεών μονωτικών και άλλα μακροσκοπικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, στα οποία λαμβάνονται υπ' όψη η αύξηση της αγωγιμότητας στις πλευρές της φυσαλίδας, οι απώλειες ενέργειας σε αυτές, η αγωγιμότητα του υλικού κ.λ.π. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Widmann δίνει επίσης μία ικανοποιητική μακροσκοπική ερμηνεία των μερικών εκκενώσεων (σχήμα A2.3.2.3-6). Σύμφωνα με αυτό, οι θέσεις διαταραχής αποδίδονται ως μία γεννήτρια μερικών εκκενώσεων G. Έτσι, όταν

διεγείρεται η γεννήτρια G συμβαίνει αύξηση του δυναμικού στους ακροδέκτες της διάταξης.



Σχήμα 2.3.2.3-6: Ισοδύναμο κύκλωμα των μερικών εκκενώσεων κατά Widmann.

C : ιδανική χωρητικότητα της διάταξης

G : γεννήτρια μερικών εκκενώσεων

2.3.2.4 Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη (σχέση A1.5-3 και σχέση A1.5-4). Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη.

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος του στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης.

Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής. Η τάση αυτή αποτελεί το κριτήριο για το τεχνικοοικονομικό πάχος των στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κ.λ.π.). Η τιμή της για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση 50Hz, είναι της τάξης του 1MV.

Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης απ' ότι σε κανονική θερμοκρασία (20°C), με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός δια κρούσεως σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου απ' ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C).

Στην διπλωματική αυτή εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμοχημική διάσπαση, ακριβώς γιατί θεωρείται πως μέσα στο εργαστήριο επικρατεί σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

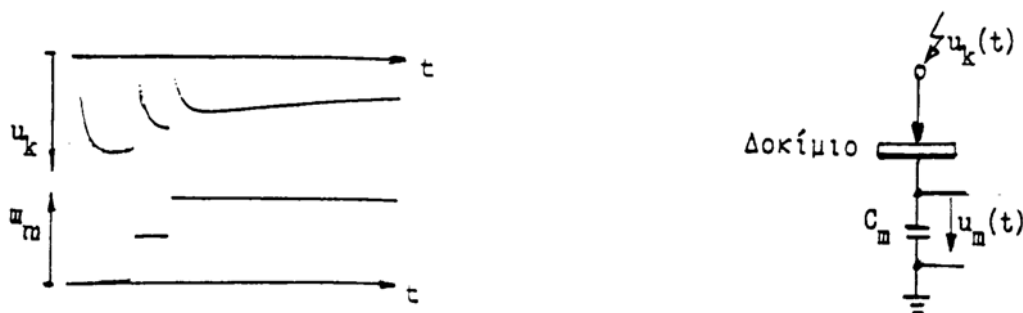
2.3.2.5 Η επιφανειακή διάσπαση και η υπερπήδηση

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).

Από πειράματα είναι γνωστό, ότι στα φαινόμενα παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (κυρίως ηλεκτρόνια) στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών συμμετέχει και η ίδια η επιφάνεια σε βάθος μέχρι 30\AA . 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.

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.



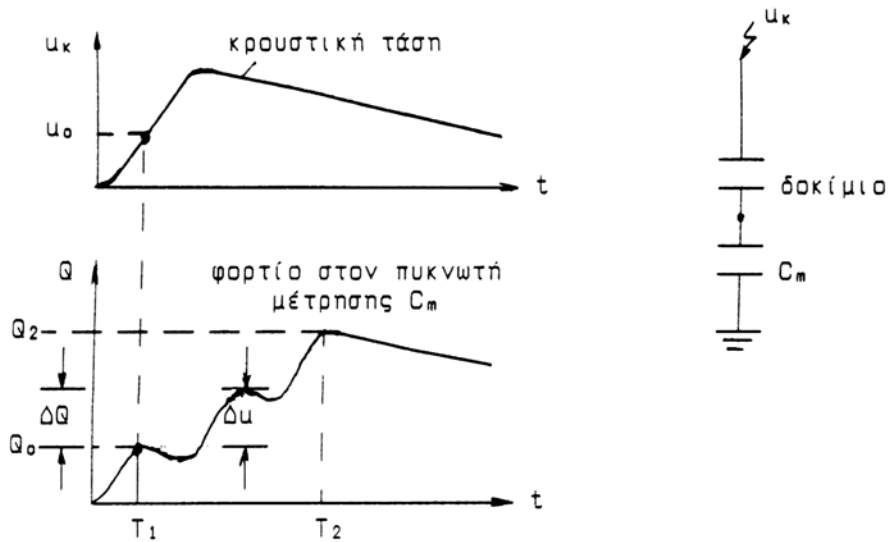
Σχήμα A2.3.2.5 : Τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 2mm) εντός μονωτικού ελαίου, υπό κρουστική τάση 10/200 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα –πλάκα.

C_m : 1835 nF

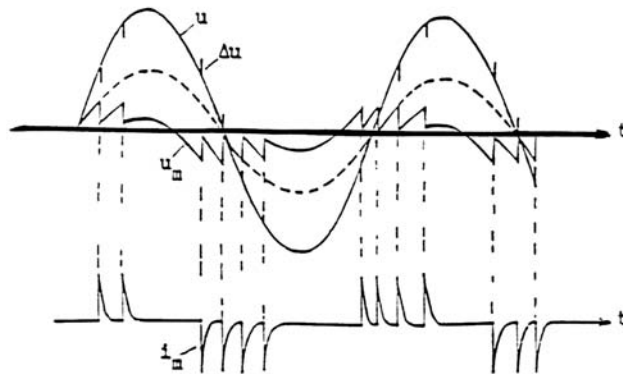
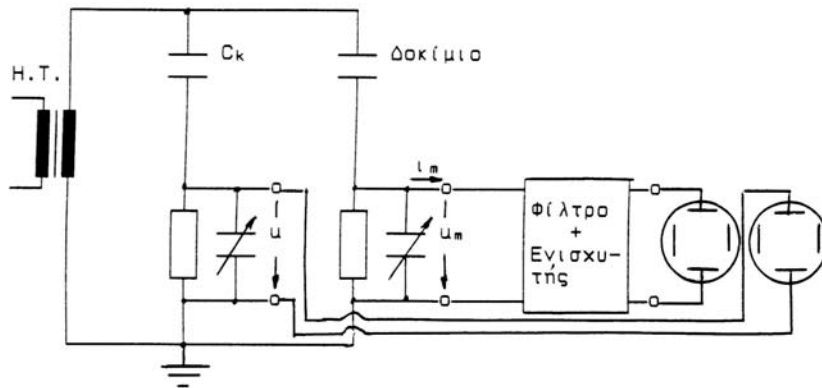
U_k : 70kV

2.3.2.6 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 A2.3.2.6-1 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 A2.3.2.6-2). Στο σχήμα π.χ. A2.3.2.6-1 και A2.3.2.6-3 δίνονται δύο παραδείγματα καθορισμού εννοιών, για παλμογραφήματα των μερικών εκκενώσεων.



Σχήμα Α2.3.2.6-1: 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).
 Δu : Άλμα δυναμικού.
 ΔQ : Αύξηση φορτίου.



Σχήμα Α2.3.2.6-2 : 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.

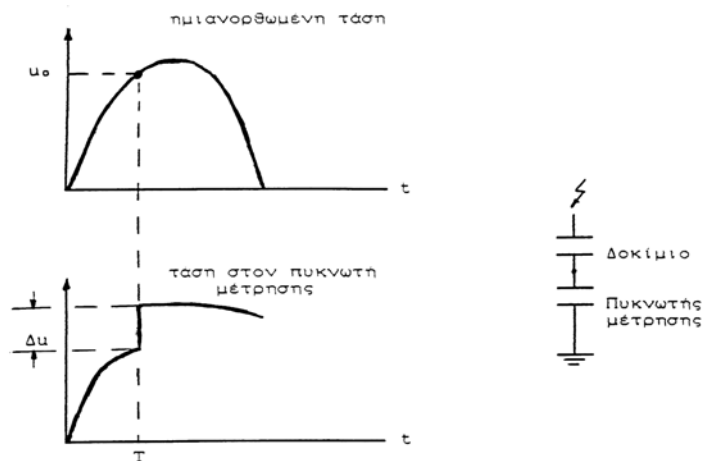
C_k : Πυκνωτής υψηλής τάσης.

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

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

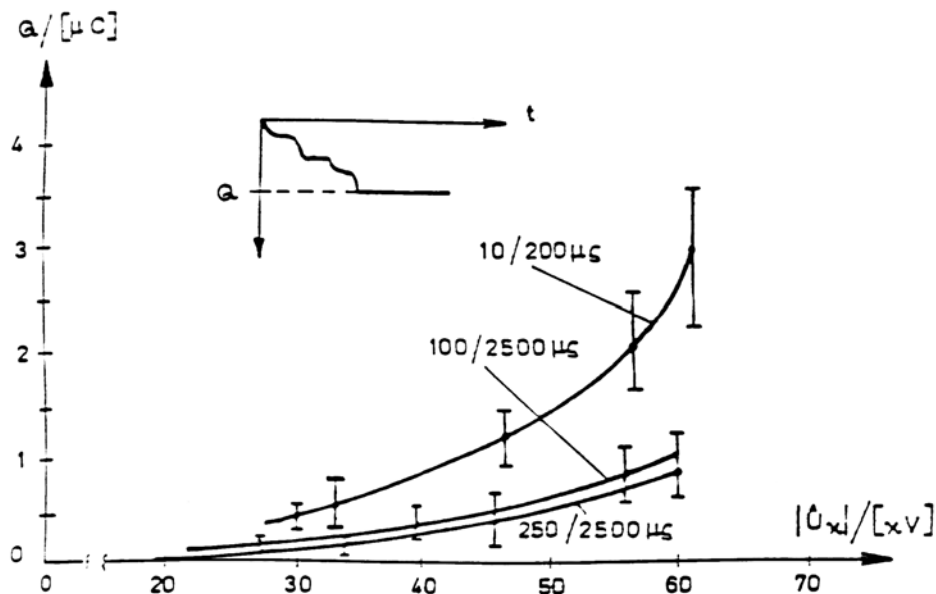
i_m : Στιγμιαία τιμή του ρεύματος λόγω μερικών εκκενώσεων.

ΔU : Μεταβολές στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω μερικών εκκενώσεων.

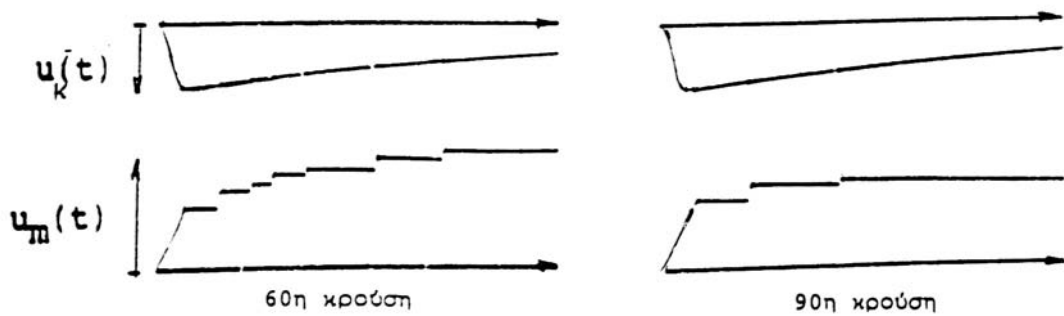


Σχήμα A2.3.2.6-3 : Παράδειγμα καθορισμού ορισμένων εννοιών για την στατιστική μελέτη των μερικών εκκενώσεων σε στερεά μονωτικά, των πρακτικών εφαρμογών, υπό ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.
 T_1 : Χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων.
 u_0 : Τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων (στιγμιαία τιμή).
 Δu : άλμα δυναμικού.

Με βάση τις παραπάνω έννοιες έχουν σχεδιαστεί διάφορες χαρακτηριστικές, όπως : η χαρακτηριστική $Q=f(|\hat{U}_κ|)$, η χαρακτηριστική $u_0=f(|\hat{U}_κ|)$, ο χρόνος έναρξης των μερικών εκκενώσεων σε συνάρτηση με την μέγιστη τιμή της τάσης, κ.λ.π. Οι τιμές των χαρακτηριστικών αυτών βασίζονται συνήθως σε μετρήσεις επί ενός αρκετά μεγάλου αριθμού δοκιμών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η χαρακτηριστική $Q=f(\hat{U}_κ)$, η οποία φαίνεται ότι είναι εκθετικής μορφής (σχήμα A2.3.2.6-4), με αποκλίσεις από αυτήν, που έχουν αποδοθεί στη στατιστικότητα των ανομοιογενειών των στερεών μονωτικών, καθώς και στην εκδήλωση και άλλων παραγόντων μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής, όπως π.χ. των δυνάμεων Coulomb κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών με κρουστικές τάσεις της μορφής $1,2/50\mu s$ ή $10/200\mu s$, όπου παρατηρούνται μηχανικές βλάβες (θραύσματα) στο υλικό σε βάρος της εκδήλωσης των μερικών εκκενώσεων. Στο σχήμα A2.3.2.6-5 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα τεχνητής γήρανσης, από όπου φαίνεται η σημαντική μείωση των αλμάτων δυναμικού κατά την 90° κρούση, ως προς την 60° . 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.



Σχήμα 2.3.2.6-4 : Χαρακτηριστική $Q_2=f(\hat{U}_\kappa)$ 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 2.3.2.6-5 : Άλματα δυναμικού κατά την 60^η και την 90^η κρούση στο pertinax (πάχους 2mm). Μορφή τάσης : 1,2/50μs ($\hat{U}_\kappa=99,7kV$). Περιβάλλον μέσο : μονωτικό λάδι. Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα. C_m : 210nF.

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.

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.

Στον πίνακα A2.3.2.6 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, που προαναφέρθηκε. 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.

Μορφή τάσης σε μs	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 1,2/50μs)	ΝΑΙ (αλλά μικρότερη από εκείνη κατά την καταπόνηση με κρουστική τάση 1,2/50 μs)	στην ουρά και στο μέτωπο	εξωτερικές και εσωτερικές μερικές εκκενώσεις
250/2500	ΟΧΙ	ΟΧΙ	στο μέτωπο	εσωτερικές μερικές εκκενώσεις

Πίνακας 2.3.2.6 : Αποτελέσματα της συσχέτισης μεταξύ εμφάνισης των αλμάτων δυναμικού και της εικόνας των επιφανειακών διαταραχών.

2.3.3 Η κβαντομηχανική θεωρία της γήρανσης και της διάσπασης των στερεών μονωτικών

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, 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,
- **το μη ορατό φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**, που εκπέμπεται κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνση των παραγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια.

Τα δύο τελευταία φαινόμενα συσχετίζονται με τις καταπονήσεις και τα φωτεινά φαινόμενα, που παρατηρούνται στα στερεά μονωτικά δίνοντας έτσι περισσότερες πληροφορίες για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους.

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,
- 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),
- 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.

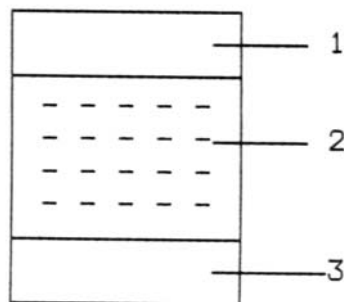
Στη κβαντομηχανική θεωρία ενδιαφέρει κυρίως η **ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων** (κυρίως ηλεκτρόνια). Η τιμή της ενέργειας αυτής, πάνω από την ενέργεια Fermi των ηλεκτροδίων διευκολύνει στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον μηχανισμό παραγωγής των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Τα βασικότερα συμπεράσματα 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 0,5MV/cm αυξάνει η ειδική αγωγιμότητα κατά τη σχέση (A1.4.-1).
- 4) Για μεγαλύτερες τιμές πεδίου από προηγουμένως, οι ελεύθεροι ηλεκτρικοί φορείς γίνονται αρκετά περισσότεροι και δεν ισχύει η σχέση (A1.4-1). Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων αποδίδεται στον ιονισμό με κρούσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι ο ιονισμός με κρούσεις σχετίζεται με την εκδήλωση αρνητικής διαφορικής αντίστασης στο υλικό. Το φάσμα της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εξαρτάται από το περίσσειμα της ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρικών

φορέων κατά την εξαναγκασμένη επιβράδυνσή τους στα ηλεκτρόδια.

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_m ανά άλμα δυναμικού, με την σχέση $W = 0,5q_e \Delta u$, όπου q_e 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.

Μία διαδρομή της δενδροειδούς μορφής εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχεί σε μία κρούση φορτίου, η οποία περιλαμβάνει ελεύθερα ηλεκτρόνια, που είχαν την ίδια ενεργειακή στάθμη (κατά την άφιξή 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 A2.3.3). Οι στάθμες διαταραχής φαίνεται ότι αντιστοιχούν στις θέσεις διαταραχής του ισοδύναμου κυκλώματος των μερικών εκκενώσεων κατά Gemant και Philipoff (σχήμα A2.3.2.3-5). Από τις στάθμες διαταραχής συμμετέχουν περισσότερο στο φαινόμενο της γήρανσης οι πλησιέστερες προς τη ζώνη αγωγιμότητας.



Σχήμα A2.3.3 : Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών του ανομοιογενούς στερεού μονωτικού.

1 : ζώνη αγωγιμότητας

2 : στάθμες διαταραχής μέσα στην απαγορευμένη ζώνη

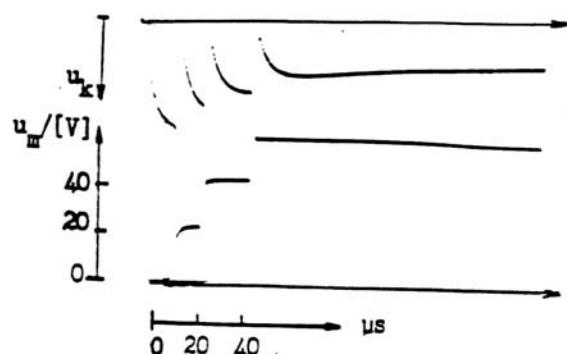
3: ζώνη σθένους

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.

2.3.4 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, κ.λ.π.). Οι τάσεις δοκιμής, που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κβαντομηχανική ερμηνεία του μηχανισμού διάτρησης, είναι κυρίως κρουστικής μορφής (1,2/50μs, 10/200μs, 250/2500μs, κ.λ.π.). Πειράματα έχουν γίνει επίσης με εναλλασσόμενες και ημιανορθωμένες τάσεις καταπόνησης.

Ένα τυπικό παλμογράφημα του φαινομένου δίνεται στο σχήμα A2.3.4-1. Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων (W) υπολογίζεται ότι είναι περίπου 105eV. Μπορούμε επομένως να υποθέσουμε, ότι η διάτρηση σχετίζεται με εκπομπή μαλακών ακτίνων X.



Σχήμα 2.3.4-1 : Τυπικό παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά τη διάτρηση πολυμερών στερεών μονωτικών (πάχους 1mm) εντός μονωτικού ελαίου.

Κρουστική τάση : 1,2/50μs.

R της ακίδας \approx 1mm.

\hat{U}_k : 85kV.

E : 1,2 MV/cm.

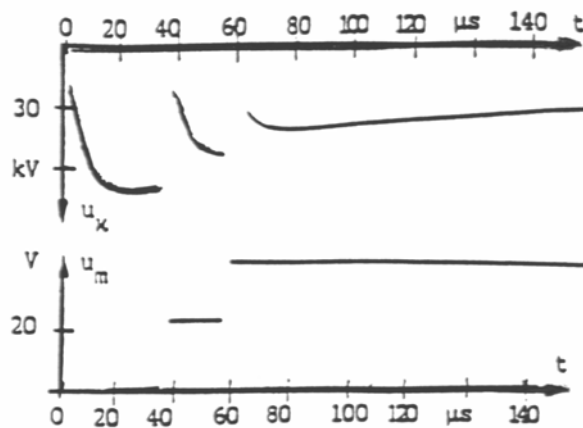
C_m : 1835nF.

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

$\approx 1\text{mm}$), τότε (όπως έχει διαπιστωθεί πειραματικά) η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επεκτείνεται μέχρι το ορατό τμήμα της.

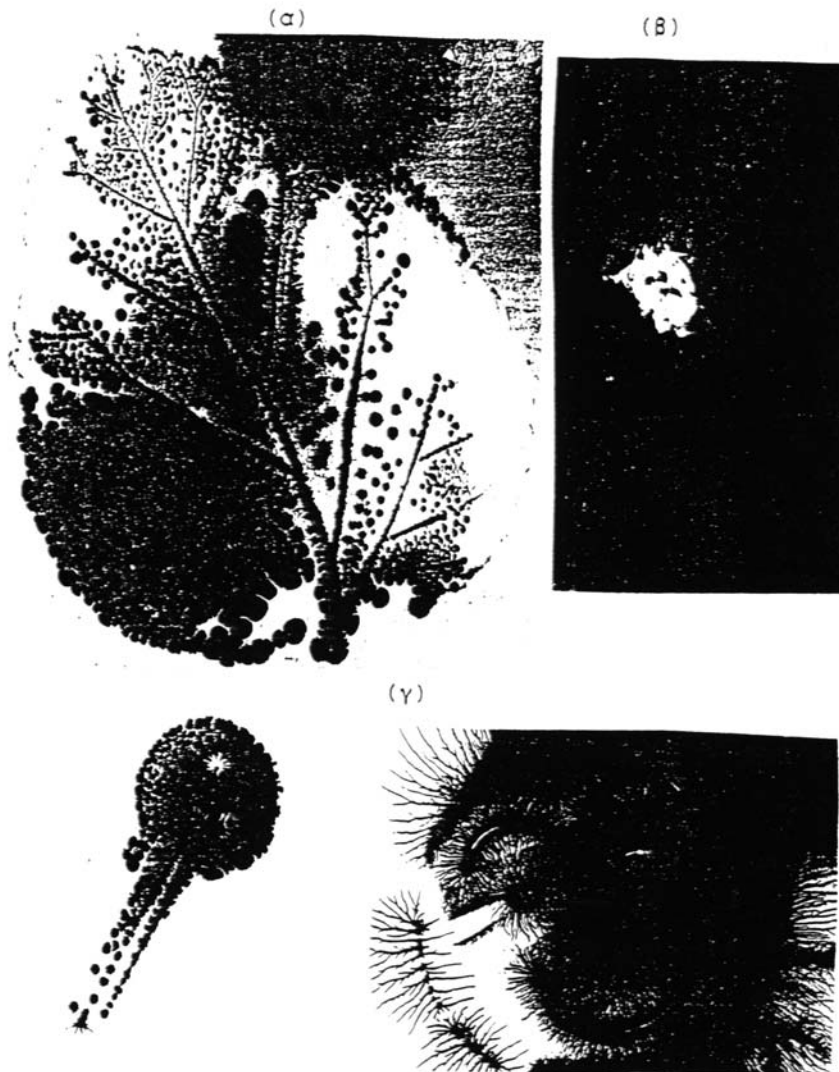
2.3.5 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά την επιφανειακή διάσπαση

Από πειράματα, που έχουν γίνει για τη μελέτη των φαινομένων, που εκδηλώνονται προ και κατά την επιφανειακή διάσπαση, σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου ή ατμοσφαιρικού αέρα, φαίνεται ότι 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 μs και διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα. Από το τυπικό παλμογράφημα της επιφανειακής διάσπασης του σχήματος A2.3.5-1 υπολογίζεται 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.



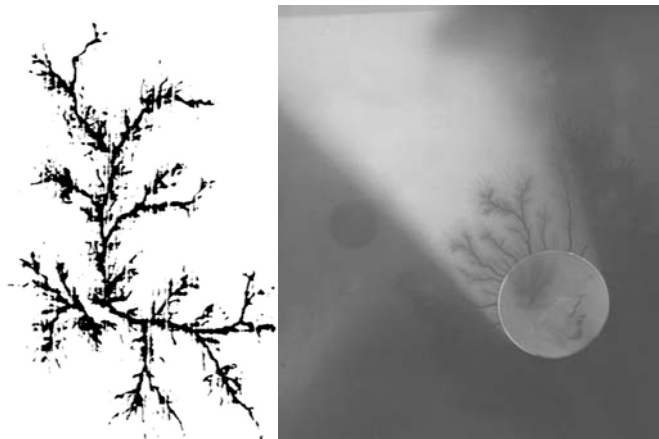
Σχήμα A2.3.5-1 : Παλμογράφημα αλμάτων δυναμικού κατά την επιφανειακή διάσπαση του pertinax (πάχους 2mm και με διάμετρο της επιφάνειάς του 150mm), υπό κρουστικές τάσεις 10/200 μs σε περιβάλλον μονωτικού ελαίου. Ηλεκτρόδια εφαρμογής της τάσης : «ακίδα-πλάκα».

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 υπερβόου 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. Στο σχήμα A2.3.5-2 δίνονται ορισμένες από τις φωτογραφίες αυτές.



Σχήμα Α2.3.5-2 : Προσβολή του φωτογραφικού φιλμ κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερούς στερεού μονωτικού, υπό κρουστική τάση 1,2/50μs.
 Διάταξη ηλεκτροδίων : ακίδα-πλάκα.
 α) Φωτογράφιση φύλλου δένδρου
 β) Φωτογραφία βιολογικού οργανισμού (σκαθάρι).
 γ) Φωτογραφία μεταλλικών αντικειμένων.

Επίσης, στο σχήμα Α2.3.5-3 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 1,2/50μs σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα.

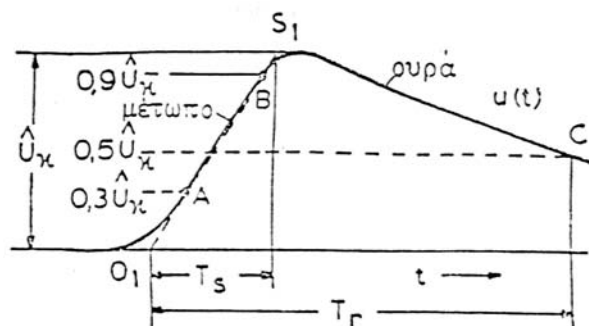


Σχήμα 2.3.5-3 : Φωτογράφιση ενός εικοσάδραχμου κατά την επιφανειακή διάσπαση στον αέρα πολυμερών στερεών μονωτικών υπό κρουστική τάση 1,2/50μs (διάταξη ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα).

3 Παραγωγή και μέτρηση κρουστικών τάσεων

Μεγάλη σημασία για την μελέτη της ηλεκτρικής αντοχής των μονώσεων έχει η καταγραφή των φαινομένων προ και κατά τη διάσπασή τους, ως προς τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. Το γεγονός αυτό είναι προφανές αν αναλογιστεί κανείς πως χρειάζονται πληροφορίες για την αξιοπιστία των μονώσεων έναντι των διαφόρων μορφών υπερτάσεων, που μπορεί να δεχτεί ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι υπερτάσεις διακρίνονται κυρίως σε κεραυνικές υπερτάσεις και υπερτάσεις χειρισμών (δηλαδή υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά τους χειρισμούς των διακοπών στο δίκτυο). Ως κρουστικές τάσεις ονομάζονται οι υπερτάσεις που έχουν μία συγκεκριμένη και τυποποιημένη μορφή, η οποία δίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα Α3-1: Χαρακτηρισμός των μεγεθών μίας κρουστικής τάσης.

\hat{U}_k : Μέγιστη τιμή.

T_s : Διάρκεια μετώπου.

T_r : Διάρκεια ημίσεος εύρους της σουράς.

Οι κρουστικές τάσεις συμβολίζονται με τον χρόνο μετώπου (T_s) και τον χρόνο ουράς (T_r). Η κεραυνική τάση είναι μία κρουστική τάση της μορφής 1,2/50 μs , που σημαίνει ότι $T_s=1,2 \mu\text{s}$ και $T_r=50\mu\text{s}$. Αντίστοιχα, ως τυποποιημένη κρουστική τάση χειρισμών θεωρείται η 250/2500 μs . Στην παρούσα διπλωματική εργασία η τάση που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών μετρήσεων είναι της μορφής 250/2500 μs

Για την παραγωγή υψηλών μέγιστων τιμών \hat{U}_k χρησιμοποιούνται πολυβάθμιες γεννήτριες. Η αρχή λειτουργίας των γεννητριών αυτών στηρίζεται στην παράλληλη φόρτιση των πυκνωτών φόρτισης όλων των βαθμίδων και ακολούθως στην σε σειρά εκφόρτισή τους, μέσω αντίστοιχων σπινθηριστών σφαιρών.

B. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΝΝΟΙΩΝ, ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ

1. Διαδικασία Μετρήσεων

1.1 Ορισμοί ηλεκτρικών μεγεθών

Τα ηλεκτρικά μεγέθη τα οποία μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα παρακάτω:

- U_k : η Κρουστική Τάση μετρούμενη σε kV
- E : Η Πεδιακή Ένταση σε MV/cm. Ο τύπος υπολογισμού της είναι

$$E = \frac{2 \cdot U_k}{R \cdot \ln(4d / R)} \quad (\text{B 1.1-1})$$

όπου d : το πάχος του δοκιμίου και R η ακτίνα καμπυλότητάς του (αυτός αφορά το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ηλεκτροδίων σε διάταξη ακίδα-πλάκα). Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία είχε $R=0,9 \text{ mm}$

- Q_{1av}, Q_{2av} : Η μέση τιμή των φορτίων στην έναρξη και περάτωση των μερικών εκκενώσεων αντίστοιχα σε μCb
- ΔQ_{av} : Η μέση τιμή της αύξησης του φορτίου, όπου

$$\Delta Q = Q_{2av} - Q_{1av} \text{ σε } \mu\text{Cb}. \quad (\text{B 1.1-2})$$

- y : η τυπική απόκλιση από την μέση τιμή του φορτίου (B 1.1-3)

- ΔU Το άλμα δυναμικού σε V. $\Delta U = \frac{\Delta Q}{C_m}$ (B 1.1-4)

όπου C_m ο πυκνωτής μέτρησης

- ΔW : Η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε eV, όπου

$$\Delta W = \frac{1}{2} \cdot \Delta U \cdot k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta Q}{C_m} \cdot k \quad (\text{B 1.1-5})$$

Όπου k ένας συντελεστής διόρθωσης αναλόγως της τιμής C_m (βλ. Πίνακα B1.1-1)

C_m (σε nF)	10	20	60	210	1000
k	1	1	1	1.62	5.51

Πίνακας B1.1-1 : Τιμές του συντελεστή k για διάφορες τιμές της χωρητικότητας του πυκνωτή C_m .

Στην διάταξη χρησιμοποιήθηκε πυκνωτής $C_m = 1000\text{nF}$. Επομένως ο συντελεστής k θα έχει τιμή $k=5.51$.

- v : η ταχύτητα των ηλεκτρονίων σε m/sec, όπου

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta W}{m_o}} = \sqrt{\frac{\Delta Q}{C_m * m_o} * k} \quad (\text{B 1.1-6})$$

με m_o : μάζα ηλεκτρονίου ($9,31 * 10^{-31}$ Kg) και ΔW σε Joule ($1\text{eV} = 1,6 * 10^{-19}$ Joule)

- f : η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε Hz, όπου

$$f = \frac{\Delta W}{h} \quad (\text{B 1.1-7})$$

όπου h : σταθερά του Planck ($6,6261 * 10^{-34}$ J * sec)

- λ : το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε m , όπου

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{B 1.1-8})$$

- b : η κινητικότητα των ηλεκτρονίων σε $\frac{m^2}{V * sec}$, όπου $b = \frac{v}{E}$ (B 1.1-9)

- N : ο αριθμός των ηλεκτρονίων, όπου $N = \frac{\Delta Q}{e}$ (B 1.1-10)

με e : το φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,6 * 10^{-19}$ Cb)

- σ : η ειδική αγωγιμότητα σε $\frac{m^2}{\Omega}$, όπου $\sigma = N * e * b = \Delta Q * b$ (B 1.1-11)

- J : η πυκνότητα ρεύματος σε A*m, όπου $J = \sigma * E$ (B 1.1-12)

- ΔC : η αύξηση της χωρητικότητας λόγω μερικών εκκενώσεων ,

όπου $\Delta C = \frac{\Delta Q}{U_k}$ (B 1.1-13)

Επίσης ο καθορισμός του είδους της ακτινοβολίας έγινε με χρήση του παρακάτω πίνακα:

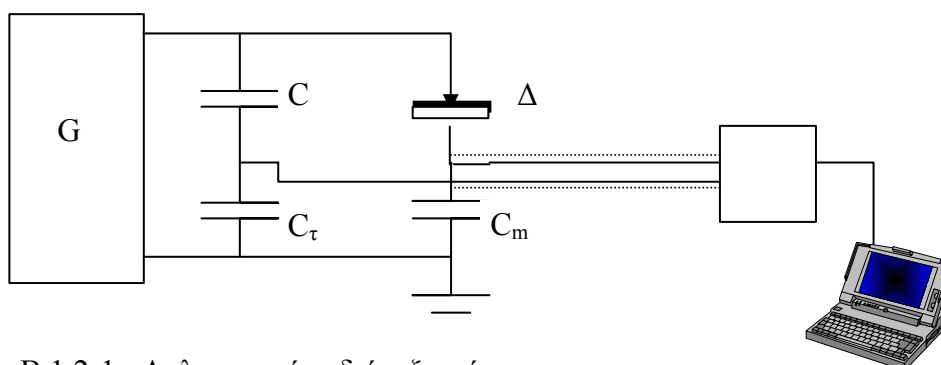
ΕΙΔΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ (eV)
Ακτίνες X	$30 \dots 2 * 10^6$
Υπεριώδης	8 ... 30
Φωτεινή	2.....8
Υπέρυθρη	$2 * 10^{-3} \dots 2$
Μικροκύματα	$6 * 10^{-6} \dots 2 * 10^{-3}$
Ραδιοφωνικά κύματα	$2 * 10^{-11} \dots 6 * 10^{-6}$
Ακουστικά Κύματα	$10^{-14} \dots 2 * 10^{-11}$

Πίνακας Β 1.1-2 Αντιστοίχιση Ενέργειας και Είδους ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

1.2 Κύκλωμα μέτρησης

Η διεξαγωγή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων και υψηλών τάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων. Στο σχήμα Β1.2-1 δίνεται το απλοποιημένο κύκλωμα των μετρήσεων. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν από εκείνες τις τιμές τάσης, στις οποίες παρατηρήθηκαν οι πρώτες μερικές εκκενώσεις, με τη μορφή αλμάτων δυναμικού και στη συνέχεια οι τιμές αυξήθηκαν με σταθερό βήμα μέχρι να πραγματοποιηθεί η επιφανειακή διάσπασή του.

Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εφαρμογή δίνεται απλοποιημένα στην παρακάτω σχηματική αναπαράσταση :



Σχήμα Β 1.2-1 : Απλοποιημένη διάταξη μέτρησης

G : γεννήτρια κρουστικών τάσεων

C, C_τ : χωρητικός καταμεριστής τάσης για τη μέτρηση της κρουστικής τάσης

C_m : πυκνωτή μέτρησης των αλμάτων δυναμικού ΔU

Δ: το δοκίμιο τοποθετημένο μεταξύ των ηλεκτροδίων ακίδα-πλάκα

1.3 Περιγραφή διεξαγωγής των μετρήσεων

Με βάση την κρουστική γεννήτρια του σχήματος B1.2-1 έγιναν μετρήσεις σε βήματα των 5kVDC όπου μετρήθηκε η τιμή της συνεχούς τάσης και η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης. Από την λήψη παλμογραφημάτων ανά επίπεδο τάσης μετριόντουσαν τα φορτία Q1 και Q2 κατά την έναρξη και περαίωση των μερικών εκκενώσεων αντίστοιχα. Οι μετρήσεις αυτές επαναλήφθηκαν σε δέκα νέα δοκίμια, ανά επίπεδο τάσης, ούτως ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των φορτίων.

2. Αποτελέσματα – Πίνακες – Γραφικές Παραστάσεις

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο, σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις σύμφωνα με τα δεδομένα που αποθηκεύτηκαν στον παλμογράφο και μετά την επεξεργασία τους στο EXCEL. Ο πρώτος πίνακας κάθε περίπτωσης καταγράφει τις τιμές των φορτίων που μετρήθηκαν ανάλογα με την επιβαλλόμενη κρουστική τάση, ενώ οι επόμενοι δύο τα υπολογιζόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σύμφωνα με τους ορισμούς και τις μαθηματικές σχέσεις που δόθηκαν στην παράγραφο B1.1. Στην συνέχεια δίνονται τα διαγράμματα μεταβολής κάθε ηλεκτρικού μεγέθους σε συνάρτηση με την κρουστική τάση και την ένταση του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, ούτως ώστε να υπάρχει άμεση εποπτική εικόνα της συμπεριφοράς τους.

2.1 d=1mm, Μέση Τιμή Φορτίου, θετική πολικότητα κρουστικής τάσης

U _k (kV)	Q _{1,av} (μC _b)	y ₁	Q _{2,av} (μC _b)	y ₂	ΔQ _{av} (μC _b)
10,1	0,015	0,002			0,00
13,4	0,019	0,001	0,028	0,001	0,009
16,8	0,050	0,002	0,059	0,006	0,009
20,1	0,024	0,003	0,096	0,010	0,072
23,4	0,054	0,000	0,330	0,080	0,276
26,7	0,067	0,000	0,740	0,060	0,673
30,2	0,067	0,000	1,030	0,120	0,963
33,5	0,067	0,000	1,510	0,170	1,443
36,9	0,067	0,000	1,990	0,260	1,923
40,2	0,130	0,000	3,140	0,500	3,010
43,6	0,000	0,000	4,100	0,410	4,100

Πίνακας Β 2.1.1 Μέση Τιμή (Q_{1,av} και Q_{2,av}) και Τυπική Απόκλιση (y₁ και y₂) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

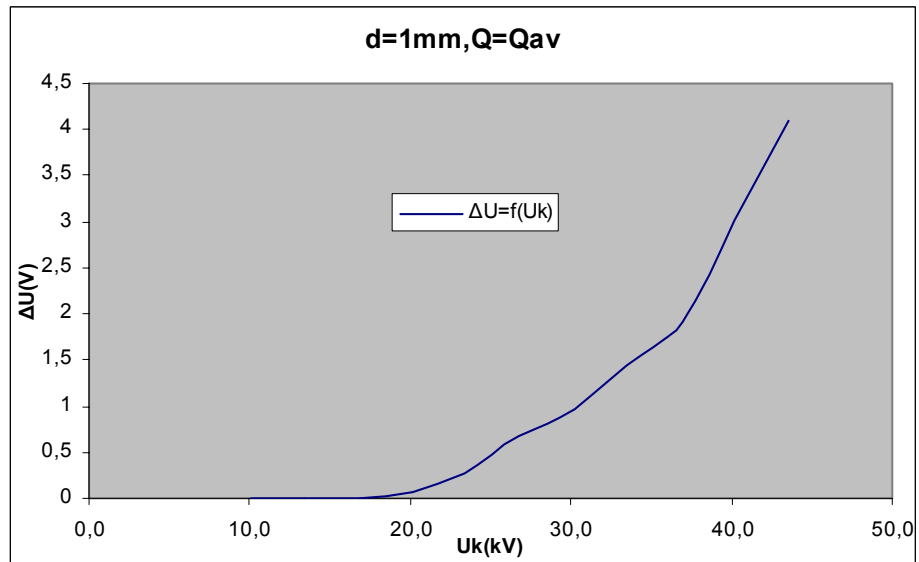
U_k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
10,1	15,04667386	0	0		0		
13,4	19,96291383	0,009	0,024795	Υπέρυθρη	93,37623295	15,59589275	5,98723E+12
16,8	25,02813078	0,009	0,024795	Υπέρυθρη	93,37623295	15,59589275	5,98723E+12
20,1	29,94437075	0,072	0,19836	Υπέρυθρη	264,1078701	5,513980761	4,78979E+13
23,4	34,86061072	0,276	0,76038	Υπέρυθρη	517,0941632	2,81628728	1,83608E+14
26,7	39,7768507	0,673	1,854115	Υπέρυθρη	807,462992	1,803532457	4,47712E+14
30,2	44,99104461	0,963	2,653065	Φωτεινή	965,8912641	1,50771186	6,40634E+14
33,5	49,90728458	1,443	3,975465	Φωτεινή	1182,356002	1,231681247	9,59953E+14
36,9	54,97250152	1,923	5,297865	Φωτεινή	1364,912266	1,066944558	1,27927E+15
40,2	59,8887415	3,01	8,29255	Υπεριώδης	1707,647955	0,852802072	2,0024E+15
43,6	64,95395844	4,1	11,2955	Υπεριώδης	1992,998735	0,730700772	2,72752E+15

Πίνακας Β 2.1.2 (α) Άλλα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

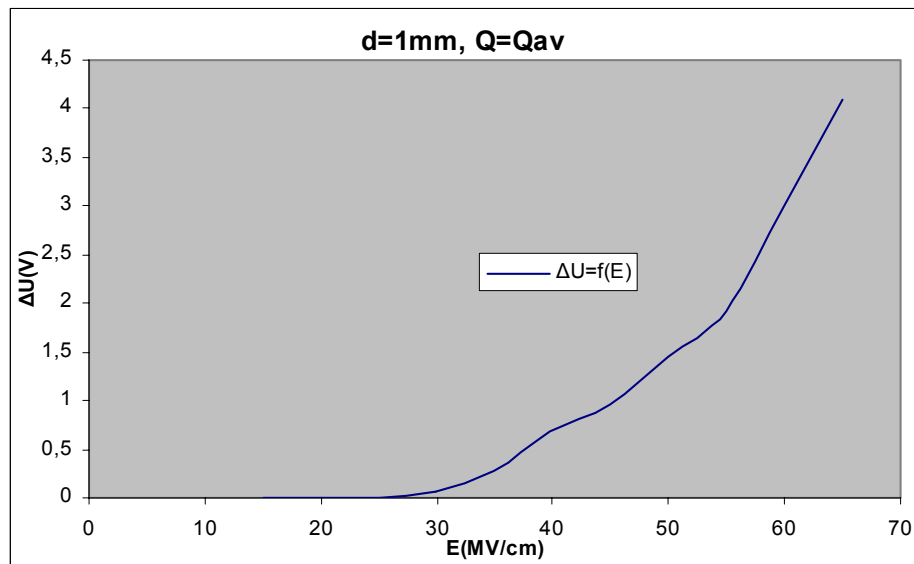
U_k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
10,1	15,04667386					
13,4	19,96291383	4,67749E-05	4,20974E-13	0,000840386	56250000000	0,671641791
16,8	25,02813078	3,73085E-05	3,35777E-13	0,000840386	56250000000	0,535714286
20,1	29,94437075	8,81995E-05	6,35036E-12	0,019015767	4,5E+11	3,582089552
23,4	34,86061072	0,000148332	4,09396E-11	0,142717989	1,725E+12	11,79487179
26,7	39,7768507	0,000202998	1,36618E-10	0,543422594	4,20625E+12	25,20599251
30,2	44,99104461	0,000214685	2,06742E-10	0,930153287	6,01875E+12	31,88741722
33,5	49,90728458	0,000236911	3,41862E-10	1,70613971	9,01875E+12	43,07462687
36,9	54,97250152	0,00024829	4,77462E-10	2,624726288	1,20188E+13	52,11382114
40,2	59,8887415	0,000285137	8,58262E-10	5,140020345	1,88125E+13	74,87562189
43,6	64,95395844	0,000306833	1,25801E-09	8,171294812	2,5625E+13	94,03669725

Πίνακας Β 2.1.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

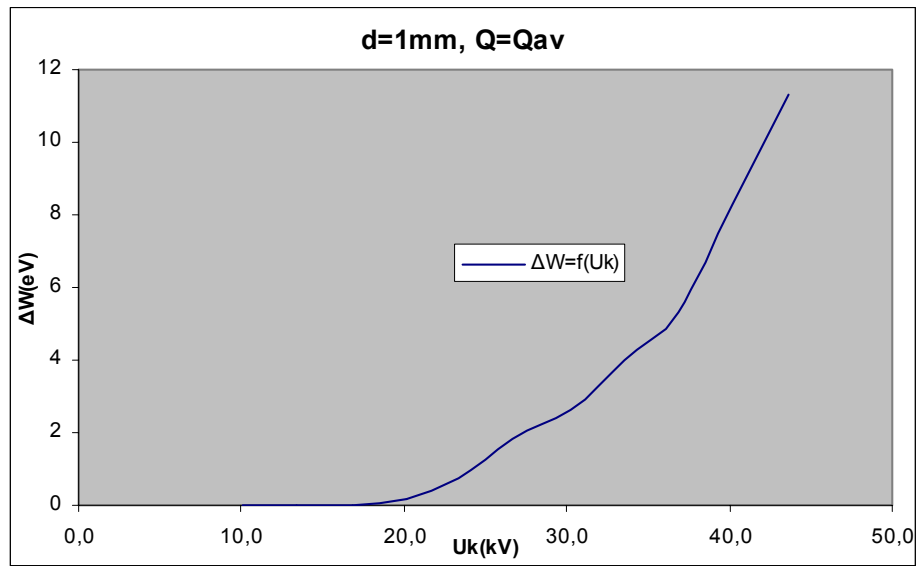
Πίνακες Β 2.1.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



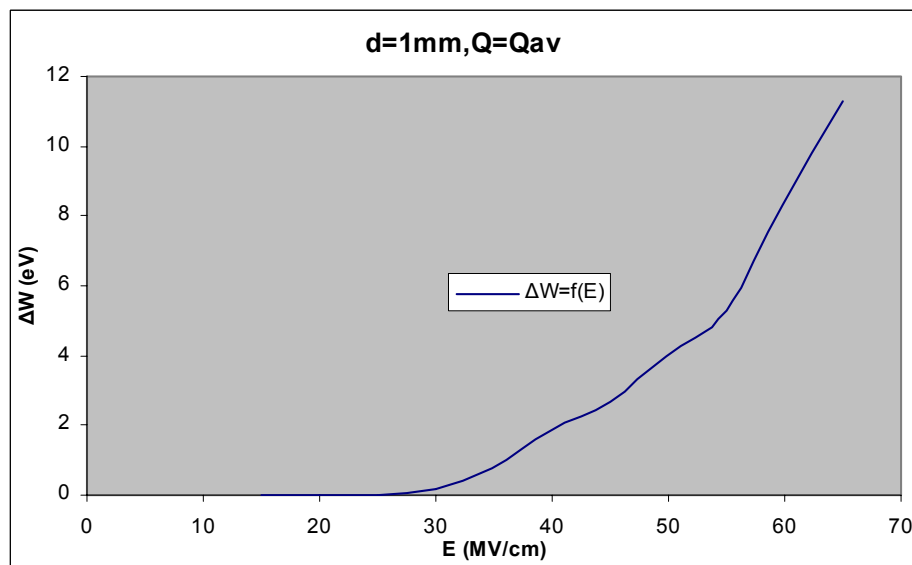
Σχήμα B 2.1.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



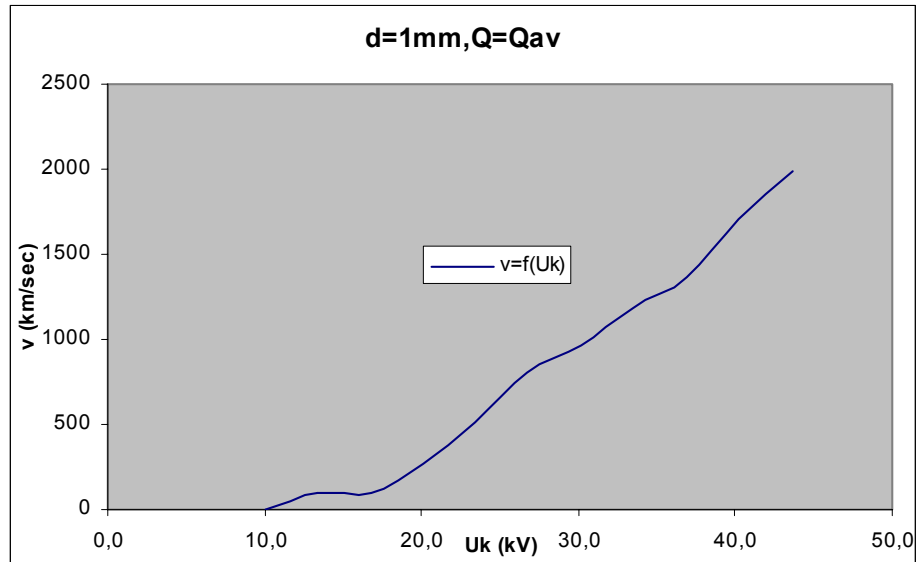
Σχήμα B 2.1.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



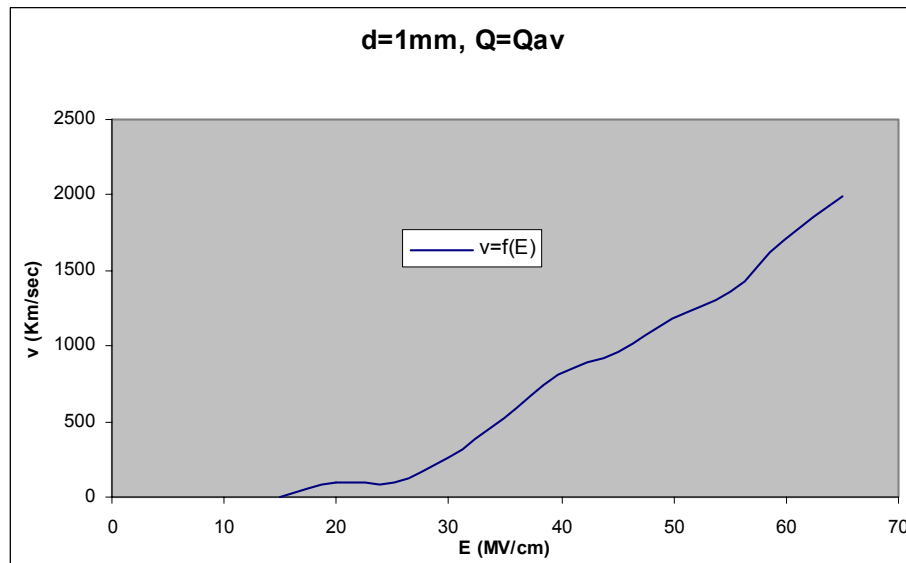
Σχήμα Β 2.1.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



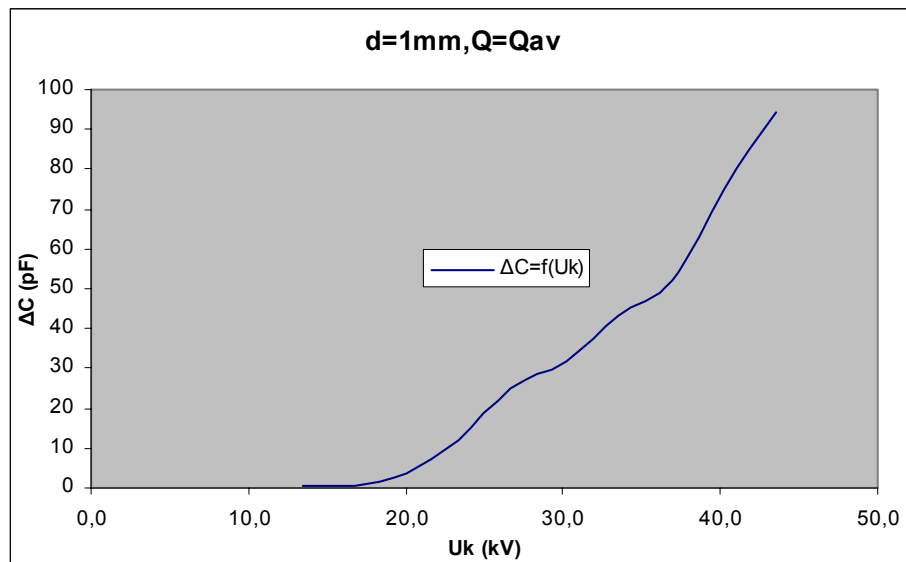
Σχήμα Β 2.1.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



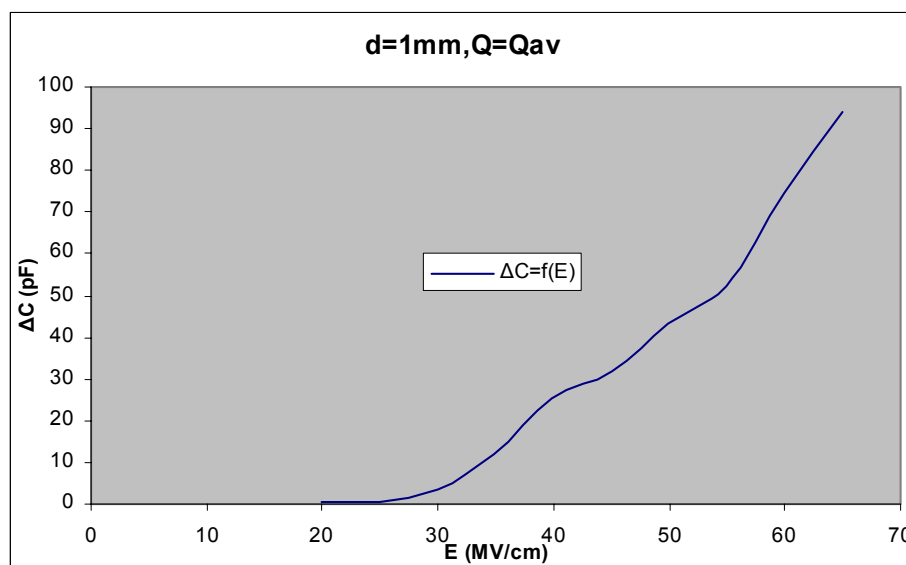
Σχήμα Β 2.1.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



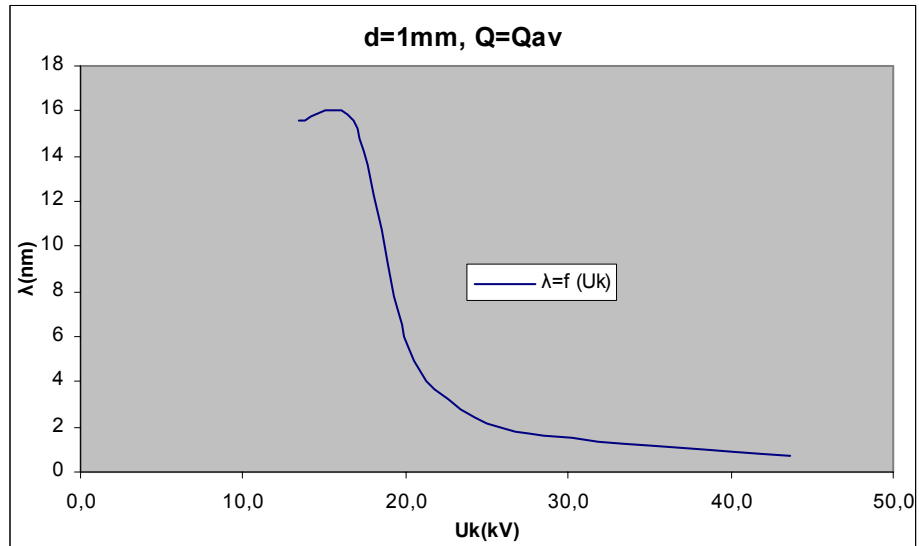
Σχήμα Β 2.1.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



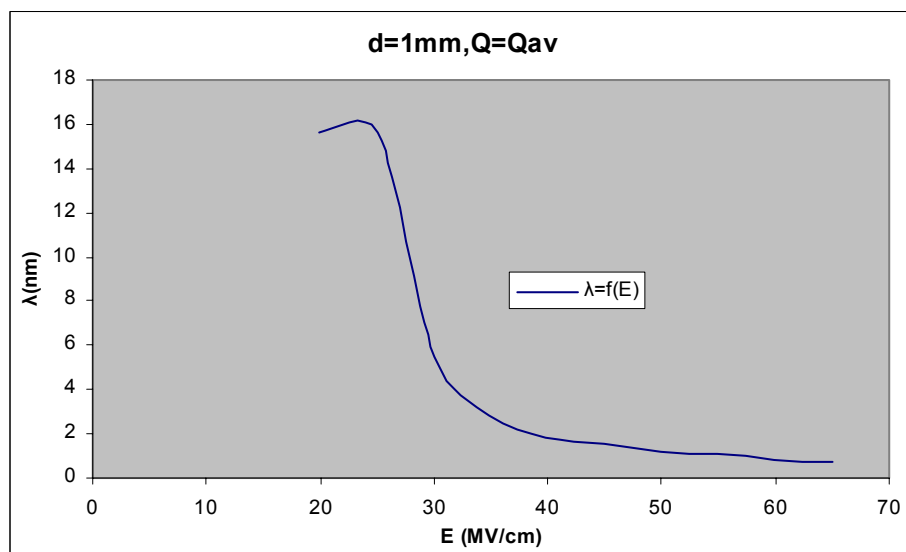
Σχήμα Β 2.1.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



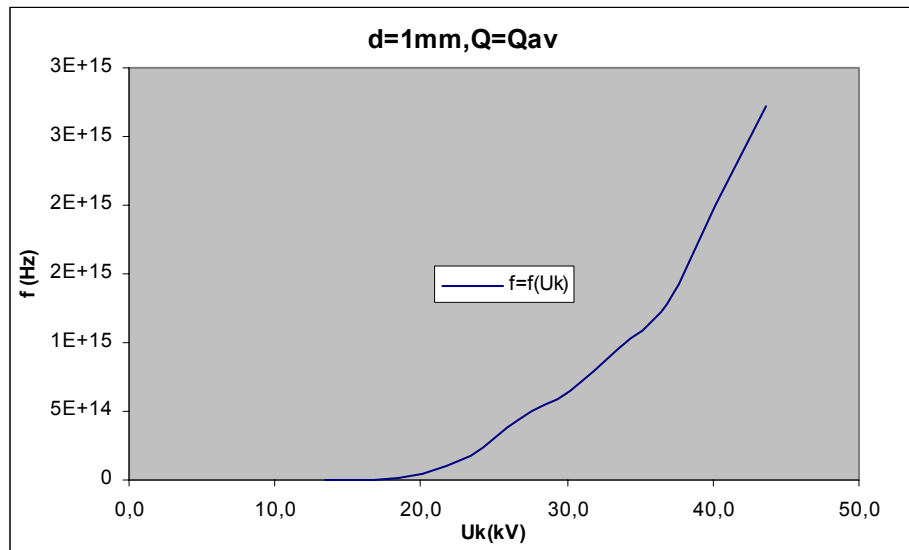
Σχήμα Β 2.1.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



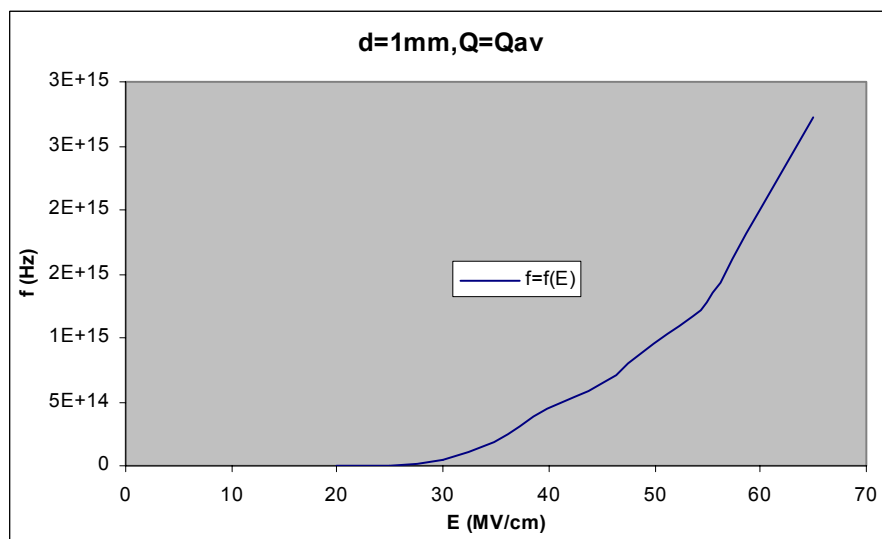
Σχήμα Β 2.1.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



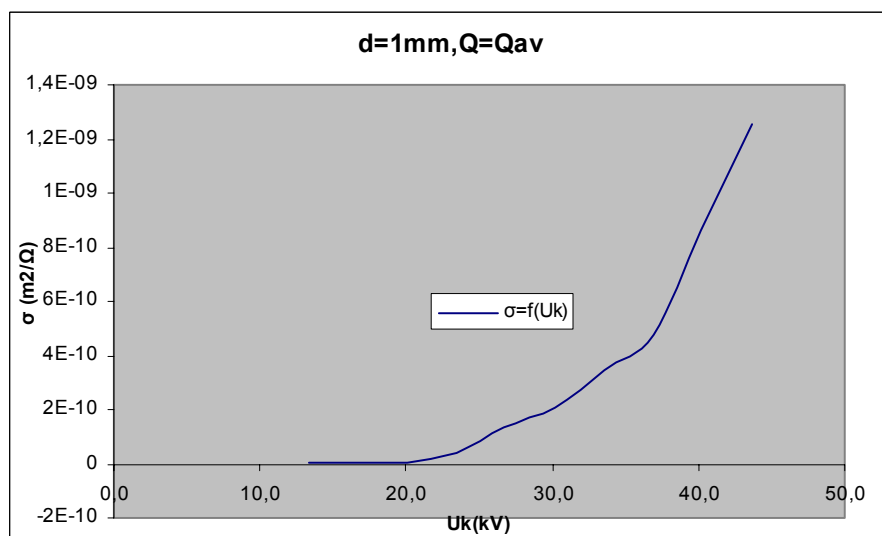
Σχήμα Β 2.1.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



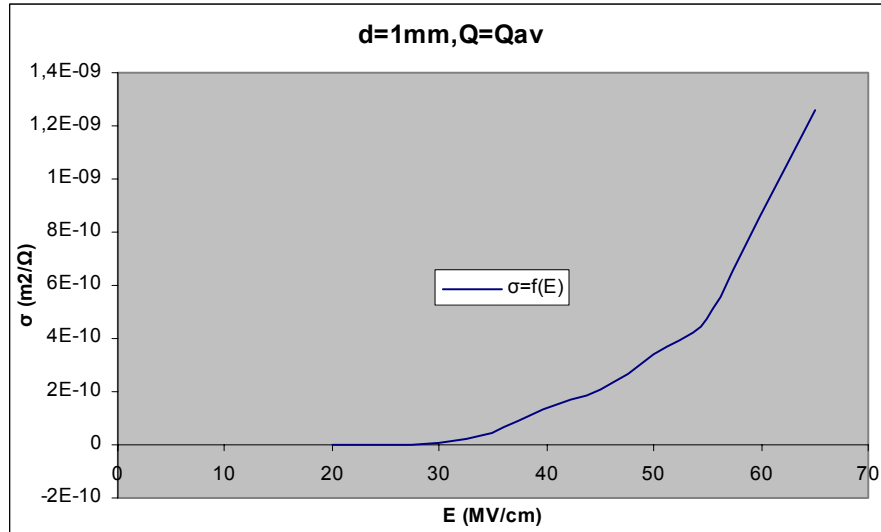
Σχήμα Β 2.1.11 Μεταβολή Συχνότητας Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



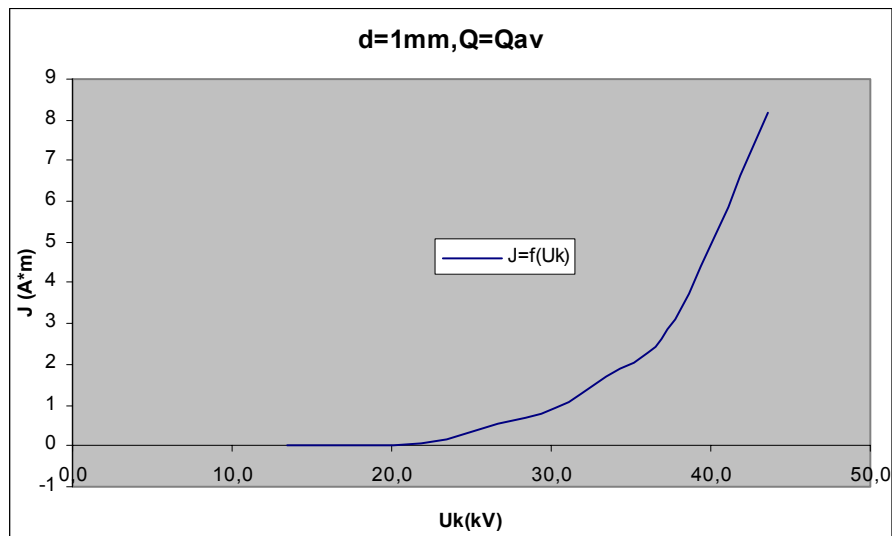
Σχήμα Β 2.1.12 Μεταβολή Συχνότητας Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



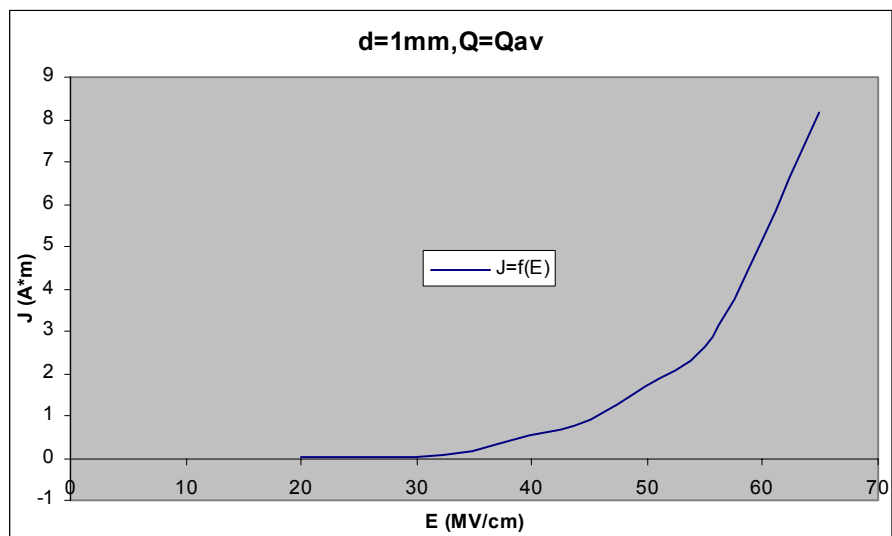
Σχήμα Β 2.1.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα B 2.1.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα B 2.1.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα B 2.1.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.2 d=1mm, Μέση Τιμή Φορτίου, αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης

Uk (kV)	Q1,av (μ Cb)	y1	Q2,av (μ Cb)	y2	Δ Q,av (μ Cb)
-13,8	0,069	0,007			
-17,2	0,083	0,004			
-20,7	0,079	0,009	0,13	0,02	0,051
-24,2	0,085	0,008	0,24	0,07	0,155
-27,6	0,067	0	0,38	0,09	0,313
-31,1	0,1	0	0,48	0,14	0,380
-34,5	0,067	0	0,82	0,32	0,753
-37,9	0,067	0	1,89	0,55	1,823
-41,4	0	0	2,29	0,51	2,290
-44,8	0	0	2,24	0,57	2,240

Πίνακας Β 2.2.1 Μέση Τιμή (Q1,av και Q2,av) και Τυπική Απόκλιση (y1 και y2) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

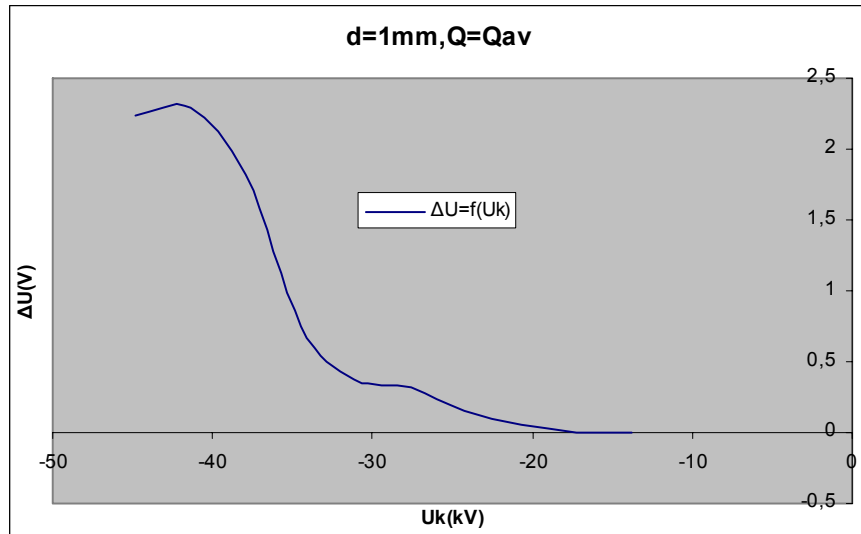
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
-13,8	-20,55882	0	0		0		
-17,2	-25,62404	0	0		0		
-20,7	-30,83823	0,051	0,140505	Υπέρυθρη	222,2798948	6,551585403	3,39276E+13
-24,2	-36,05243	0,155	0,427025	Υπέρυθρη	387,5082417	3,758076752	1,03113E+14
-27,6	-41,11764	0,313	0,862315	Υπέρυθρη	550,6647332	2,644595934	2,08223E+14
-31,1	-46,33184	0,38	1,0469	Υπέρυθρη	606,7459595	2,400157251	2,52794E+14
-34,5	-51,39705	0,753	2,074515	Φωτεινή	854,1075929	1,70503778	5,00932E+14
-37,9	-56,46227	1,823	5,022365	Φωτεινή	1328,94935	1,09581732	1,21275E+15
-41,4	-61,67647	2,29	6,30895	Φωτεινή	1489,473688	0,977718321	1,52342E+15
-44,8	-66,74168	2,24	6,1712	Φωτεινή	1473,123317	0,988570133	1,49016E+15

Πίνακας Β 2.2.2 (α) Άλλα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

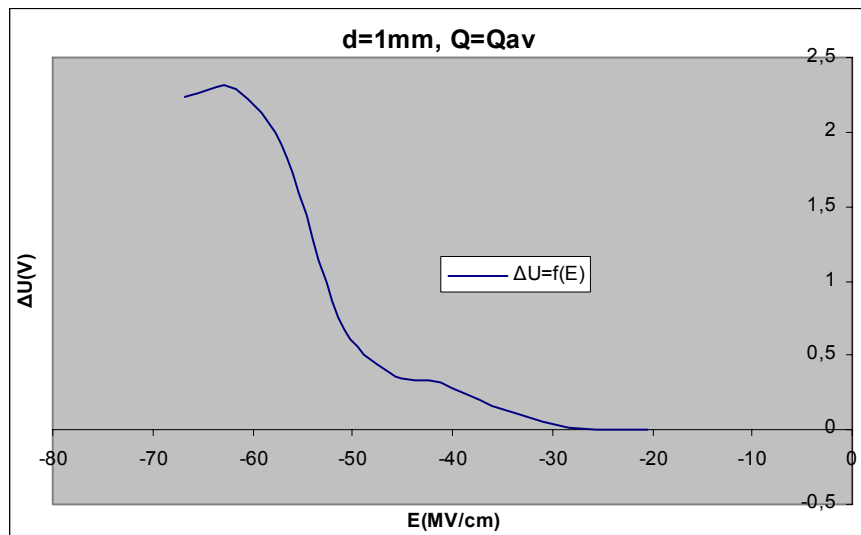
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
-13,8	-20,55882					
-17,2	-25,62404					
-20,7	-30,83823	7,20793E-05	3,67605E-12	0,011336275	3,1875E+11	2,463768116
-24,2	-36,05243	0,000107485	1,66601E-11	0,060063777	9,6875E+11	6,404958678
-27,6	-41,11764	0,000133924	4,19183E-11	0,172358061	1,9563E+12	11,34057971
-31,1	-46,33184	0,000130957	4,97635E-11	0,230563465	2,375E+12	12,21864952
-34,5	-51,39705	0,000166178	1,25132E-10	0,643143017	4,7063E+12	21,82608696
-37,9	-56,46227	0,000235369	4,29079E-10	2,422674664	1,1394E+13	48,10026385
-41,4	-61,67647	0,000241498	5,5303E-10	3,410894746	1,4313E+13	55,31400966
-44,8	-66,74168	0,00022072	4,94413E-10	3,299796231	1,4E+13	50

Πίνακας Β 2.2.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

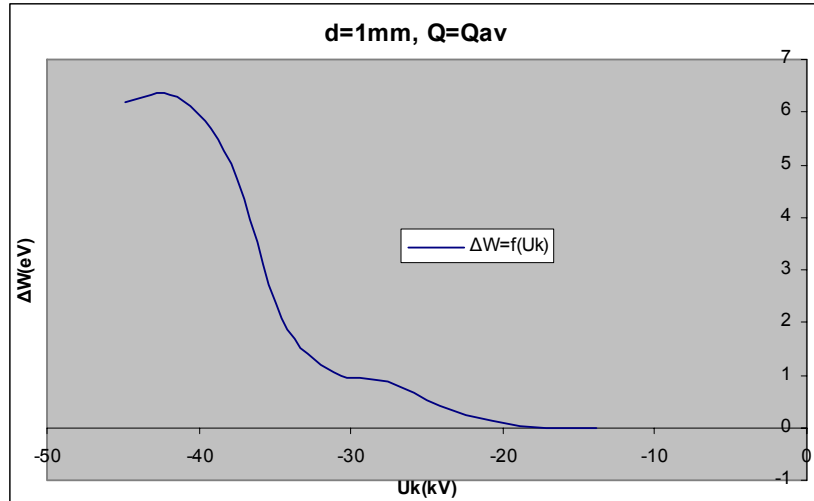
Πίνακες Β 2.2.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



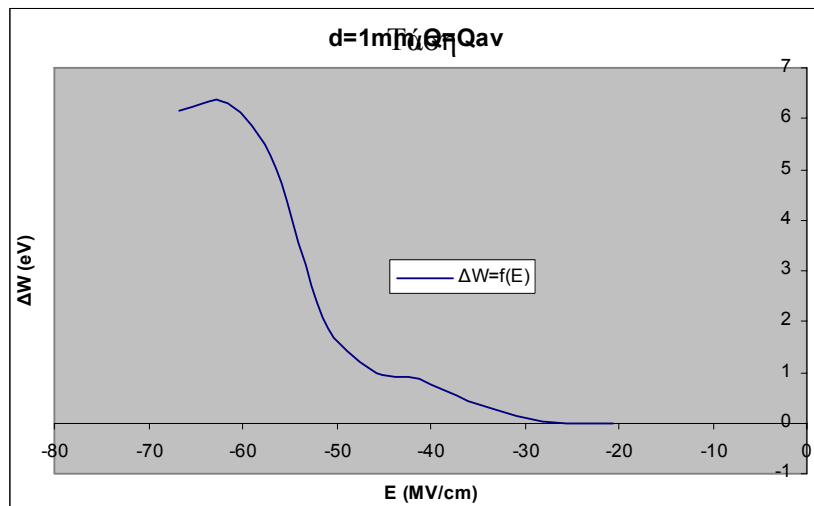
Σχήμα Β 2.2.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



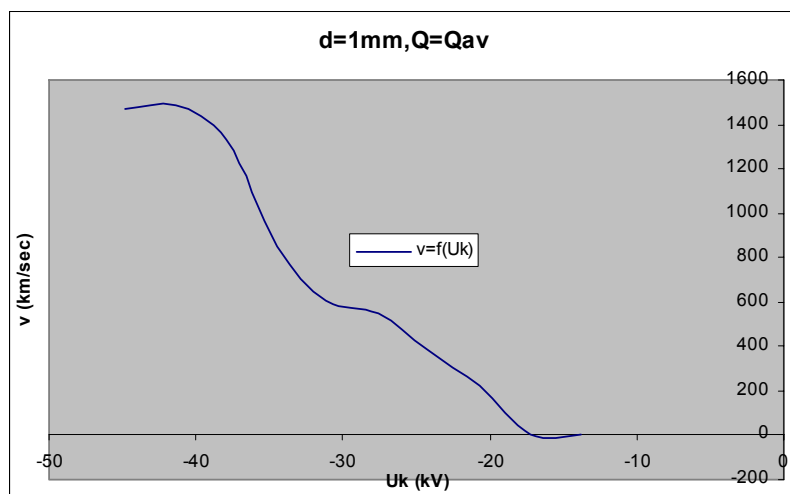
Σχήμα Β 2.2.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



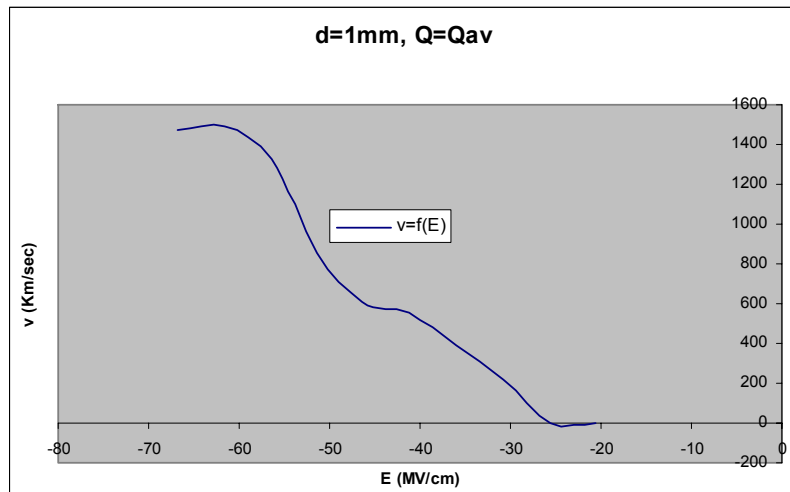
Σχήμα B 2.2.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική



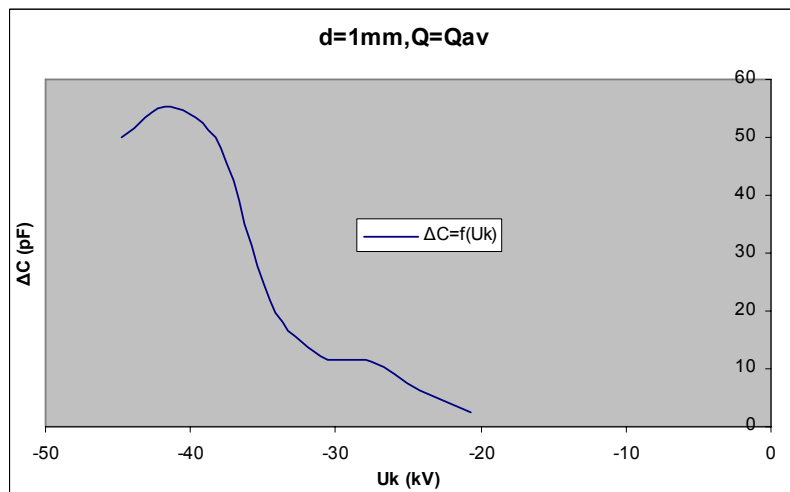
Σχήμα B 2.2.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



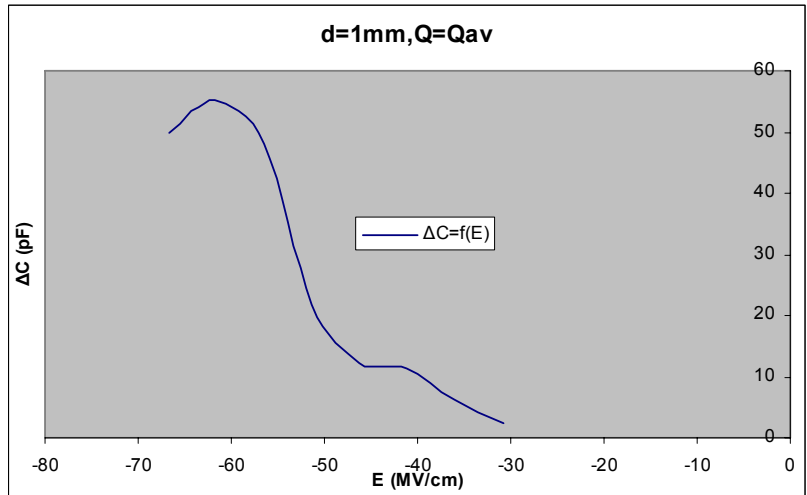
Σχήμα B 2.2.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



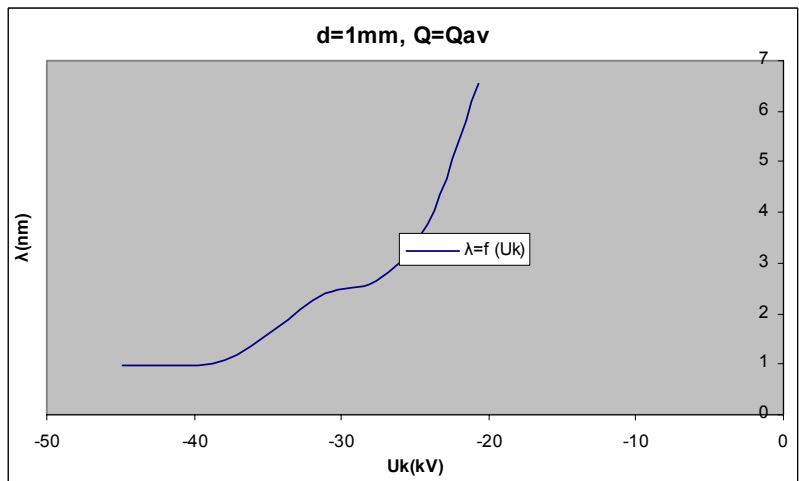
Σχήμα B 2.2.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



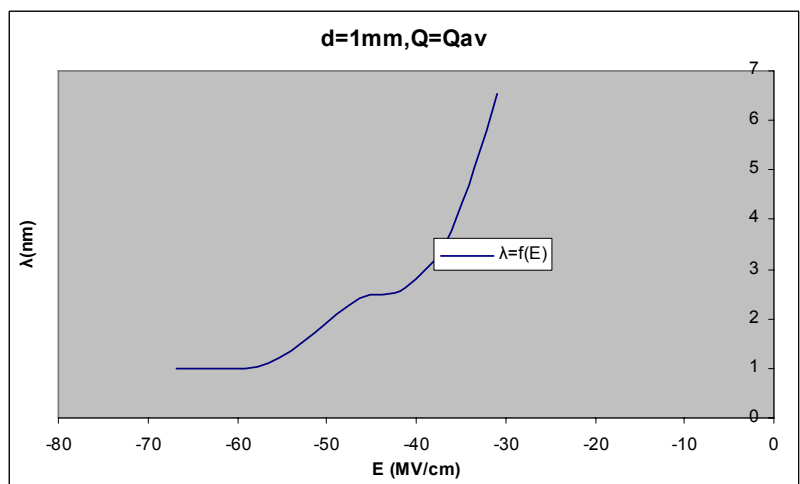
Σχήμα B 2.2.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



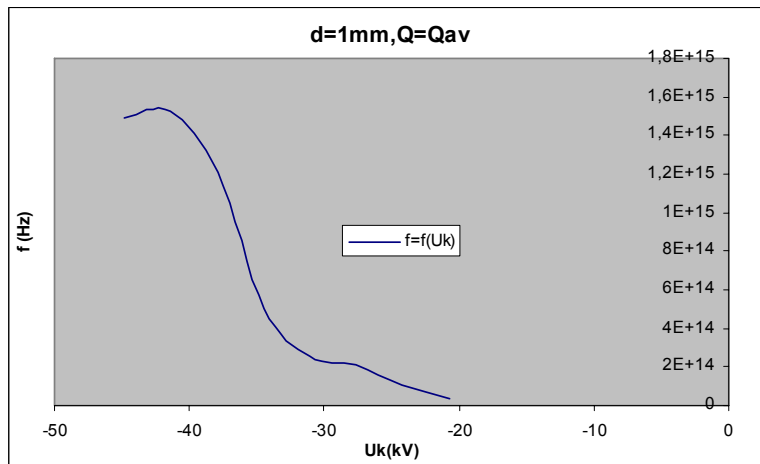
Σχήμα Β 2.2.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



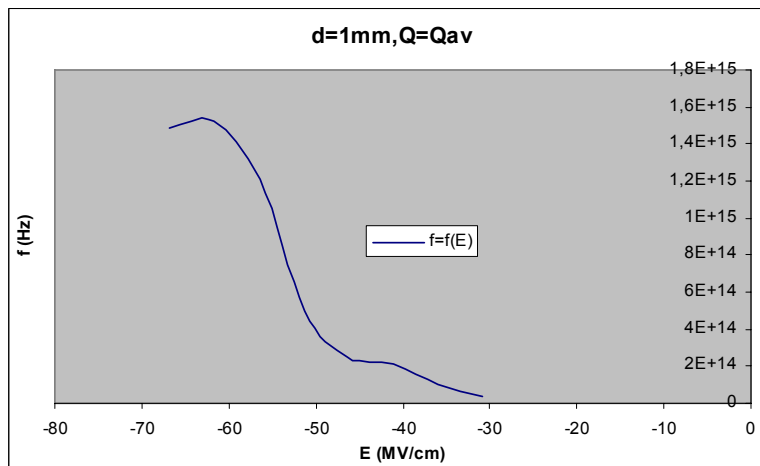
Σχήμα Β 2.2.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



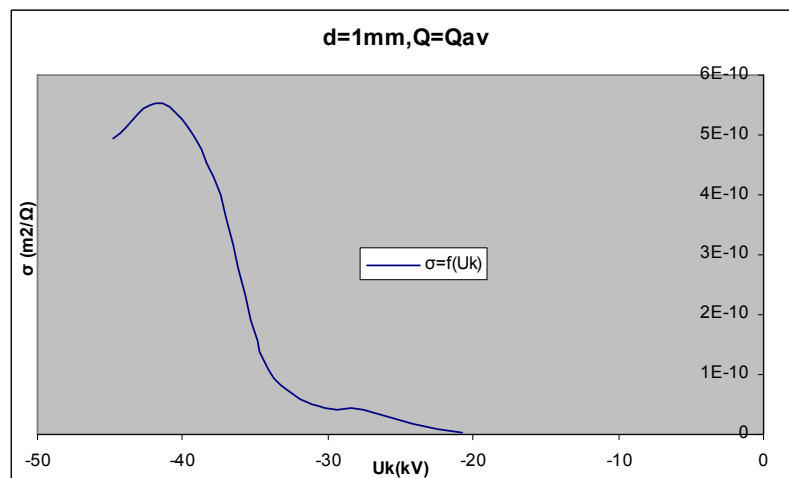
Σχήμα Β 2.2.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



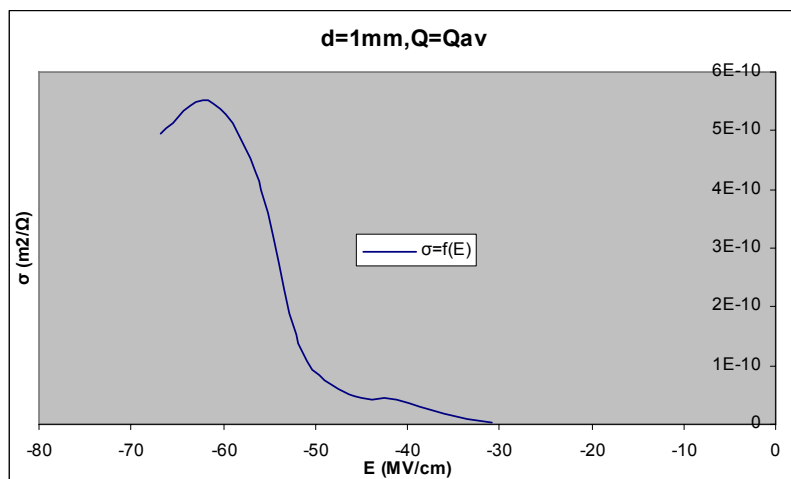
Σχήμα Β 2.2.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



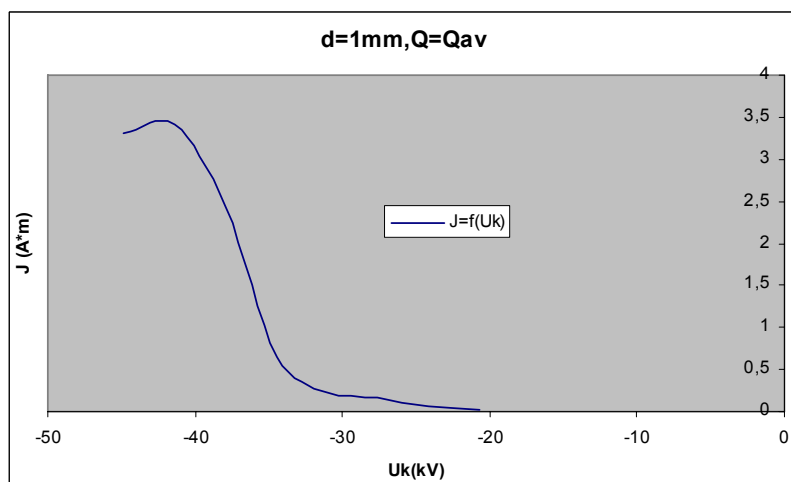
Σχήμα Β 2.2.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



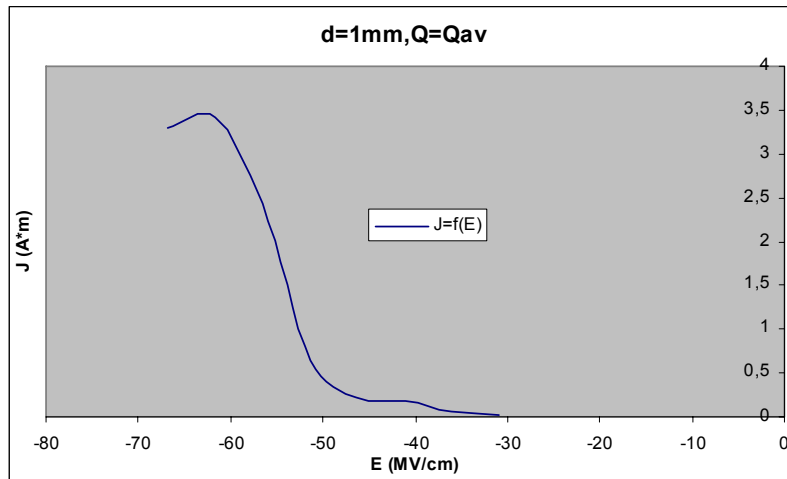
Σχήμα Β 2.2.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.2.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.2.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.2.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.3 d=2mm, Μέση Τιμή Φορτίου, θετική πολικότητα κρουστικής τάσης

U _k (kV)	Q _{1,av} (μCb)	y ₁	Q _{2,av} (μCb)	y ₂	ΔQ _{av} (μCb)
13,8	0,062	0,005			
17,3	0,077	0,004			
20,8	0,082	0,009	0,13	0,01	0,048
24,1	0,074	0,01	0,12	0,02	0,046
27,7	0,081	0	0,18	0,05	0,099
31,1	0,067	0	0,34	0,06	0,273
34,5	0,067	0	0,39	0,09	0,323
37,8	0,067	0	0,64	0,14	0,573
41,4	0,1	0	0,78	0,15	0,680
44,6	0,067	0	0,75	0,17	0,683

Πίνακας Β 2.3.1 Μέση Τιμή (Q_{1,av} και Q_{2,av}) και Τυπική Απόκλιση (y₁ και y₂) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

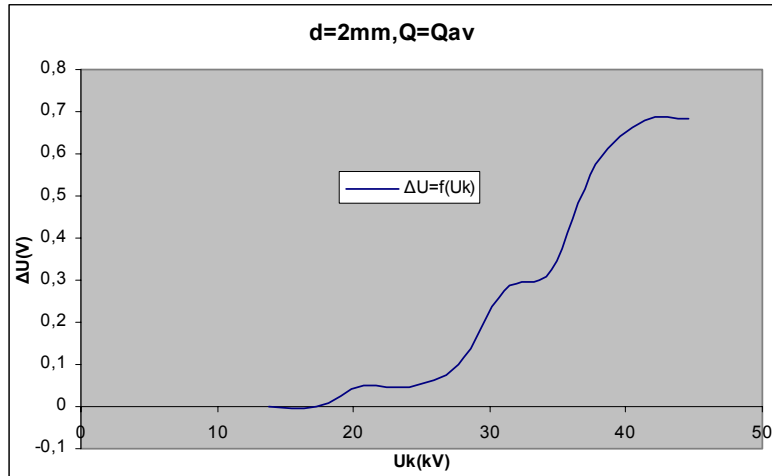
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
13,8	14,03635929	0	0		0		
17,3	17,59630549	0	0		0		
20,8	21,15625169	0,048	0,13224	Υπέρυθρη	215,6431729	6,753219657	3,1932E+13
24,1	24,51277239	0,046	0,12673	Υπέρυθρη	211,1028081	6,898466804	3,0601E+13
27,7	28,17443133	0,099	0,272745	Υπέρυθρη	309,693929	4,702338593	6,586E+13
31,1	31,63266478	0,273	0,752115	Υπέρυθρη	514,2761904	2,831719106	1,8161E+14
34,5	35,09089823	0,323	0,889865	Υπέρυθρη	559,3921348	2,603336057	2,1488E+14
37,8	38,44741893	0,573	1,578615	Υπέρυθρη	745,0619858	1,954583299	3,8119E+14
41,4	42,10907788	0,68	1,8734	Υπέρυθρη	811,6514165	1,794225556	4,5237E+14
44,6	45,36388583	0,683	1,881665	Υπέρυθρη	813,4398537	1,790280754	4,5436E+14

Πίνακας Β 2.3.2 (α) Άλλα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

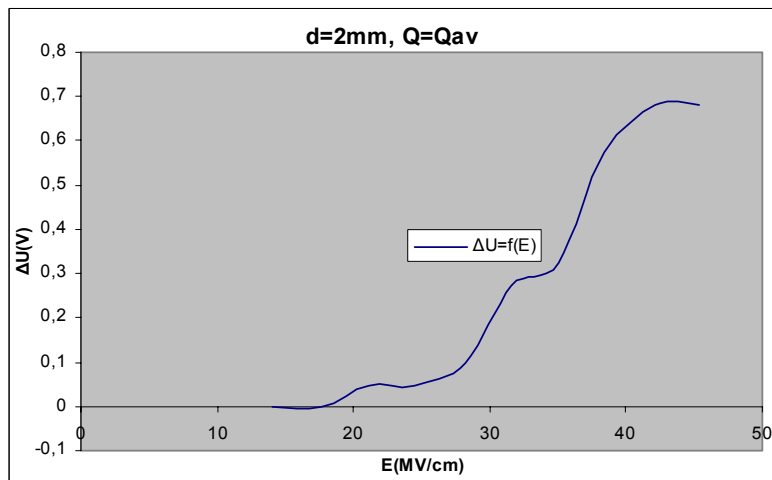
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
13,8	14,03635929					
17,3	17,59630549					
20,8	21,15625169	0,000101929	4,89258E-12	0,010350872	3E+11	2,307692308
24,1	24,51277239	8,61195E-05	3,9615E-12	0,009710729	2,875E+11	1,908713693
27,7	28,17443133	0,00010992	1,08821E-11	0,030659699	6,1875E+11	3,57400722
31,1	31,63266478	0,000162578	4,43837E-11	0,1403974	1,7063E+12	8,778135048
34,5	35,09089823	0,000159412	5,14902E-11	0,18068366	2,0188E+12	9,362318841
37,8	38,44741893	0,000193787	1,1104E-10	0,426920518	3,5813E+12	15,15873016
41,4	42,10907788	0,00019275	1,3107E-10	0,551922963	4,25E+12	16,42512077
44,6	45,36388583	0,000179314	1,22472E-10	0,55557942	4,2688E+12	15,31390135

Πίνακας Β 2.3.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

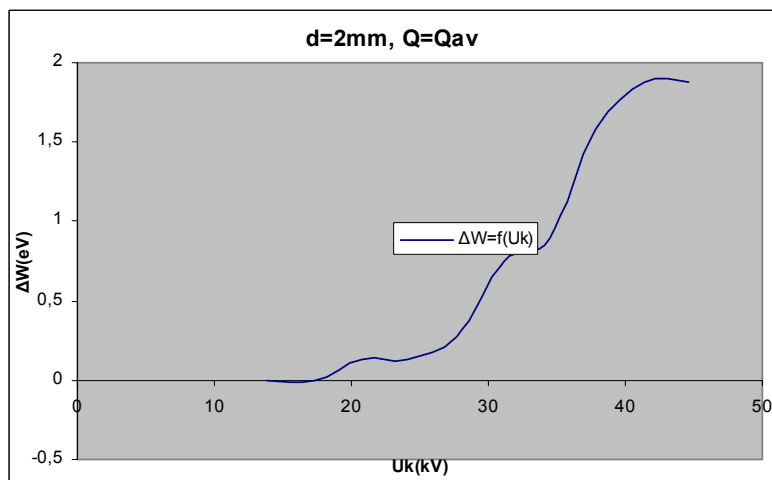
Πίνακες Β 2.3.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



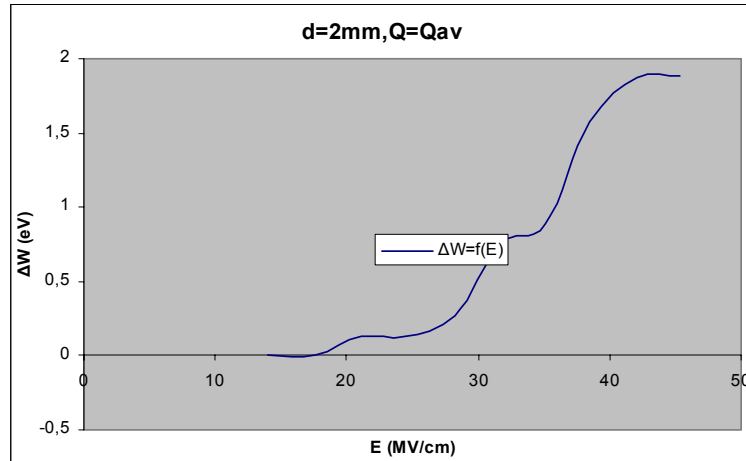
Σχήμα Β 2.3.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



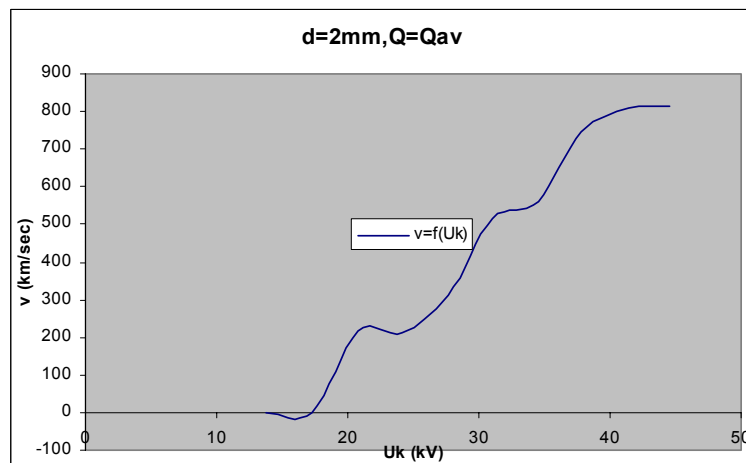
Σχήμα Β 2.3.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



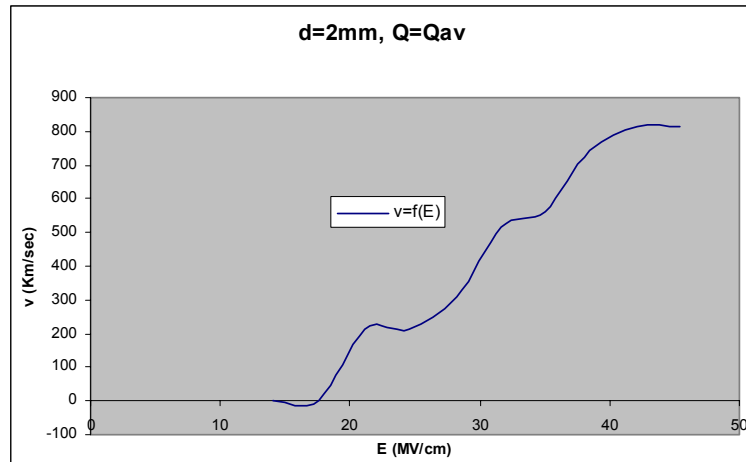
Σχήμα Β 2.3.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



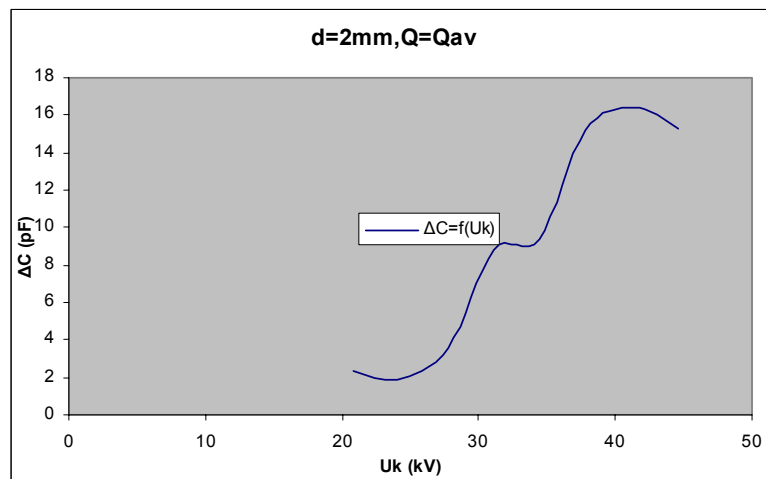
Σχήμα Β 2.3.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



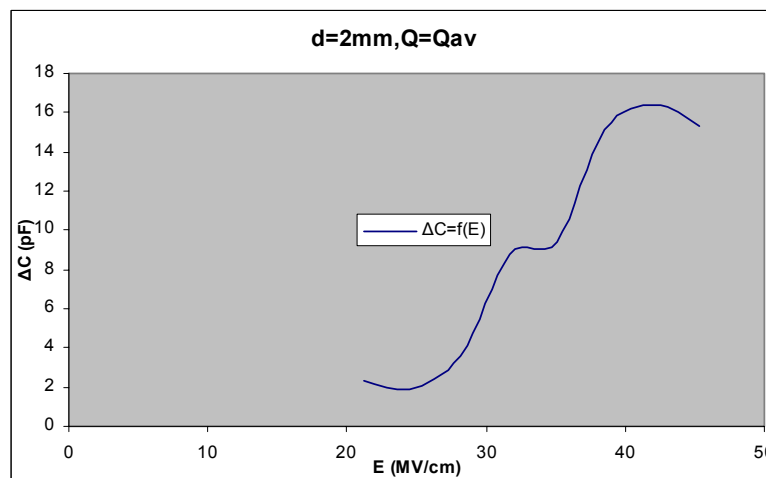
Σχήμα Β 2.3.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



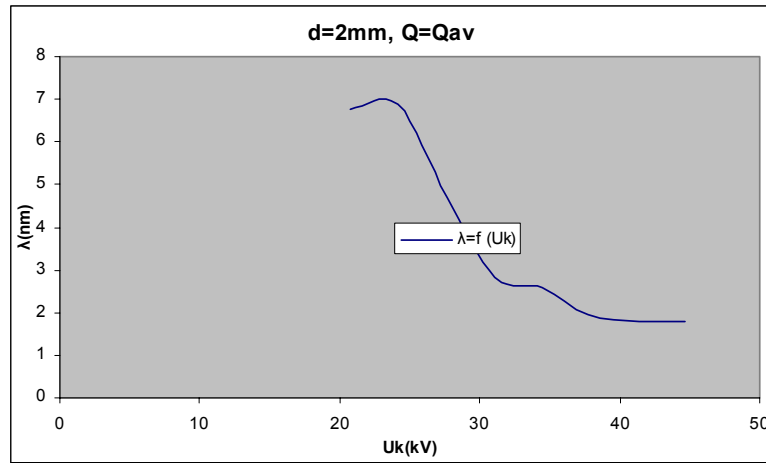
Σχήμα Β 2.3.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



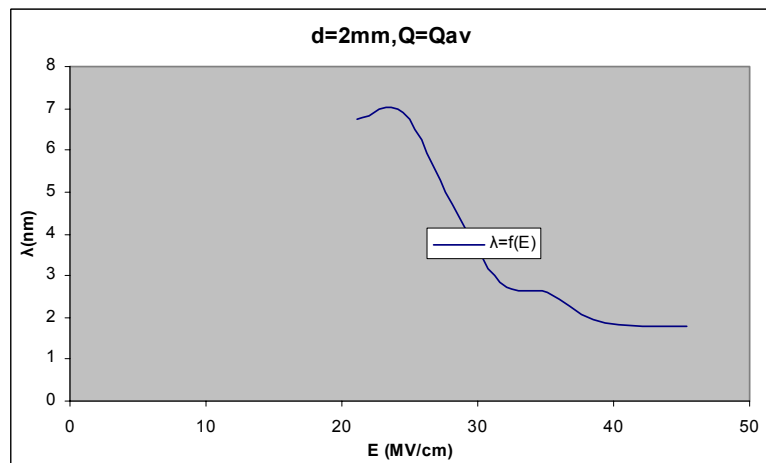
Σχήμα Β 2.3.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



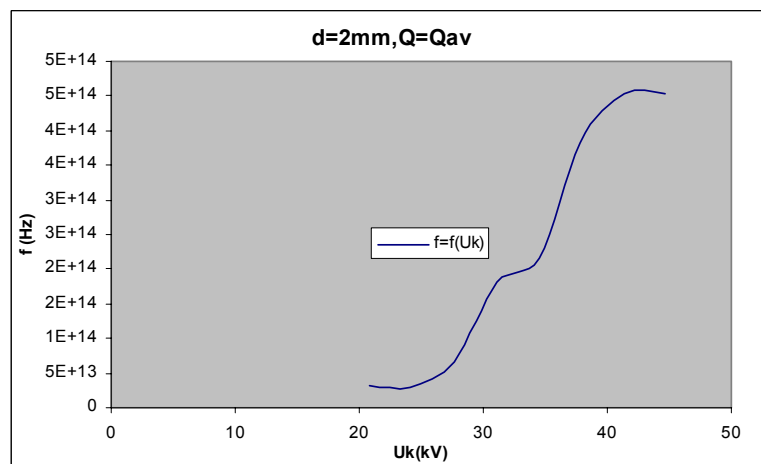
Σχήμα Β 2.3.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



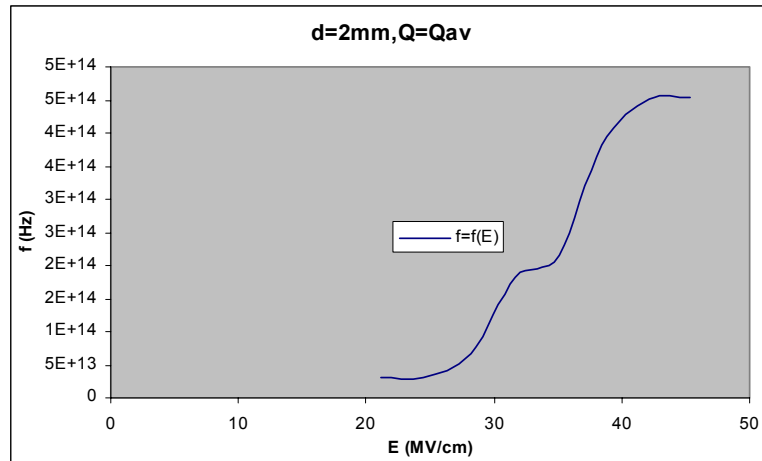
Σχήμα Β 2.3.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



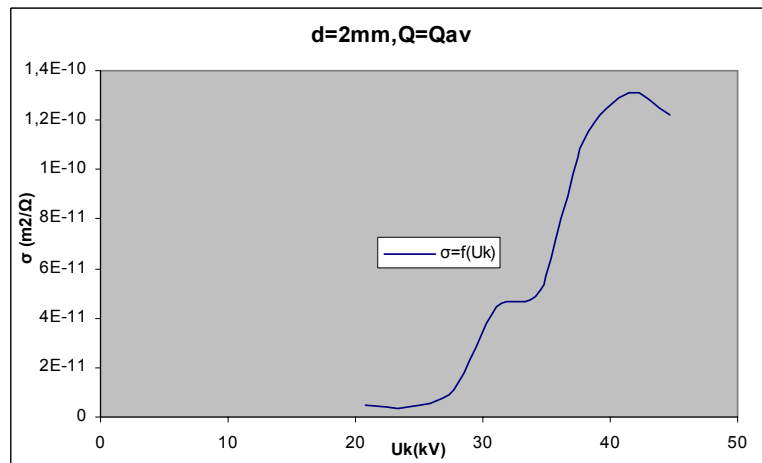
Σχήμα Β 2.3.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



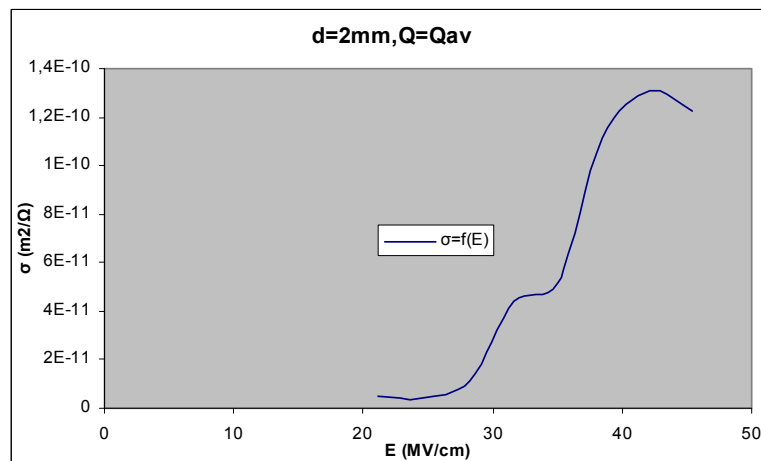
Σχήμα Β 2.3.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



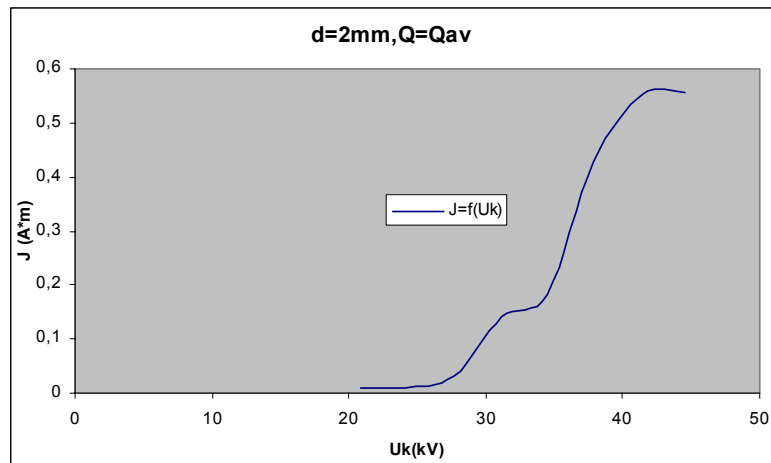
Σχήμα B 2.3.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



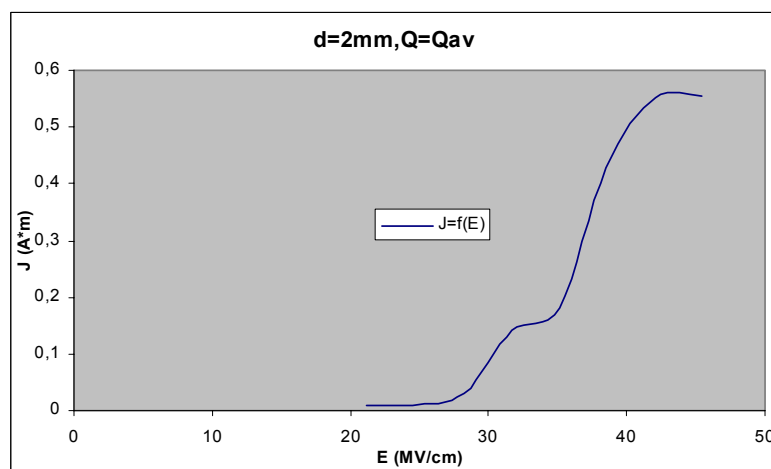
Σχήμα B 2.3.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα B 2.3.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.3.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.3.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.4. d=2mm, Μέση Τιμή Φορτίου, αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης

Uk (kV)	Q1,av (μCb)	y1	Q2,av (μCb)	y2	$\Delta\text{Q,av}$ (μCb)
-14	0,1	0,003			
-17,4	0,071	0,004			
-21,2	0,085	0,004	0,1	0,004	0,015
-24,6	0,089	0,008	0,15	0,01	0,061
-28,3	0,094	0	0,16	0,03	0,066
-31,8	0,081	0	0,24	0,05	0,159
-35,1	0,087	0,006	0,34	0,08	0,253
-38,6	0,067	0	0,42	0,13	0,353
-42,4	0,067	0	0,88	0,44	0,813
-44,8	0,067	0	0,79	0,32	0,723

Πίνακας Β 2.4.1 Μέση Μέση Τιμή (Q1,av και Q2,av) και Τυπική Απόκλιση (y1 και y2)
Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

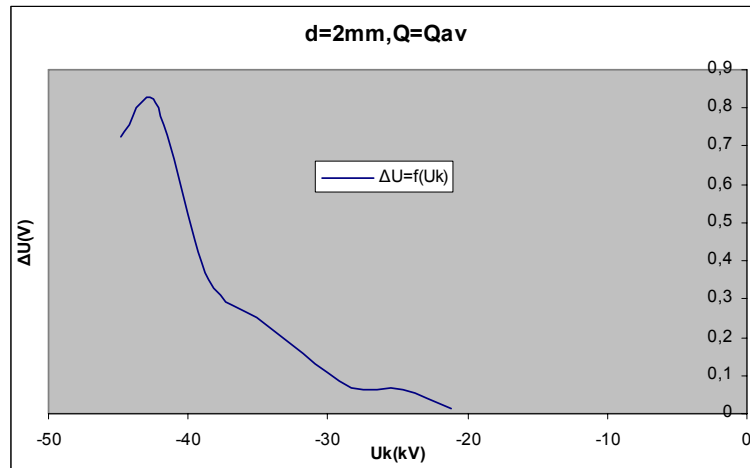
Uk (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
-14	-14,2397848						
-17,4	-17,6980182						
-21,2	-21,5631027	0,015	0,041325	Υπέρυθρη	120,5481984	12,08052658	9,9787E+12
-24,6	-25,0213361	0,061	0,168055	Υπέρυθρη	243,097231	5,990548342	4,058E+13
-28,3	-28,7847078	0,066	0,18183	Υπέρυθρη	252,8640342	5,759165075	4,3906E+13
-31,8	-32,3446540	0,159	0,438045	Υπέρυθρη	392,4764989	3,710504242	1,0577E+14
-35,1	-35,7011747	0,253	0,697015	Υπέρυθρη	495,0799691	2,941516129	1,6831E+14
-38,6	-39,2611209	0,353	0,972515	Υπέρυθρη	584,7933795	2,490256842	2,3483E+14
-42,4	-43,1262054	0,813	2,239815	Φωτεινή	887,4836634	1,640915517	5,4085E+14
-44,8	-45,5673113	0,723	1,991865	Υπέρυθρη	836,9205721	1,740052477	4,8097E+14

Πίνακας Β 2.4.2 (α) Άλμα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

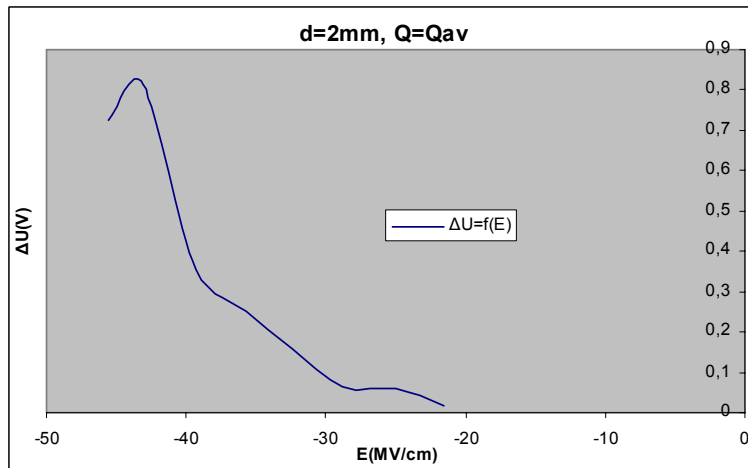
Uk (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
-14	-14,2397848					
-17,4	-17,6980182					
-21,2	-21,5631027	5,59048E-05	8,38573E-13	0,001808223	9,375E+10	0,70754717
-24,6	-25,0213361	9,7156E-05	5,92651E-12	0,014828931	3,8125E+11	2,479674797
-28,3	-28,7847078	8,78467E-05	5,79788E-12	0,016689026	4,125E+11	2,332155477
-31,8	-32,3446540	0,000121342	1,92934E-11	0,062403763	9,9375E+11	5
-35,1	-35,7011747	0,000138673	3,50843E-11	0,125255232	1,5813E+12	7,207977208
-38,6	-39,2611209	0,00014895	5,25793E-11	0,206432063	2,2063E+12	9,14507772
-42,4	-43,1262054	0,000205788	1,67305E-10	0,721524218	5,0813E+12	19,1745283
-44,8	-45,5673113	0,000183667	1,32791E-10	0,605093574	4,5188E+12	16,13839286

Πίνακας Β 2.4.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

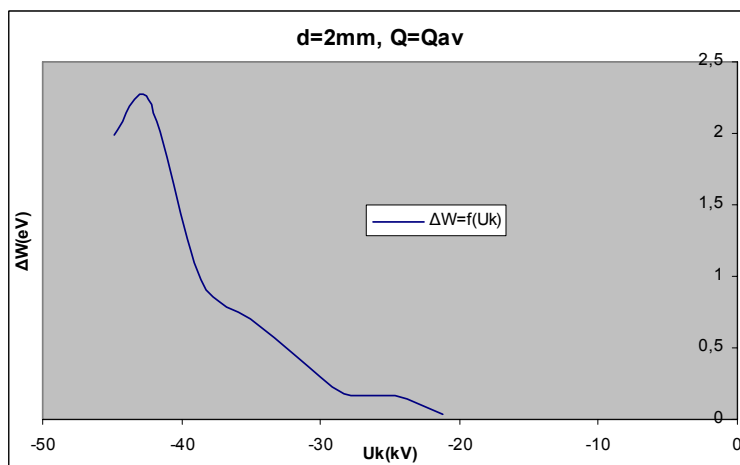
Πίνακες Β 2.4.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



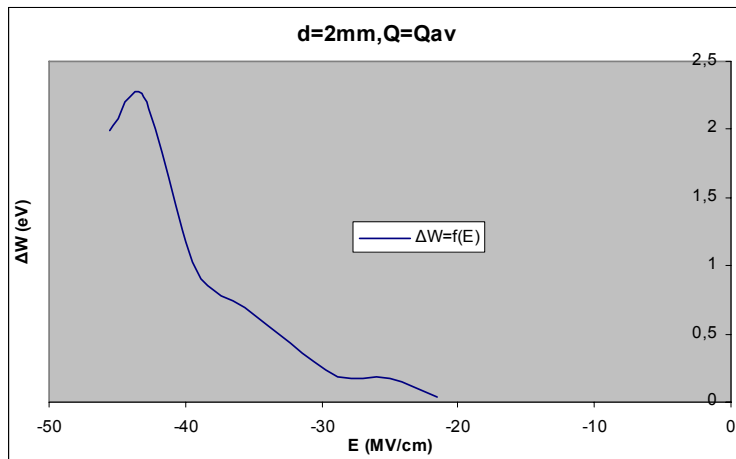
Σχήμα B 2.4.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



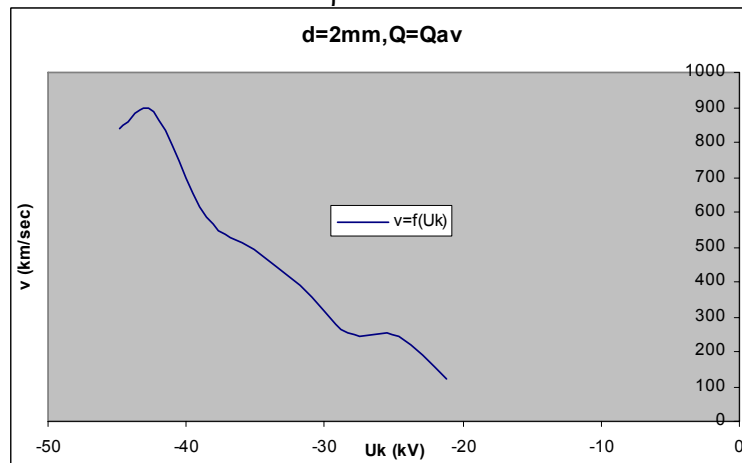
Σχήμα B 2.4.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



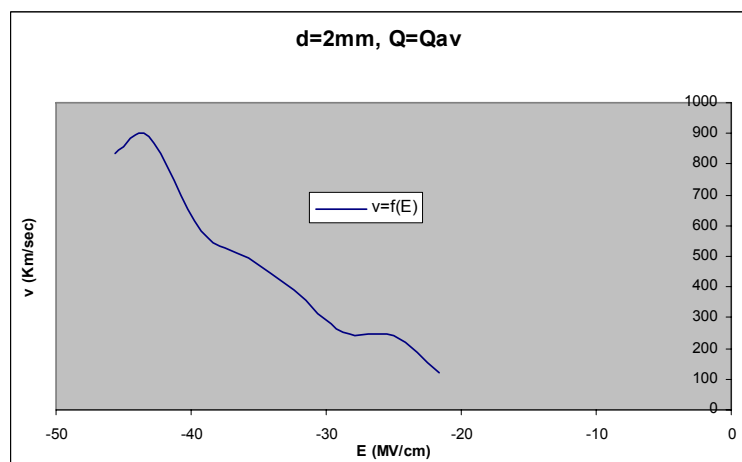
Σχήμα B 2.4.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



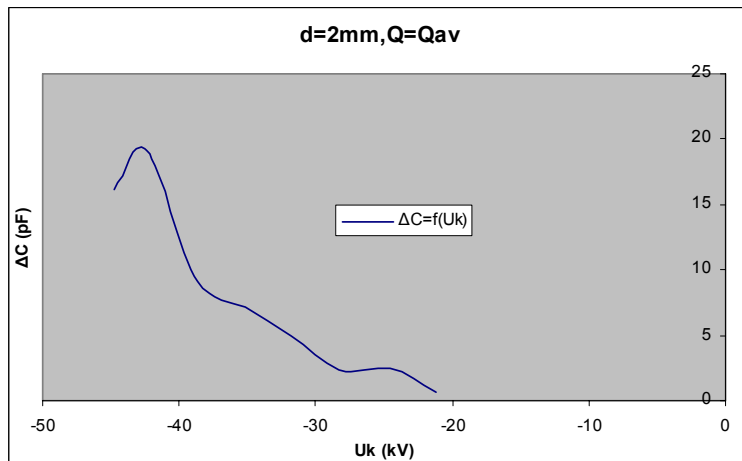
Σχήμα B 2.4.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



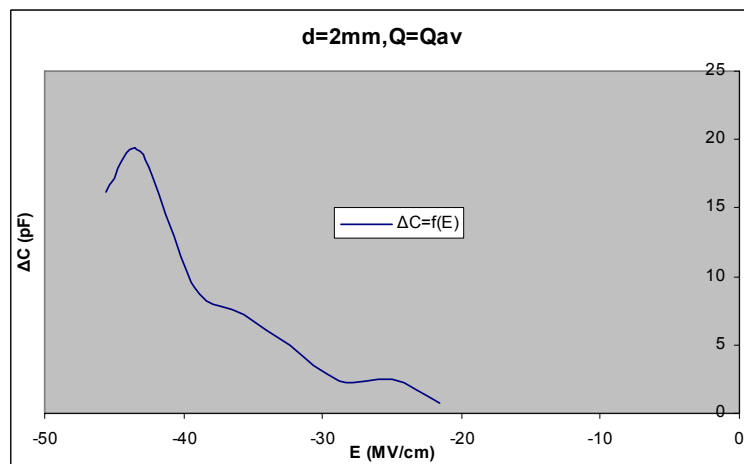
Σχήμα B 2.4.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



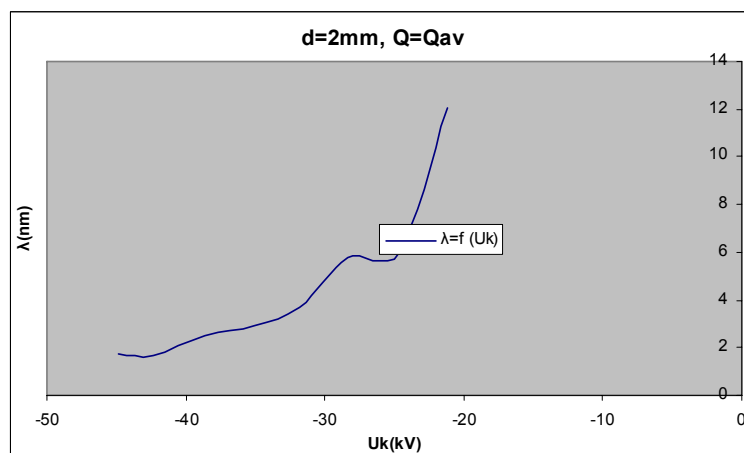
Σχήμα B 2.4.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



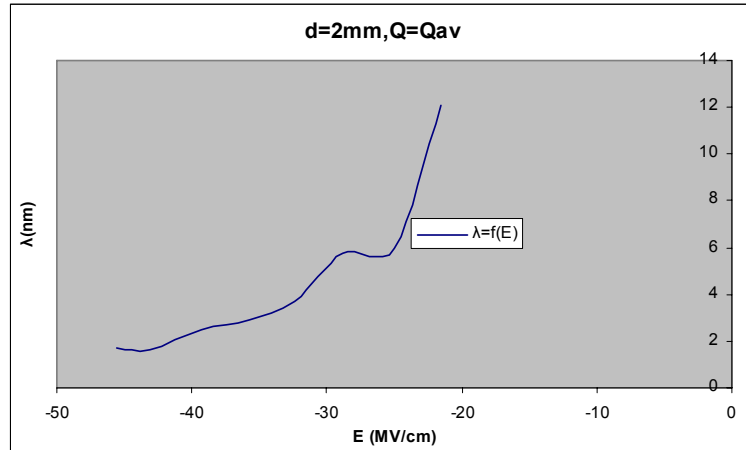
Σχήμα Β 2.4.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



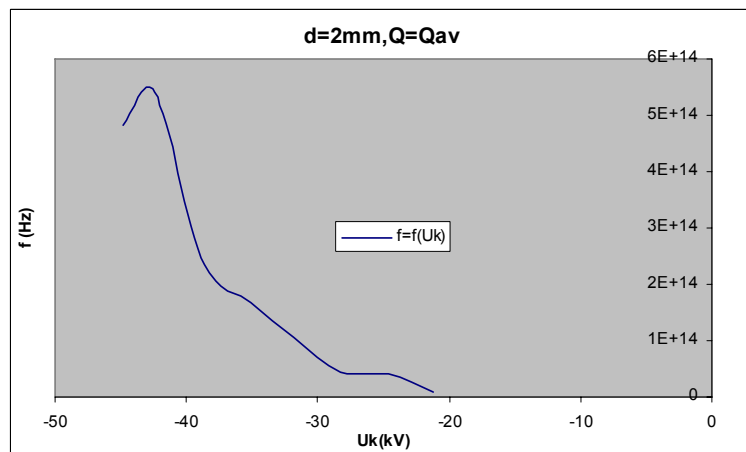
Σχήμα Β 2.4.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



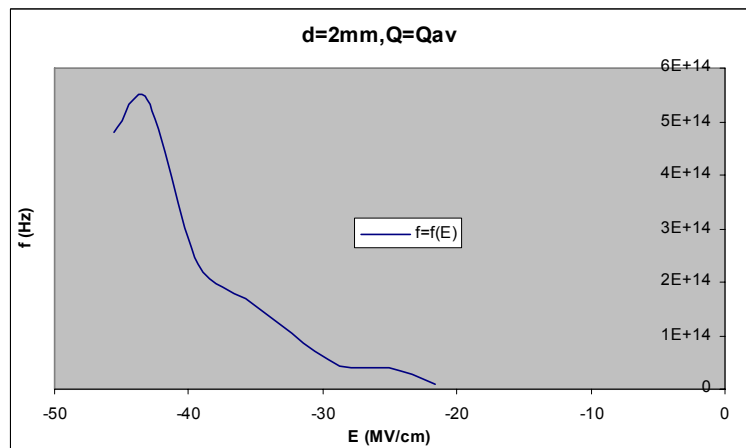
Σχήμα Β 2.4.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



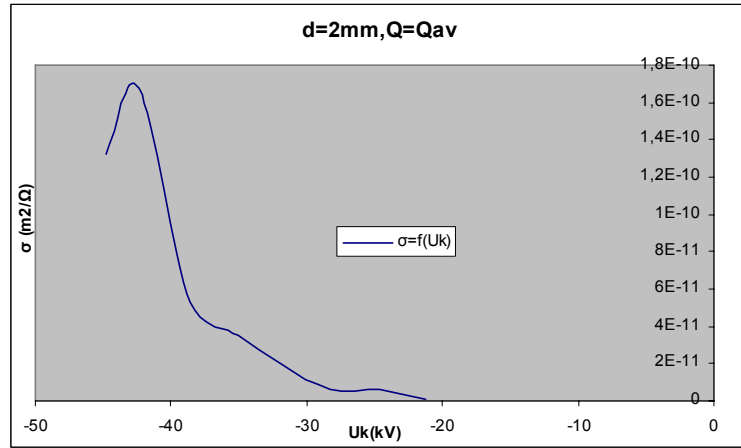
Σχήμα Β 2.4.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



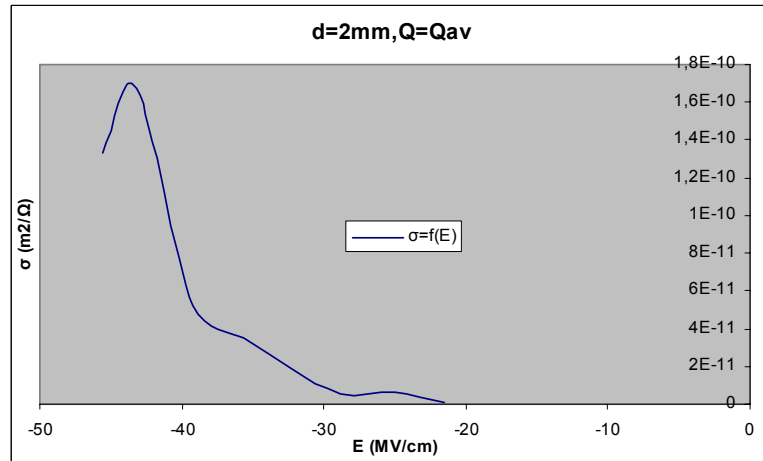
Σχήμα Β 2.4.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



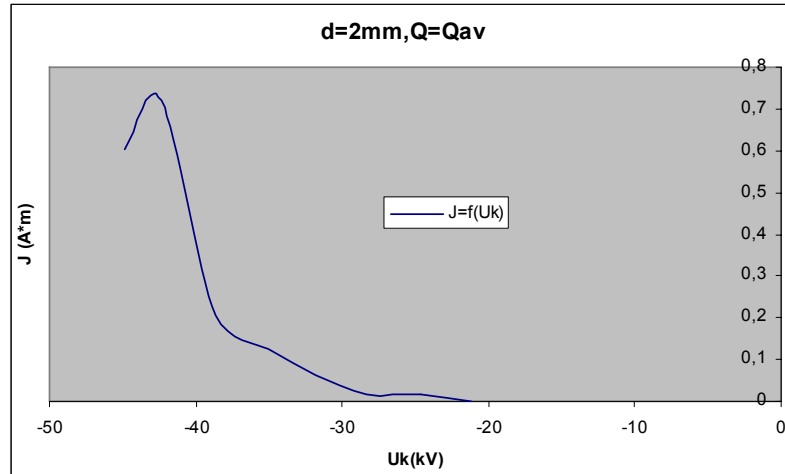
Σχήμα Β 2.4.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



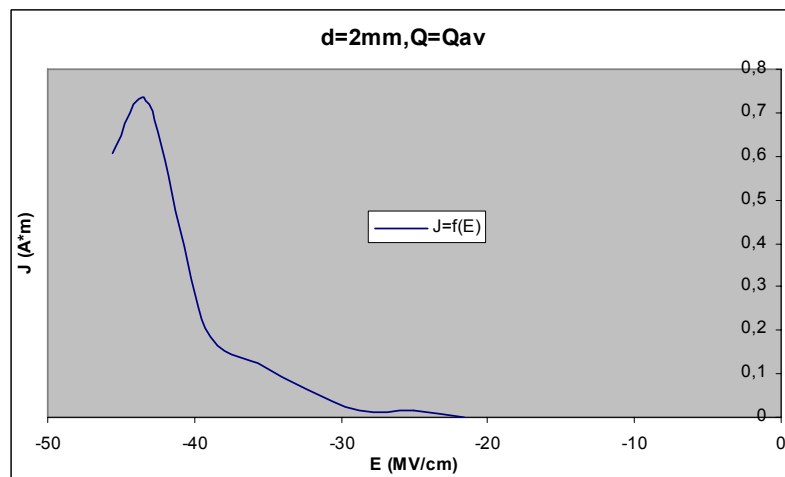
Σχήμα Β 2.4.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.4.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.4.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.4.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.5 d=1mm, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, θετική πολικότητα κρουστικής τάσης

U _k (kV)	Q _{1,max} (μCb)	Q _{2,max} (μCb)	ΔQ _{max} (μCb)
10,1	0,017		
13,4	0,02	0,029	0,009
16,8	0,052	0,065	0,013
20,1	0,027	0,106	0,079
23,4	0,054	0,41	0,356
26,7	0,067	0,8	0,733
30,2	0,067	1,15	1,083
33,5	0,067	1,68	1,613
36,9	0,067	2,25	2,183
40,2	0,13	3,64	3,510
43,6	0,000	4,510	4,510

Πίνακας Β 2.5.1 Μέγιστη Τιμή (Q_{1,max} και Q_{2,max}) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

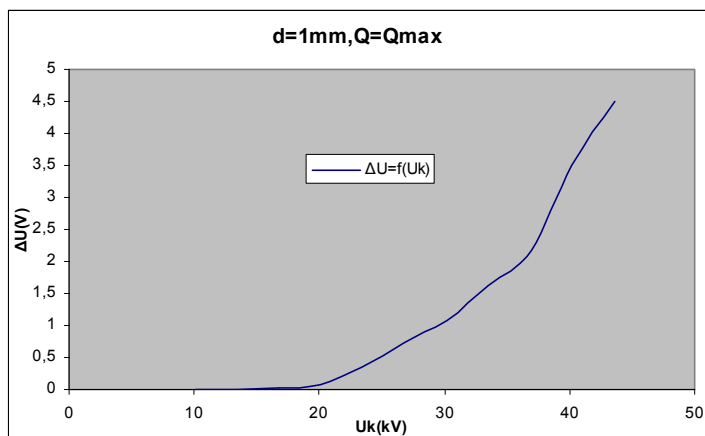
U_k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
10,1	15,04667386	0	0		0		
13,4	19,96291383	0,009	0,024795	Υπέρυθρη	93,37623295	15,59589275	5,98723E+12
16,8	25,02813078	0,013	0,035815	Υπέρυθρη	112,2242653	12,97656715	8,64822E+12
20,1	29,94437075	0,079	0,217645	Υπέρυθρη	276,6487041	5,264025071	5,25546E+13
23,4	34,86061072	0,356	0,98078	Υπέρυθρη	587,2730799	2,479741988	2,36828E+14
26,7	39,7768507	0,733	2,019415	Φωτεινή	842,6885285	1,728142327	4,87627E+14
30,2	44,99104461	1,083	2,983665	Φωτεινή	1024,305071	1,421730454	7,20464E+14
33,5	49,90728458	1,613	4,443815	Φωτεινή	1250,064086	1,164968845	1,07305E+15
36,9	54,97250152	2,183	6,014165	Φωτεινή	1454,259677	1,001393174	1,45224E+15
40,2	59,8887415	3,51	9,67005	Υπεριώδης	1844,032848	0,789728728	2,33502E+15
43,6	64,95395844	4,51	12,42505	Υπεριώδης	2090,274707	0,69669585	3,00027E+15

Πίνακας Β 2.5.2 (α) Άλμα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

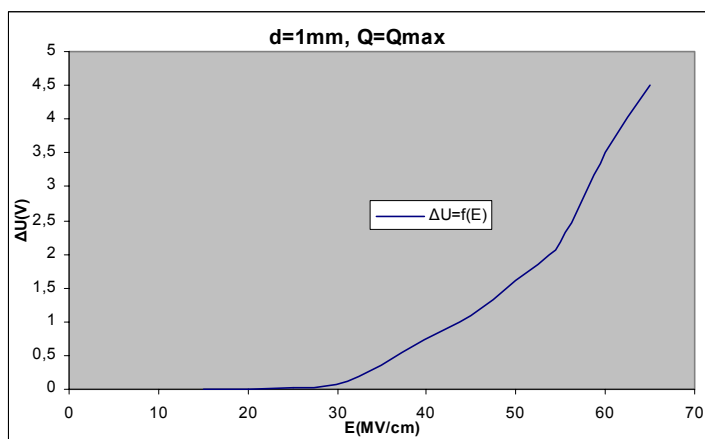
U_k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
10,1	15,04667386	0			0	0
13,4	19,96291383	4,67749E-05	4,20974E-13	0,000840386	56250000000	0,671641791
16,8	25,02813078	4,48393E-05	5,8291E-13	0,001458915	81250000000	0,773809524
20,1	29,94437075	9,23875E-05	7,29862E-12	0,021855248	4,9375E+11	3,930348259
23,4	34,86061072	0,000168463	5,99729E-11	0,209069216	2,225E+12	15,21367521
26,7	39,7768507	0,000211854	1,55289E-10	0,617690691	4,58125E+12	27,45318352
30,2	44,99104461	0,000227669	2,46565E-10	1,109322392	6,76875E+12	35,86092715
33,5	49,90728458	0,000250477	4,0402E-10	2,016353371	1,00813E+13	48,14925373
36,9	54,97250152	0,000264543	5,77498E-10	3,174648875	1,36438E+13	59,1598916
40,2	59,8887415	0,00030791	1,08076E-09	6,472555295	2,19375E+13	87,31343284
43,6	64,95395844	0,000321809	1,45136E-09	9,42713893	2,81875E+13	103,440367

Πίνακας Β 2.5.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

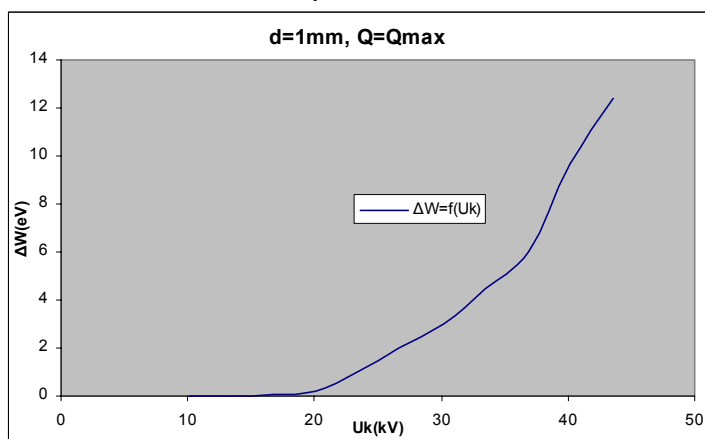
Πίνακες Β 2.5.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



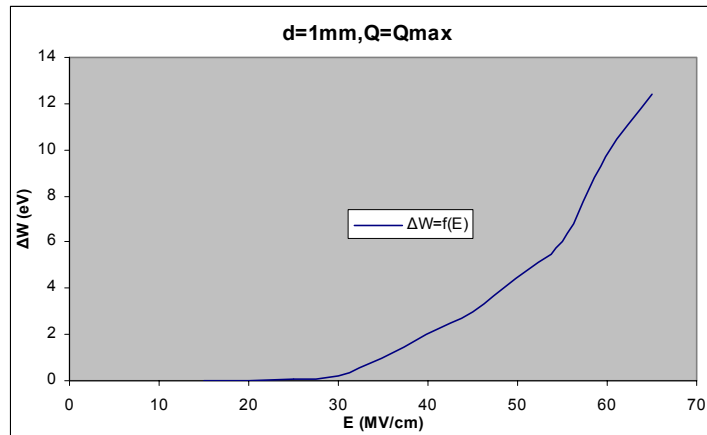
Σχήμα B 2.5.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



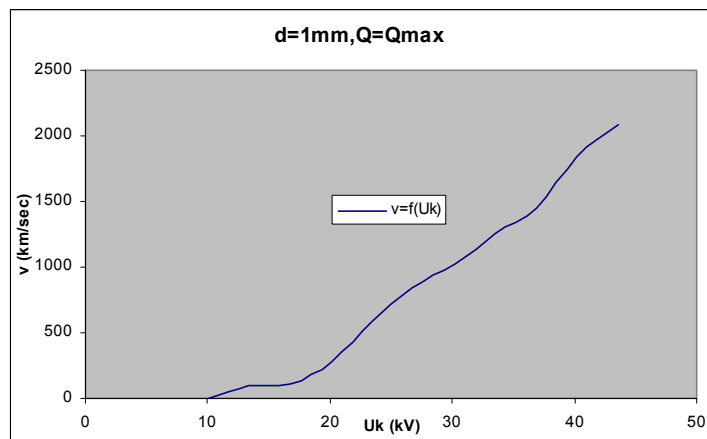
Σχήμα B 2.5.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



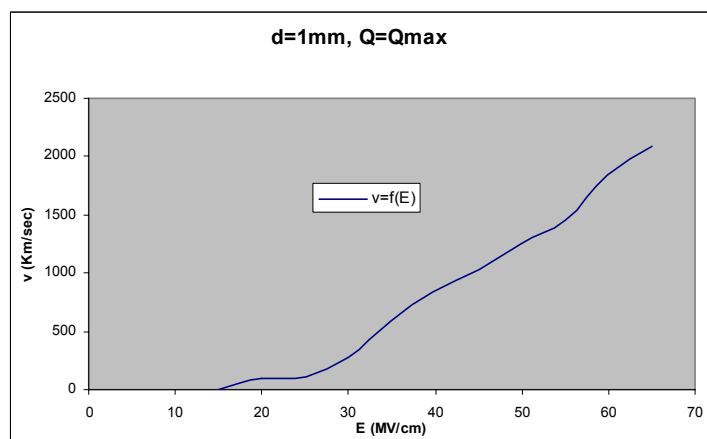
Σχήμα B 2.5.3 Μεταβολή Ενέργειας H/M Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



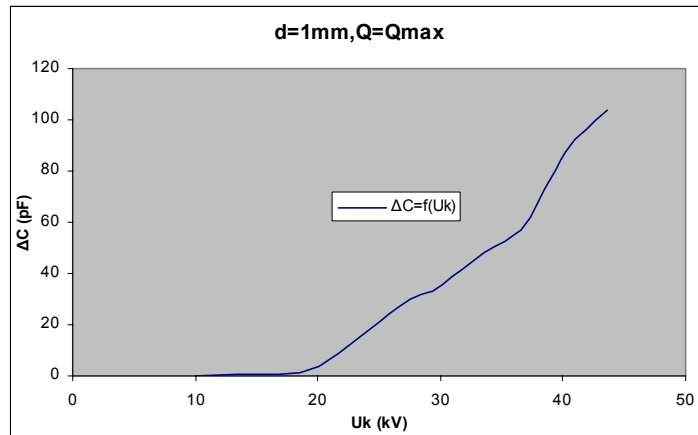
Σχήμα Β 2.5.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



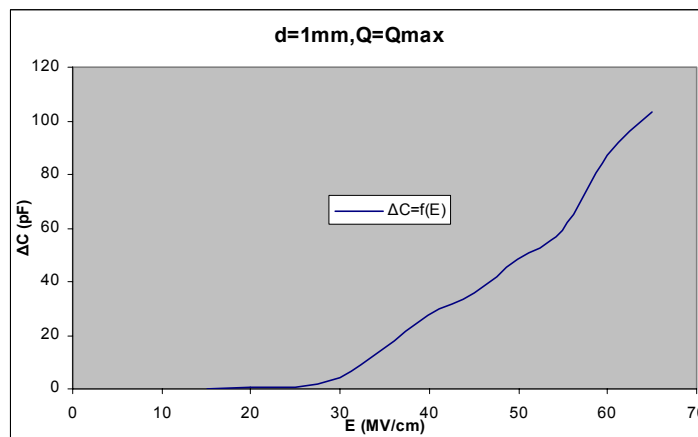
Σχήμα Β 2.5.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



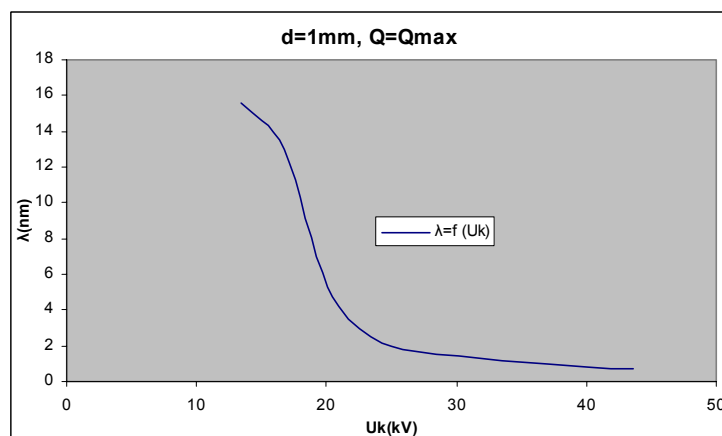
Σχήμα Β 2.5.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



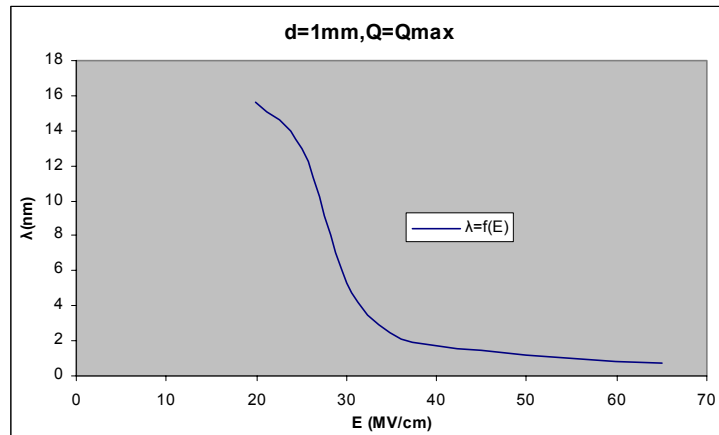
Σχήμα B 2.5.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



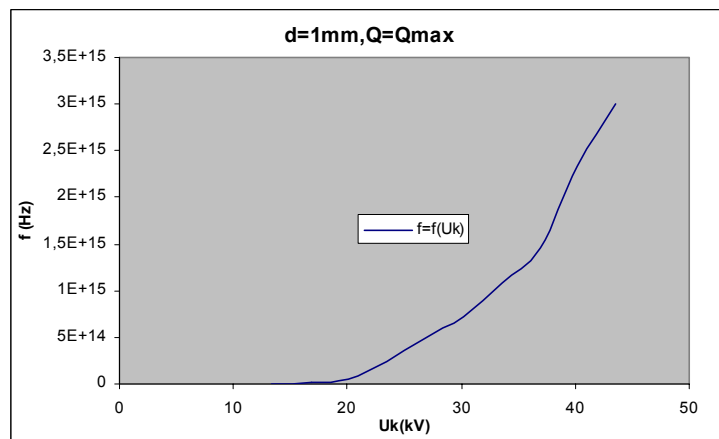
Σχήμα B 2.5.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



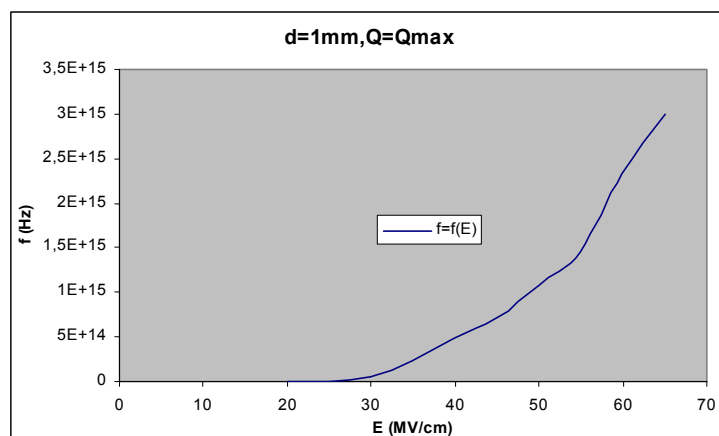
Σχήμα B 2.5.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



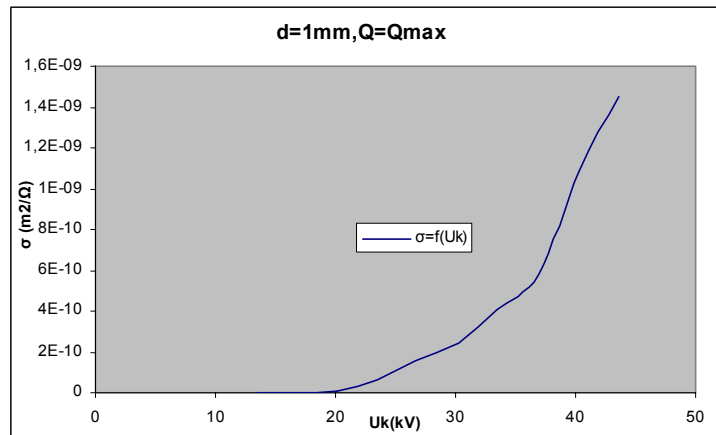
Σχήμα Β 2.5.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



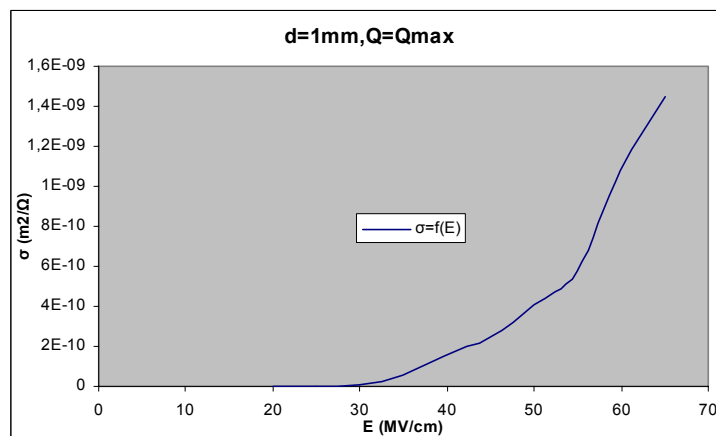
Σχήμα Β 2.5.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



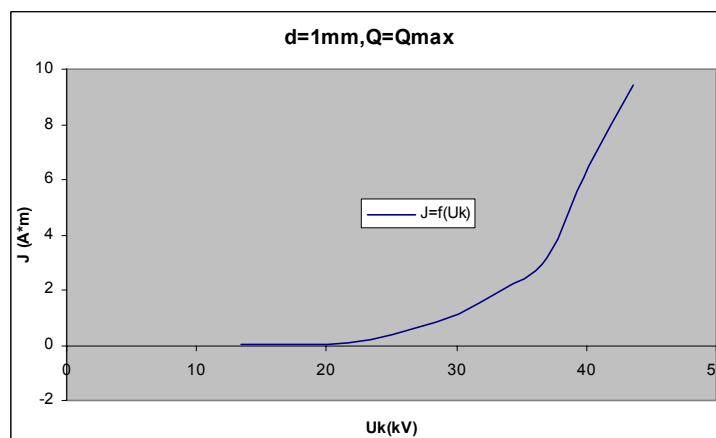
Σχήμα Β 2.5.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



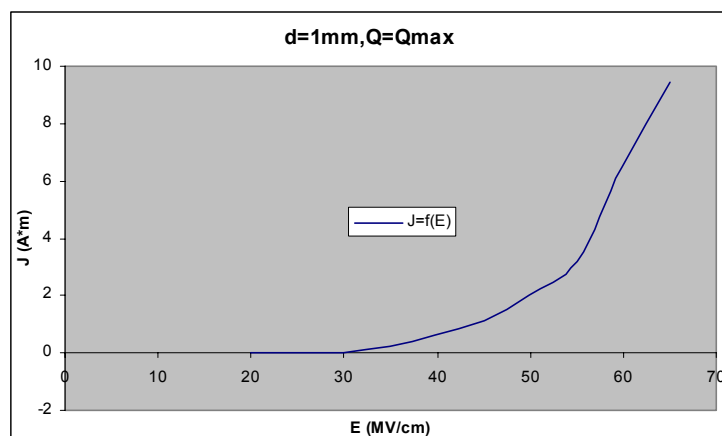
Σχήμα Β 2.5.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.5.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.5.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.5.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.6 d=1mm, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, θετική πολικότητα κρουστικής τάσης

U _k (kV)	Q _{1,min} (μC _b)	Q _{2,min} (μC _b)	ΔQ <sub,min< sub=""> (μC_b)</sub,min<>
10,1	0,013		
13,4	0,018	0,027	0,009
16,8	0,048	0,053	0,005
20,1	0,021	0,086	0,065
23,4	0,054	0,25	0,196
26,7	0,067	0,68	0,613
30,2	0,067	0,91	0,843
33,5	0,067	1,34	1,273
36,9	0,067	1,73	1,663
40,2	0,13	2,64	2,510
43,6	0,000	3,690	3,690

Πίνακας Β 2.6.1 Ελάχιστη Τιμή (Q_{1,min} και Q_{2,min}) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

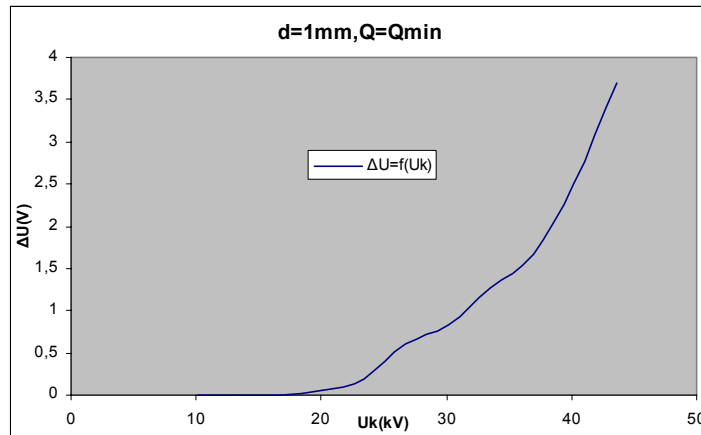
Uk (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
10,1	15,04667386	0	0		0		
13,4	19,96291383	0,009	0,024795	Υπέρυθρη	93,37623295	15,59589275	5,98723E+12
16,8	25,02813078	0,005	0,013775	Υπέρυθρη	69,59853478	20,92408581	3,32624E+12
20,1	29,94437075	0,065	0,179075	Υπέρυθρη	250,9410859	5,803297253	4,32411E+13
23,4	34,86061072	0,196	0,53998	Υπέρυθρη	435,7557537	3,341977018	1,30389E+14
26,7	39,7768507	0,613	1,688815	Υπέρυθρη	770,628971	1,889736526	4,07797E+14
30,2	44,99104461	0,843	2,322465	Φωτεινή	903,7095712	1,611453238	5,60804E+14
33,5	49,90728458	1,273	3,507115	Φωτεινή	1110,527446	1,311345991	8,46861E+14
36,9	54,97250152	1,663	4,581565	Φωτεινή	1269,291054	1,147322129	1,10631E+15
40,2	59,8887415	2,51	6,91505	Φωτεινή	1559,379984	0,933887654	1,66977E+15
43,6	64,95395844	3,69	10,16595	Υπεριώδης	1890,724613	0,770226243	2,45477E+15

Πίνακας Β 2.6.2 (α) Άλλα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

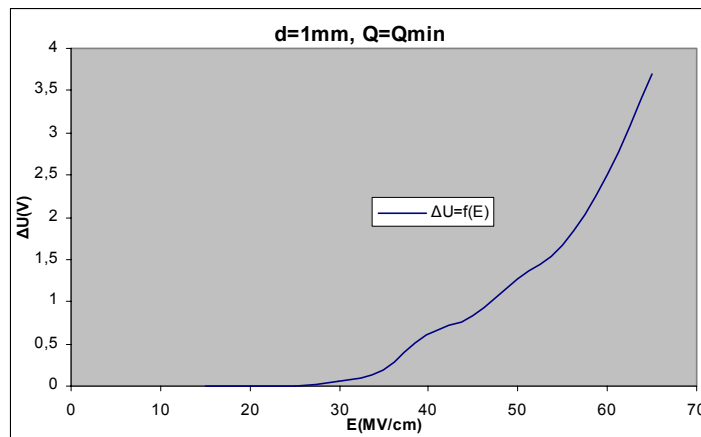
Uk (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
10,1	15,04667386	0			0	0
13,4	19,96291383	4,67749E-05	4,20974E-13	0,000840386	56250000000	0,671641791
16,8	25,02813078	2,78081E-05	1,39041E-13	0,000347993	31250000000	0,297619048
20,1	29,94437075	8,38024E-05	5,44716E-12	0,016311171	4,0625E+11	3,233830846
23,4	34,86061072	0,000124999	2,44999E-11	0,085408128	1,225E+12	8,376068376
26,7	39,7768507	0,000193738	1,18761E-10	0,472395559	3,83125E+12	22,9588015
30,2	44,99104461	0,000200864	1,69329E-10	0,761827168	5,26875E+12	27,91390728
33,5	49,90728458	0,000222518	2,83266E-10	1,413701439	7,95625E+12	38
36,9	54,97250152	0,000230896	3,83979E-10	2,110831023	1,03938E+13	45,06775068
40,2	59,8887415	0,000260379	6,53553E-10	3,914043759	1,56875E+13	62,43781095
43,6	64,95395844	0,000291087	1,07411E-09	6,97677382	2,30625E+13	84,63302752

Πίνακας Β 2.6.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

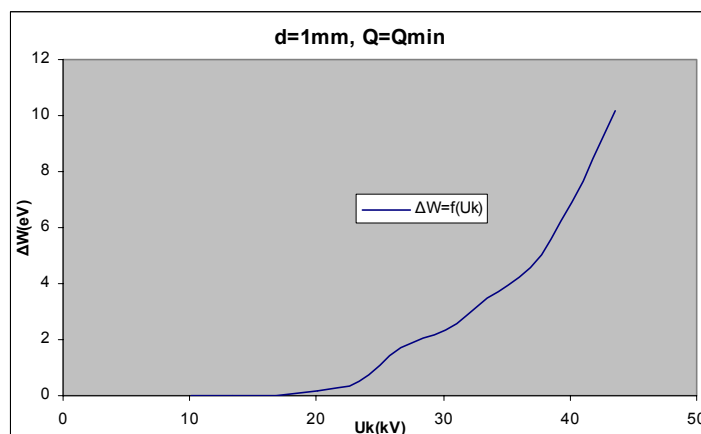
Πίνακες Β 2.6.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



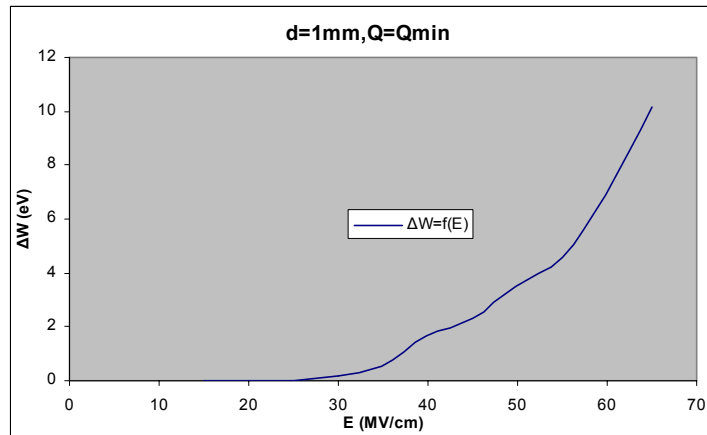
Σχήμα B 2.6.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



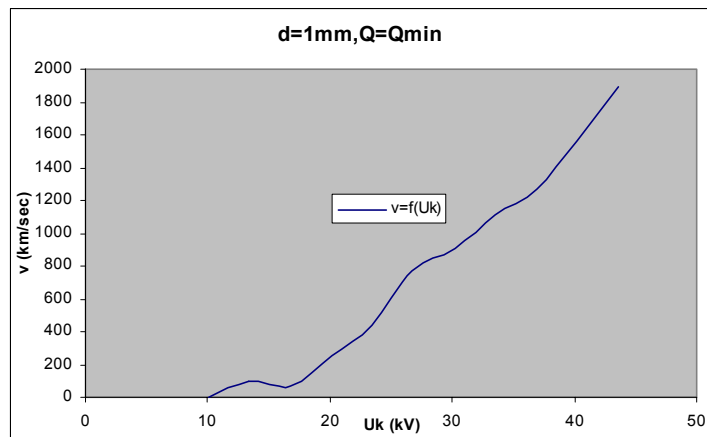
Σχήμα B 2.6.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



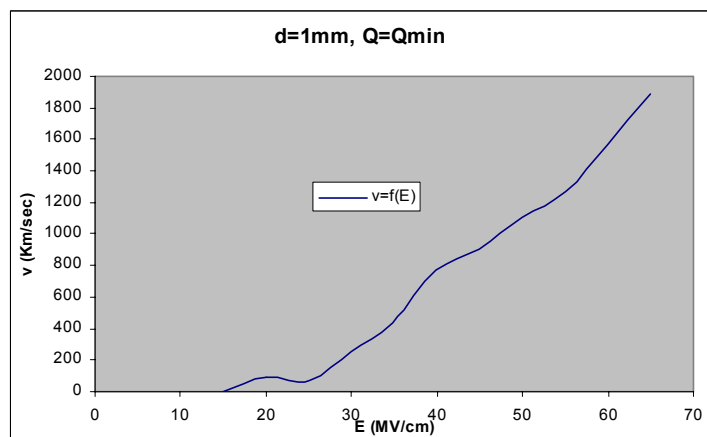
Σχήμα B 2.6.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



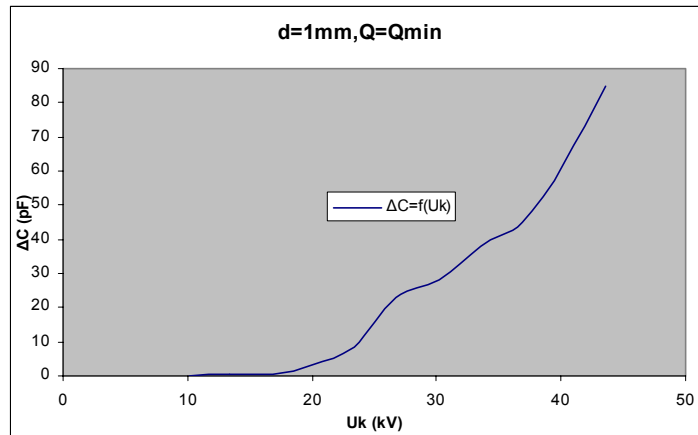
Σχήμα Β 2.6.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



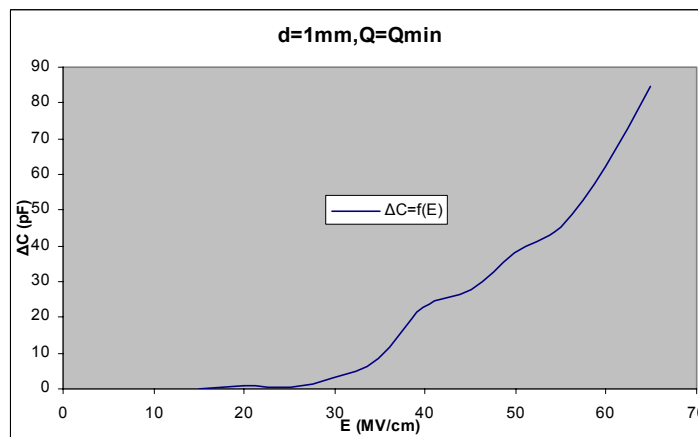
Σχήμα Β 2.6.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



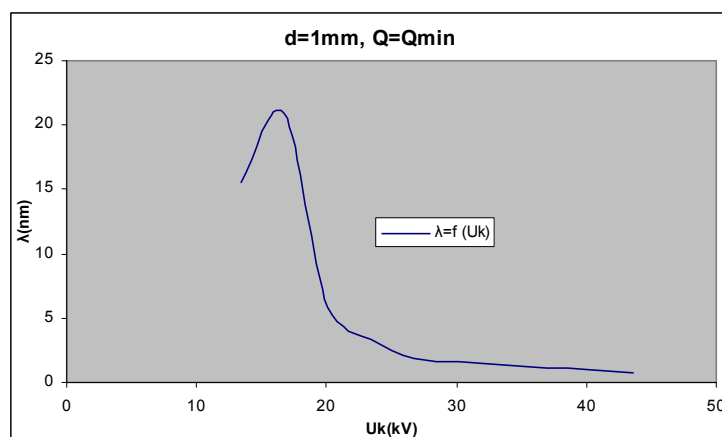
Σχήμα Β 2.6.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



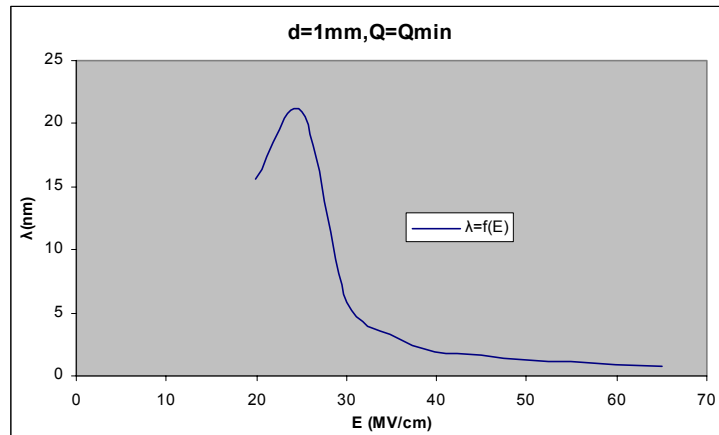
Σχήμα Β 2.6.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



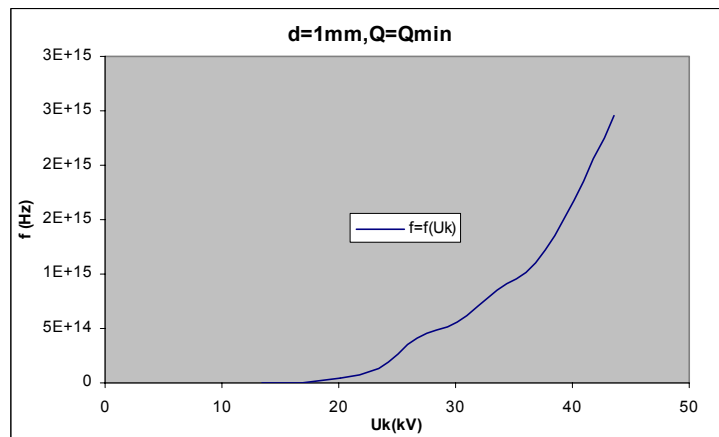
Σχήμα Β 2.6.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



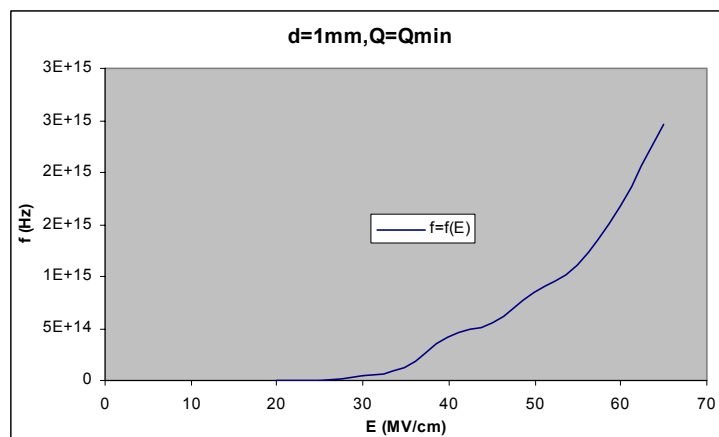
Σχήμα Β 2.6.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



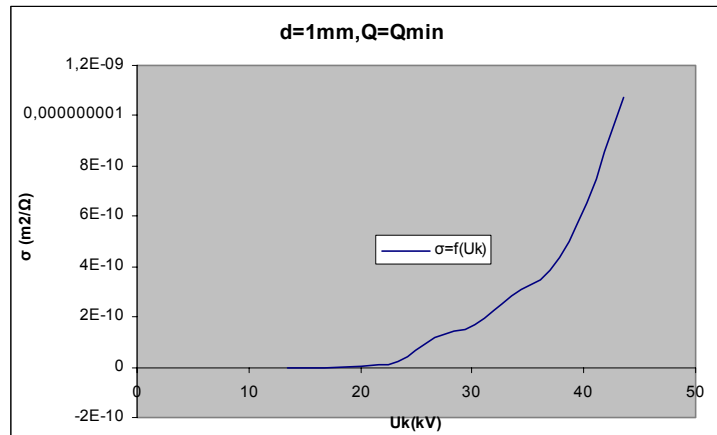
Σχήμα Β 2.6.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



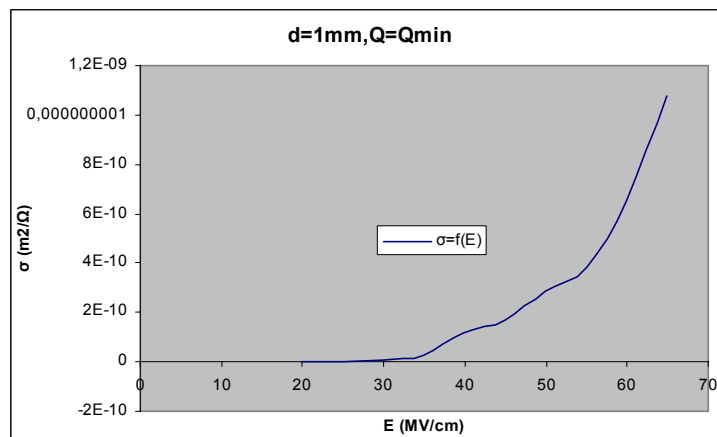
Σχήμα Β 2.6.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



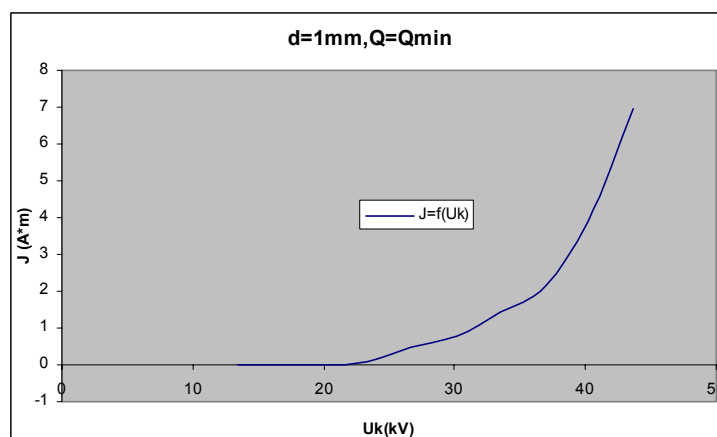
Σχήμα Β 2.6.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



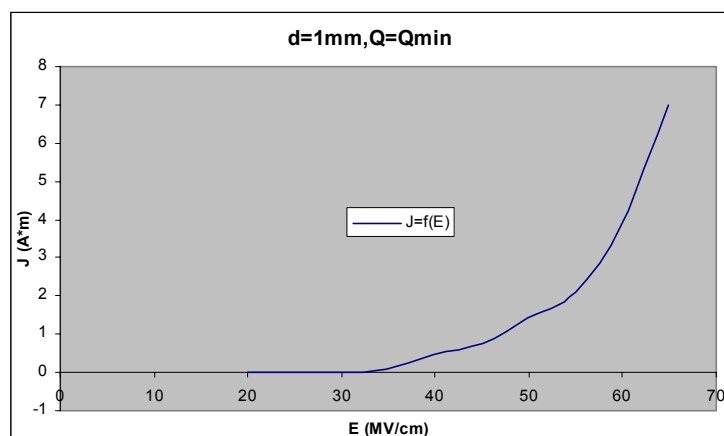
Σχήμα B 2.6.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα B 2.6.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα B 2.6.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.6.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.7 d=1mm, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης

U_k (kV)	Q_{1,max} (μC_b)	Q_{2,max} (μC_b)	$\Delta Q_{,max}$ (μC_b)
-13,8	0,076		
-17,2	0,087		
-20,7	0,088	0,15	0,062
-24,2	0,093	0,31	0,217
-27,6	0,067	0,47	0,403
-31,1	0,1	0,62	0,520
-34,5	0,067	1,14	1,073
-37,9	0,067	2,44	2,373
-41,4	0	2,8	2,800
-44,8	0	2,81	2,810

Πίνακας Β 2.7.1 Μέγιστη Τιμή(Q_{1,max} Q_{2,max}) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

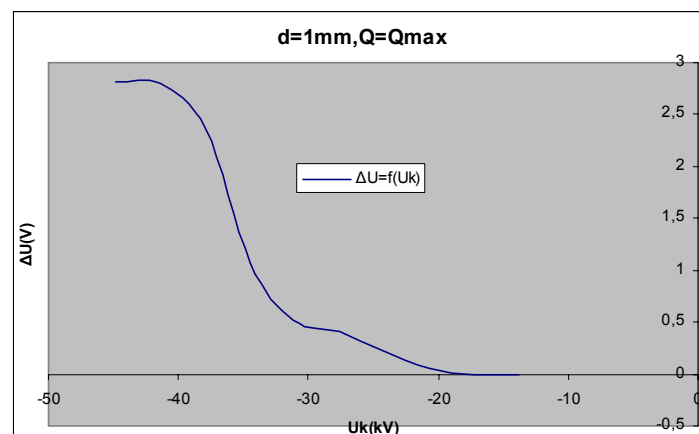
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
-13,8	-20,5588217	0	0		0		
-17,2	-25,6240387	0	0		0		
-20,7	-30,8382326	0,062	0,17081	Υπέρυθρη	245,0817312	5,942041079	4,12454E+13
-24,2	-36,0524265	0,217	0,597835	Υπέρυθρη	458,5059349	3,176154557	1,44359E+14
-27,6	-41,1176434	0,403	1,110265	Υπέρυθρη	624,8382648	2,330660263	2,68095E+14
-31,1	-46,3318373	0,52	1,4326	Υπέρυθρη	709,768574	2,051775421	3,45929E+14
-34,5	-51,3970543	1,073	2,956115	Φωτεινή	1019,565087	1,428340115	7,13811E+14
-37,9	-56,4622712	2,373	6,537615	Φωτεινή	1516,226084	0,960467393	1,57863E+15
-41,4	-61,6764651	2,8	7,714	Φωτεινή	1647,001938	0,884204008	1,86269E+15
-44,8	-66,7416821	2,81	7,74155	Φωτεινή	1649,940392	0,882629289	1,86935E+15

Πίνακας Β 2.7.2 (α) Άλλα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

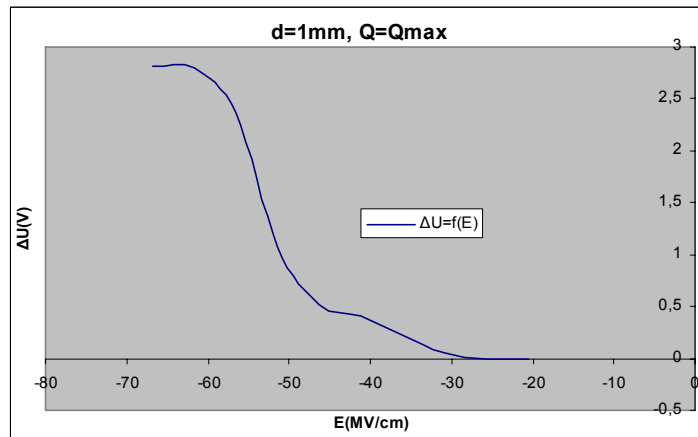
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
-13,8	-20,5588217	0			0	0
-17,2	-25,6240387	0			0	0
-20,7	-30,8382326	7,94733E-05	4,92735E-12	0,015195067	3,875E+11	2,995169082
-24,2	-36,0524265	0,000127178	2,75975E-11	0,099495788	1,35625E+12	8,966942149
-27,6	-41,1176434	0,000151964	6,12413E-11	0,251809821	2,51875E+12	14,60144928
-31,1	-46,3318373	0,000153192	7,96601E-11	0,369079658	3,25E+12	16,72025723
-34,5	-51,3970543	0,00019837	2,12851E-10	1,093993339	6,70625E+12	31,10144928
-37,9	-56,4622712	0,000268538	6,3724E-10	3,598004498	1,48313E+13	62,6121372
-41,4	-61,6764651	0,000267039	7,47709E-10	4,611605427	1,75E+13	67,63285024
-44,8	-66,7416821	0,000247213	6,94668E-10	4,636332501	1,75625E+13	62,72321429

Πίνακας Β 2.7.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

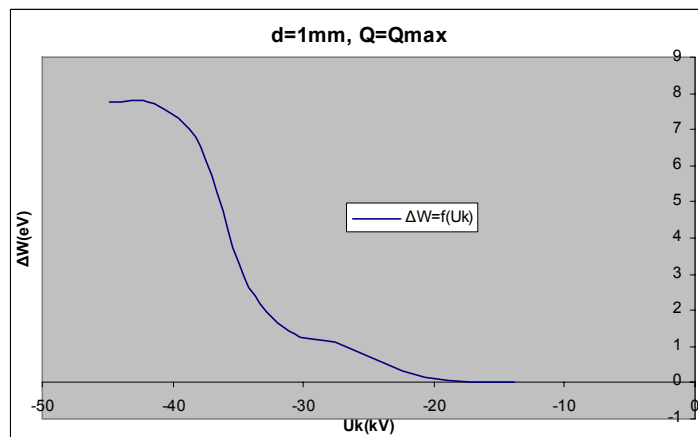
Πίνακες Β 2.7.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



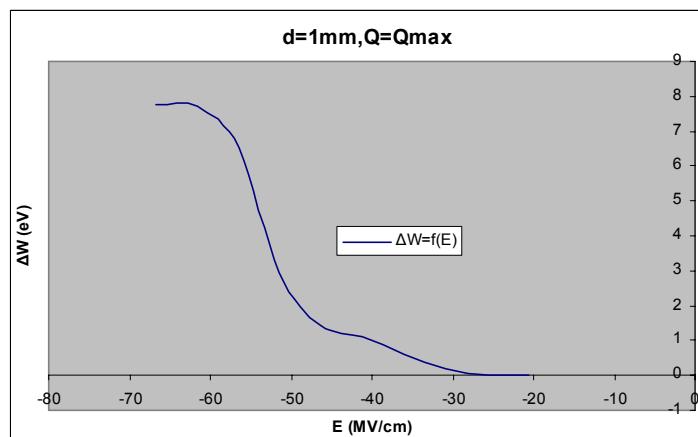
Σχήμα Β 2.7.1 Μεταβολή Άλλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



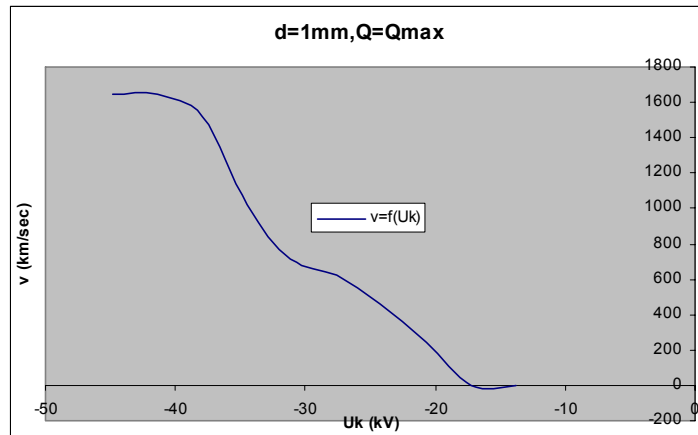
Σχήμα Β 2.7.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



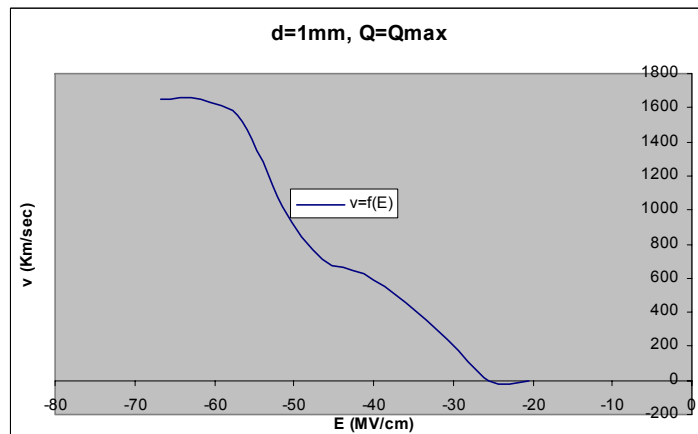
Σχήμα Β 2.7.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



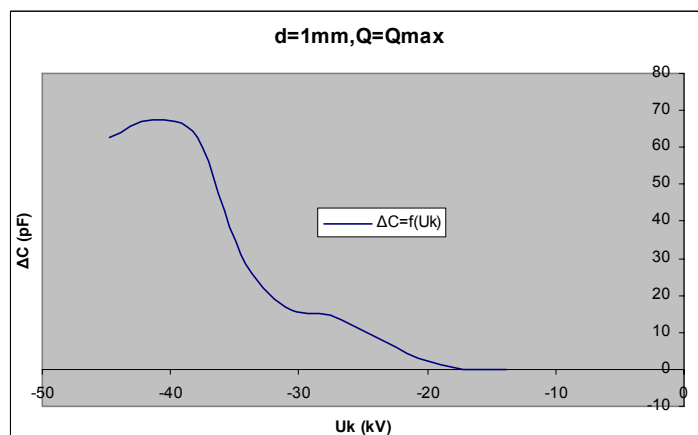
Σχήμα Β 2.7.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



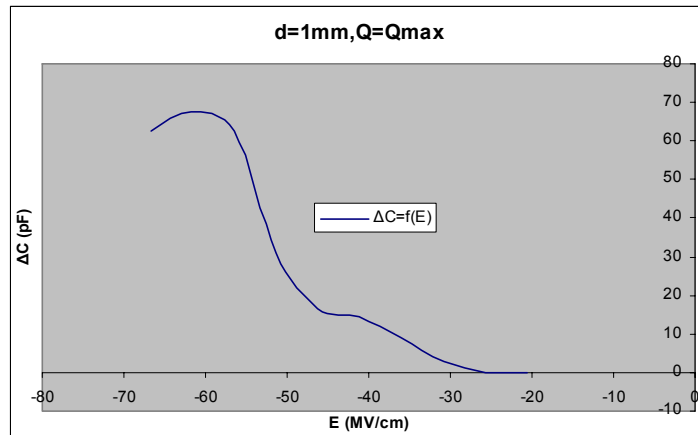
Σχήμα B 2.7.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



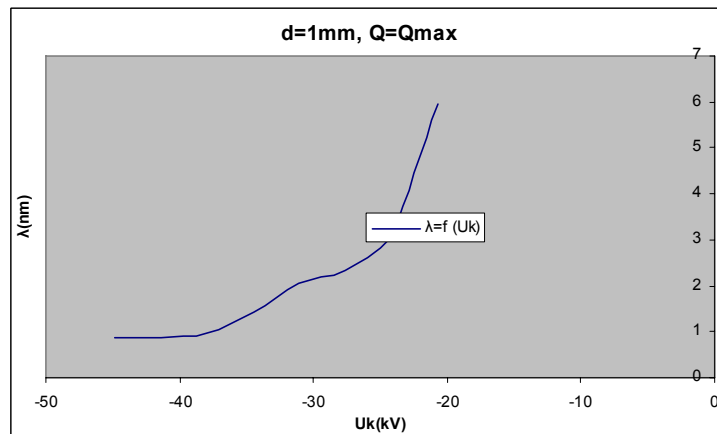
Σχήμα B 2.7.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



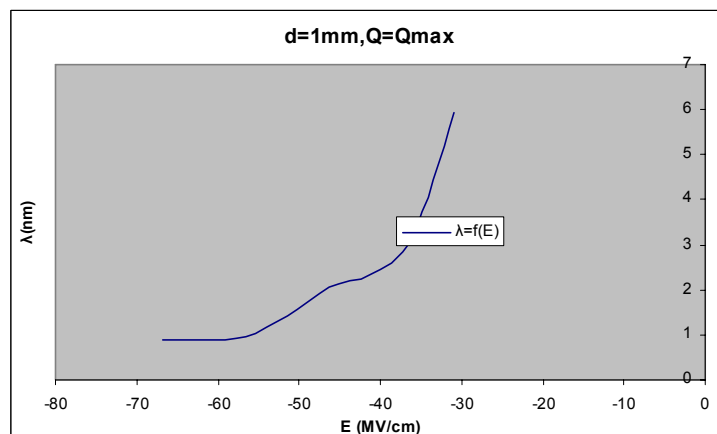
Σχήμα B 2.7.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



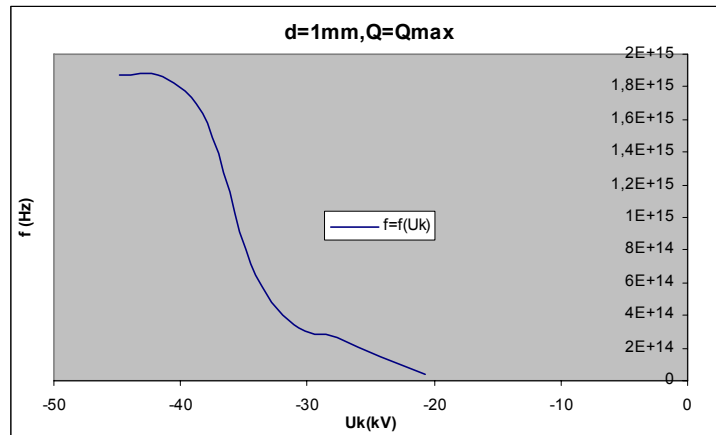
Σχήμα Β 2.7.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



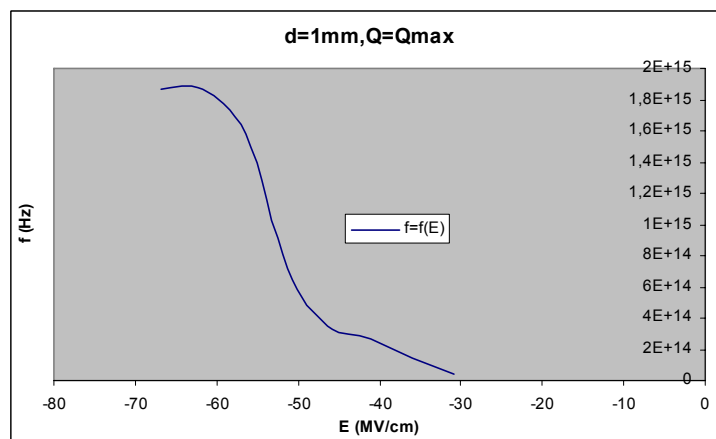
Σχήμα Β 2.7.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



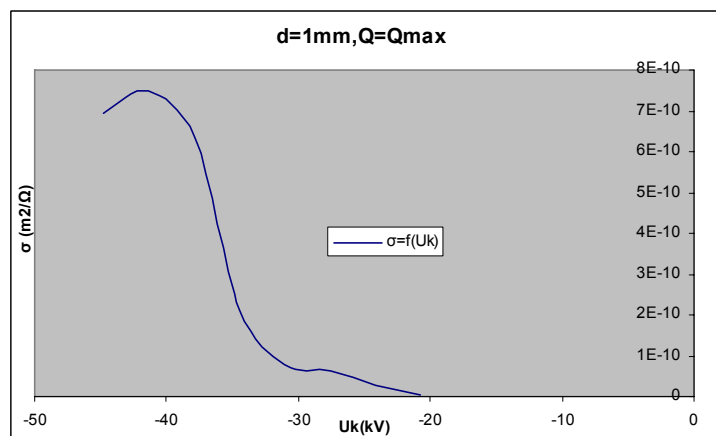
Σχήμα Β 2.7.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



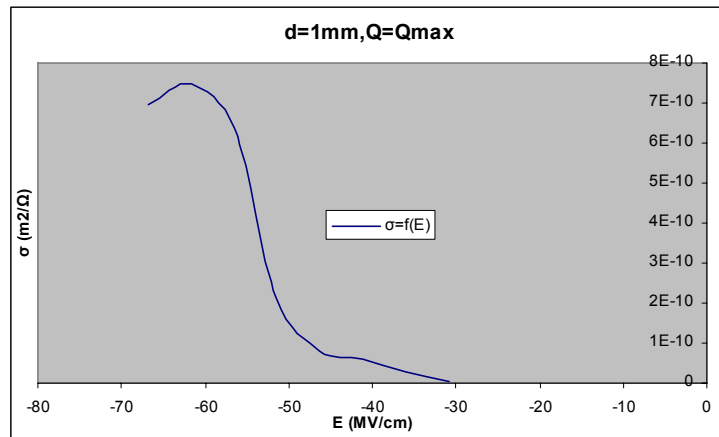
Σχήμα B 2.7.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



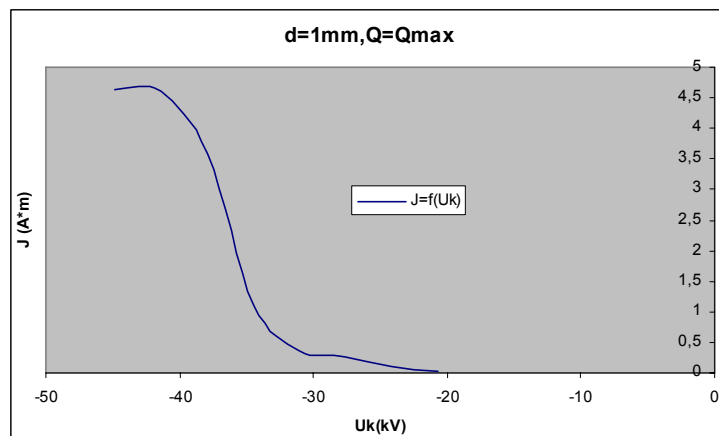
Σχήμα B 2.7.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



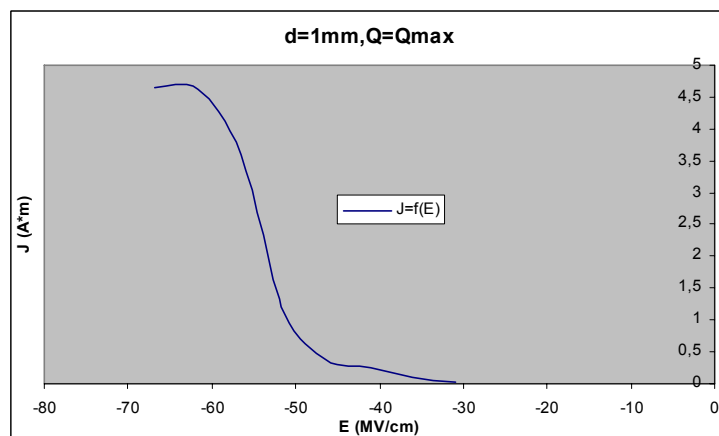
Σχήμα B 2.7.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.7.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.7.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.7.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.8 d=1mm, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης

U_k (kV)	Q_{1,min} (μCb)	Q_{2,min} (μCb)	ΔQ,min (μCb)
-13,8	0,062		
-17,2	0,079		
-20,7	0,07	0,11	0,040
-24,2	0,077	0,17	0,093
-27,6	0,067	0,29	0,223
-31,1	0,1	0,34	0,240
-34,5	0,067	0,5	0,433
-37,9	0,067	1,34	1,273
-41,4	0	1,78	1,780
-44,8	0	1,67	1,670

Πίνακας Β 2.8.1 Ελάχιστη Τιμή(Q_{1,min} Q_{2,min})Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

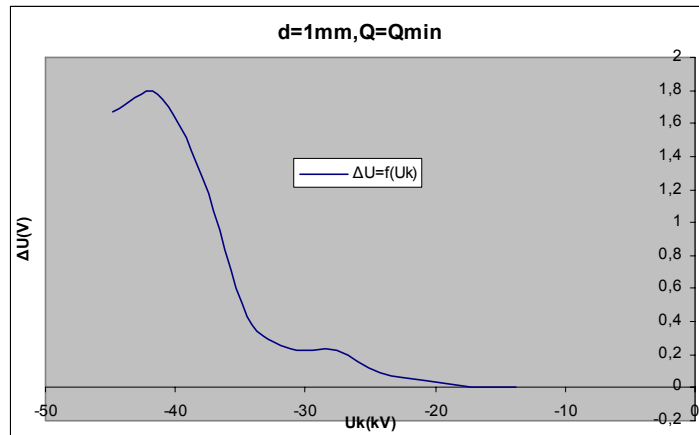
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
-13,8	-20,5588217	0	0		0		
-17,2	-25,6240387	0	0		0		
-20,7	-30,8382326	0,04	0,1102	Υπέρυθρη	196,8543836	7,397781484	2,66099E+13
-24,2	-36,0524265	0,093	0,256215	Υπέρυθρη	300,1625933	4,851656225	6,18681E+13
-27,6	-41,1176434	0,223	0,614365	Υπέρυθρη	464,8015055	3,133134676	1,4835E+14
-31,1	-46,3318373	0,24	0,6612	Υπέρυθρη	482,1927935	3,020131644	1,5966E+14
-34,5	-51,3970543	0,433	1,192915	Υπέρυθρη	647,6778469	2,248472325	2,88052E+14
-37,9	-56,4622712	1,273	3,507115	Φωτεινή	1110,527446	1,311345991	8,46861E+14
-41,4	-61,6764651	1,78	4,9039	Φωτεινή	1313,182528	1,10897433	1,18414E+15
-44,8	-66,7416821	1,67	4,60085	Φωτεινή	1271,959637	1,144915036	1,11096E+15

Πίνακας Β 2.8.2 (α) Άλλα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

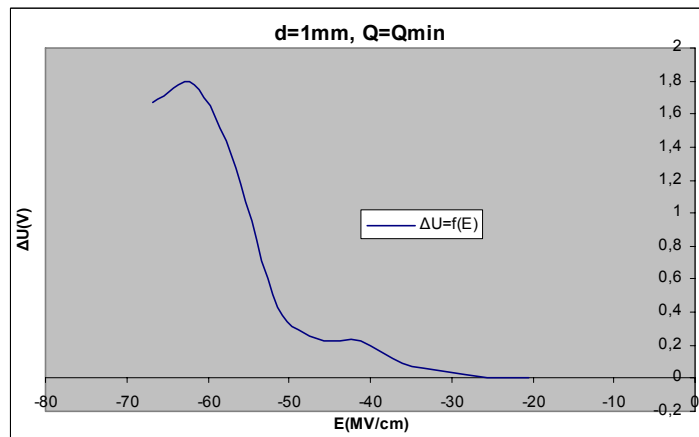
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
-13,8	-20,5588217	0			0	0
-17,2	-25,6240387	0			0	0
-20,7	-30,8382326	6,38345E-05	2,55338E-12	0,007874175	2,5E+11	1,93236715
-24,2	-36,0524265	8,32573E-05	7,74292E-12	0,027915121	5,8125E+11	3,842975207
-27,6	-41,1176434	0,000113042	2,52083E-11	0,103650736	1,39375E+12	8,079710145
-31,1	-46,3318373	0,000104074	2,49777E-11	0,11572627	1,5E+12	7,717041801
-34,5	-51,3970543	0,000126015	5,45643E-11	0,280444508	2,70625E+12	12,55072464
-37,9	-56,4622712	0,000196685	2,5038E-10	1,413701439	7,95625E+12	33,5883905
-41,4	-61,6764651	0,000212915	3,78988E-10	2,3374649	1,1125E+13	42,99516908
-44,8	-66,7416821	0,000190579	3,18268E-10	2,124172594	1,04375E+13	37,27678571

Πίνακας Β 2.8.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

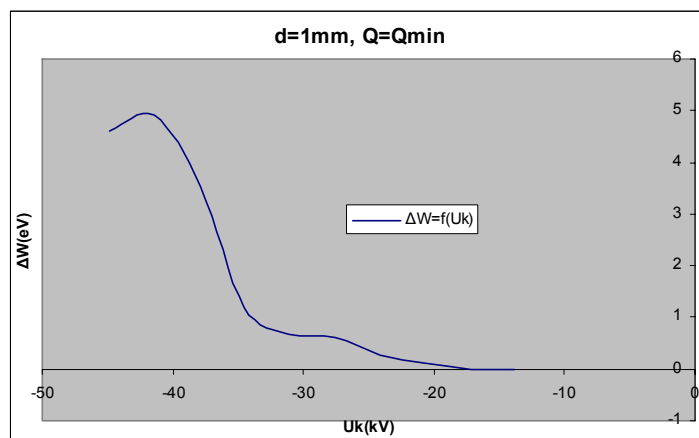
Πίνακες Β 2.8.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



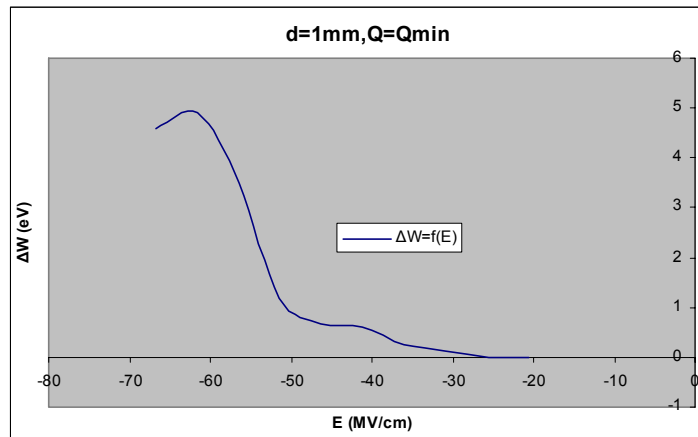
Σχήμα Β 2.8.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



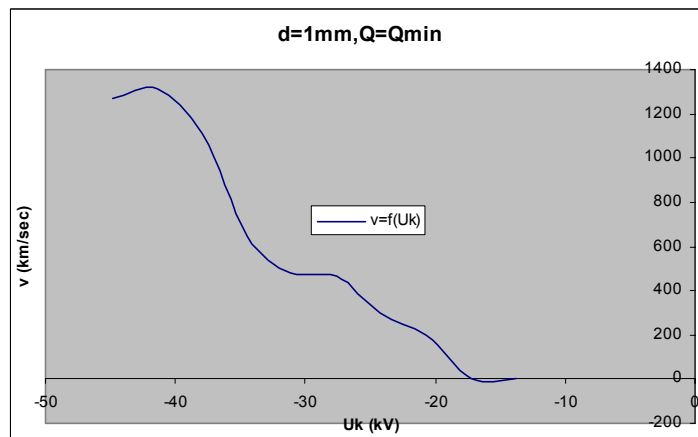
Σχήμα Β 2.8.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



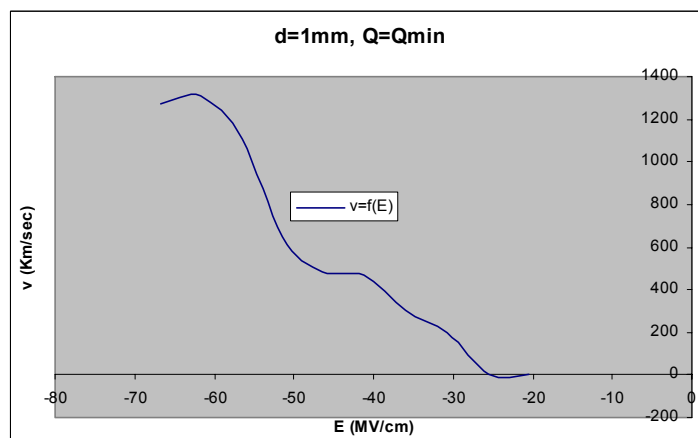
Σχήμα Β 2.8.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



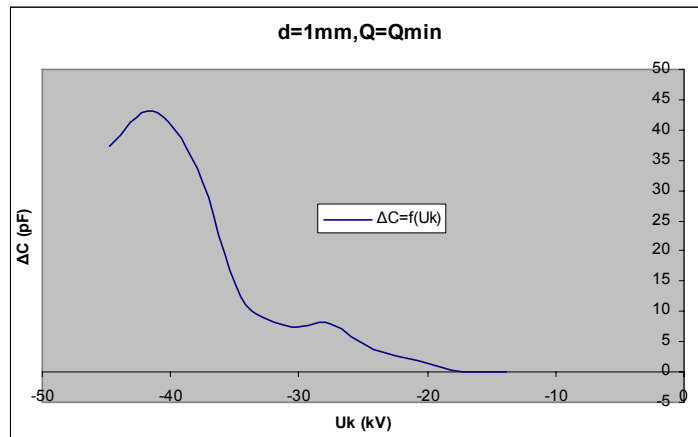
Σχήμα Β 2.8.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



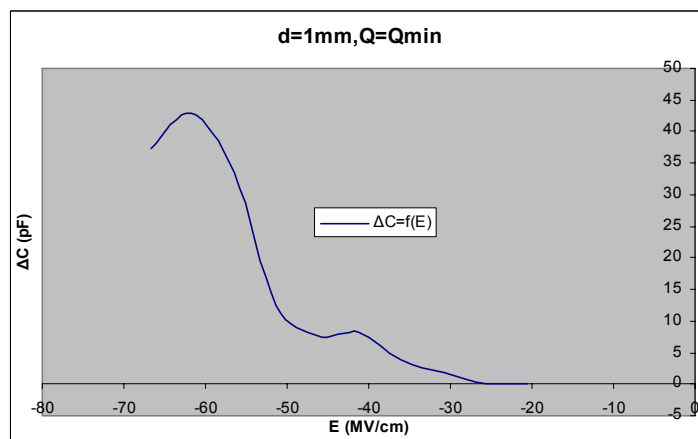
Σχήμα Β 2.8.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



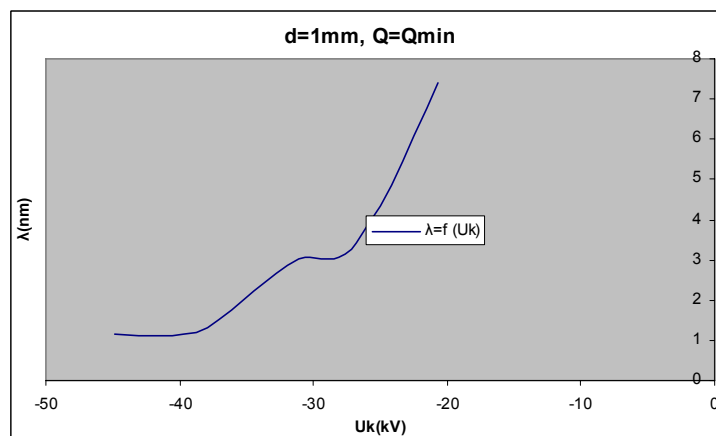
Σχήμα Β 2.8.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



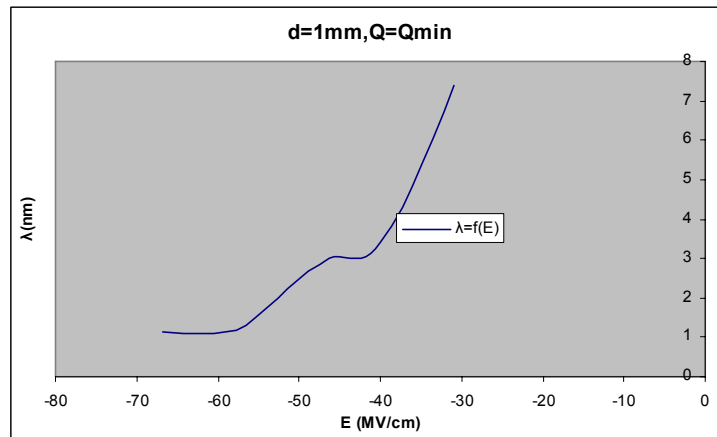
Σχήμα Β 2.8.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



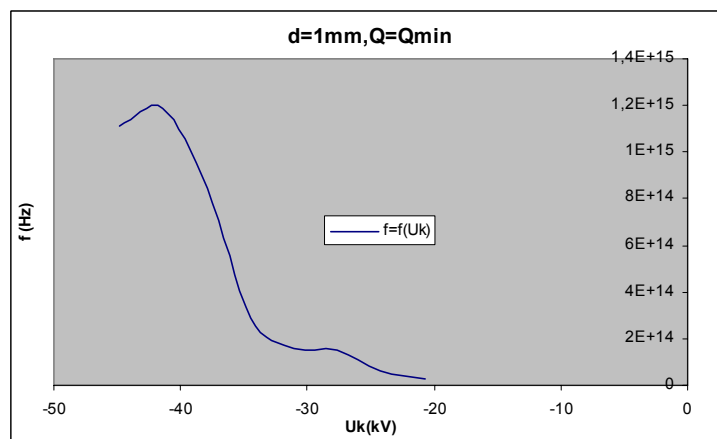
Σχήμα Β 2.8.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



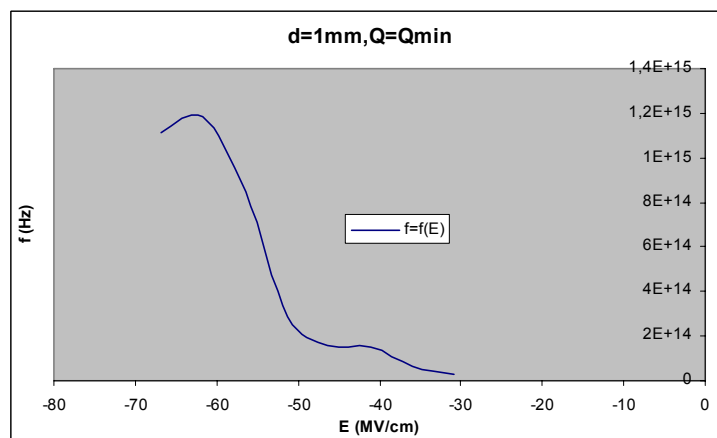
Σχήμα Β 2.8.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



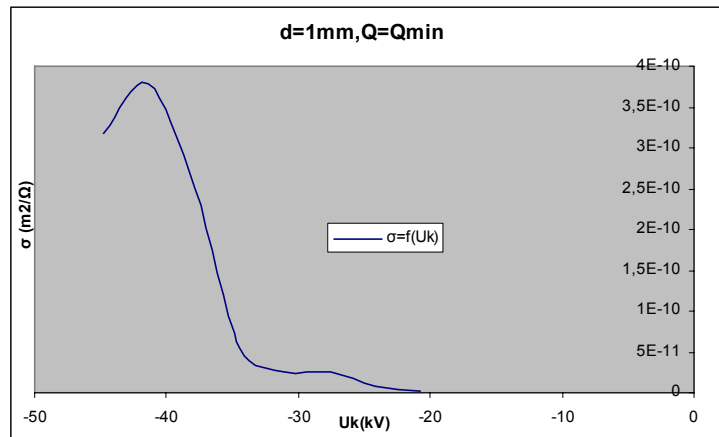
Σχήμα Β 2.8.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



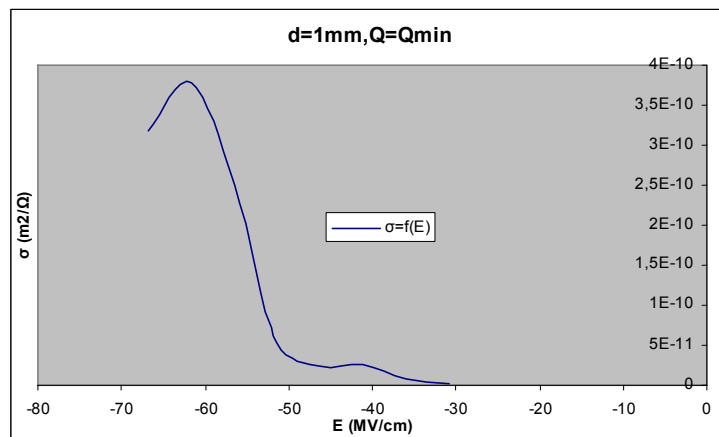
Σχήμα Β 2.8.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



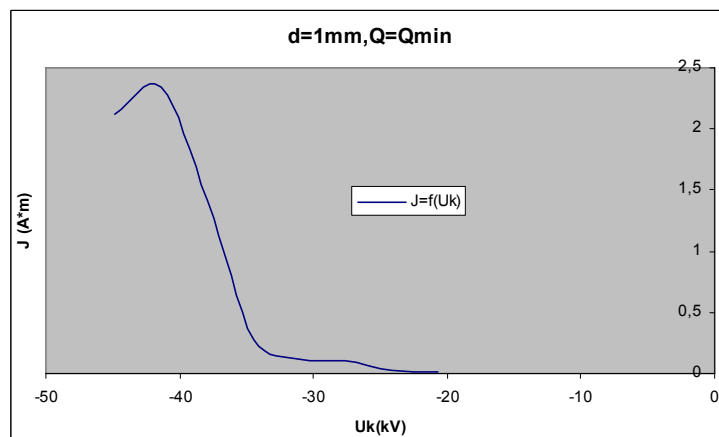
Σχήμα Β 2.8.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



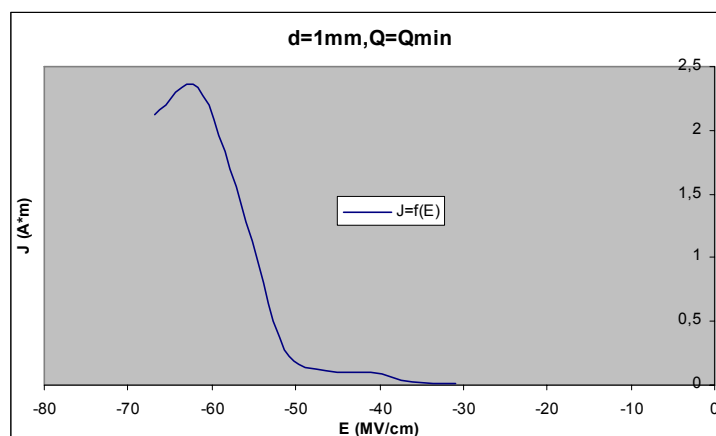
Σχήμα Β 2.8.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.8.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.8.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.8.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.9 d=2mm, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, θετική πολικότητα κρουστικής τάσης

U _k (kV)	Q _{1,max} (μCb)	Q _{2,max} (μCb)	ΔQ _{max} (μCb)
13,8	0,067		
17,3	0,081		
20,8	0,091	0,14	0,049
24,1	0,084	0,14	0,056
27,7	0,081	0,23	0,149
31,1	0,067	0,4	0,333
34,5	0,067	0,48	0,413
37,8	0,067	0,78	0,713
41,4	0,1	0,93	0,830
44,6	0,067	0,92	0,853

Πίνακας Β 2.9.1 Μέγιστη Τιμή(Q_{1,max}Q_{2,max}) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

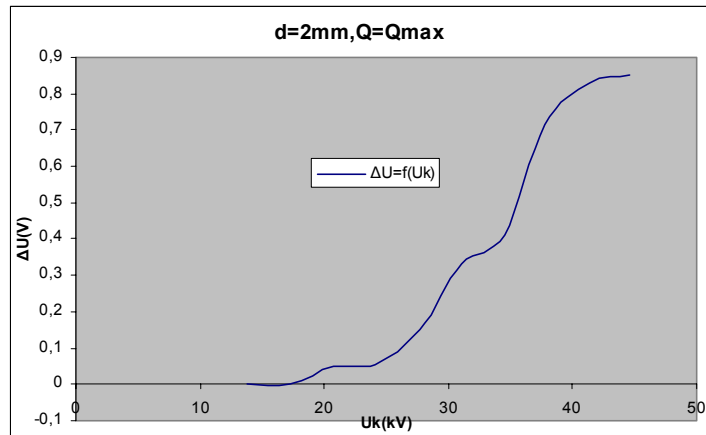
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
13,8	14,03635929	0	0		0		
17,3	17,59630549	0	0		0		
20,8	21,15625169	0,049	0,134995	Υπέρυθρη	217,8778769	6,683954035	3,25972E+13
24,1	24,51277239	0,056	0,15428	Υπέρυθρη	232,9212478	6,252266497	3,72539E+13
27,7	28,17443133	0,149	0,410495	Υπέρυθρη	379,9340602	3,832995951	9,9122E+13
31,1	31,63266478	0,333	0,917415	Υπέρυθρη	567,985451	2,563948974	2,21528E+14
34,5	35,09089823	0,413	1,137815	Υπέρυθρη	632,5430967	2,302271137	2,74747E+14
37,8	38,44741893	0,713	1,964315	Υπέρυθρη	831,1125868	1,752212321	4,74322E+14
41,4	42,10907788	0,83	2,28665	Φωτεινή	896,7143934	1,62402402	5,52156E+14
44,6	45,36388583	0,853	2,350015	Φωτεινή	909,0538494	1,601979591	5,67457E+14

Πίνακας Β 2.9.2 (α) Άλμα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

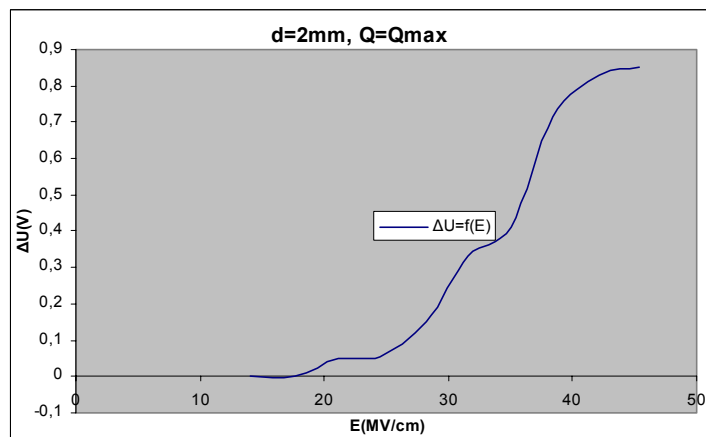
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
13,8	14,03635929	0			0	0
17,3	17,59630549	0			0	0
20,8	21,15625169	0,000102985	5,04627E-12	0,010676016	3,0625E+11	2,355769231
24,1	24,51277239	9,50204E-05	5,32114E-12	0,01304359	3,5E+11	2,323651452
27,7	28,17443133	0,000134851	2,00927E-11	0,056610175	9,3125E+11	5,379061372
31,1	31,63266478	0,000179557	5,97924E-11	0,189139155	2,08125E+12	10,7073955
34,5	35,09089823	0,000180258	7,44467E-11	0,261240299	2,58125E+12	11,97101449
37,8	38,44741893	0,000216169	1,54128E-10	0,592583274	4,45625E+12	18,86243386
41,4	42,10907788	0,00021295	1,76749E-10	0,744272947	5,1875E+12	20,04830918
44,6	45,36388583	0,000200392	1,70934E-10	0,775422934	5,33125E+12	19,12556054

Πίνακας Β 2.9.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

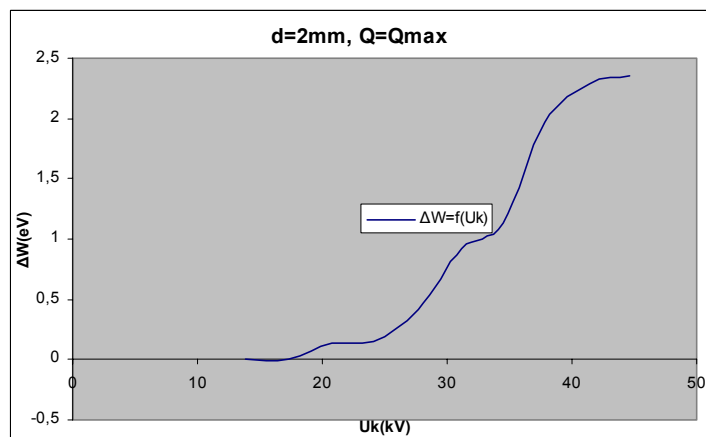
Πίνακες Β 2.9.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



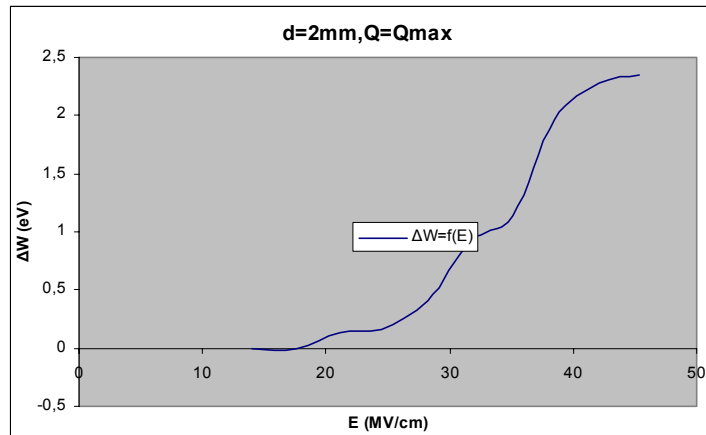
Σχήμα Β 2.9.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



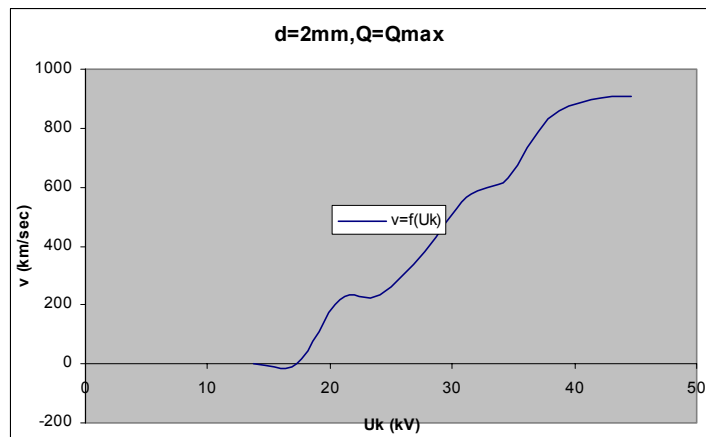
Σχήμα Β 2.9.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



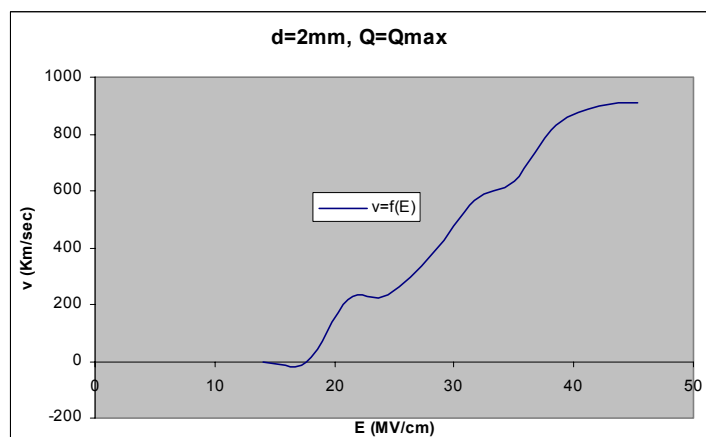
Σχήμα Β 2.9.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



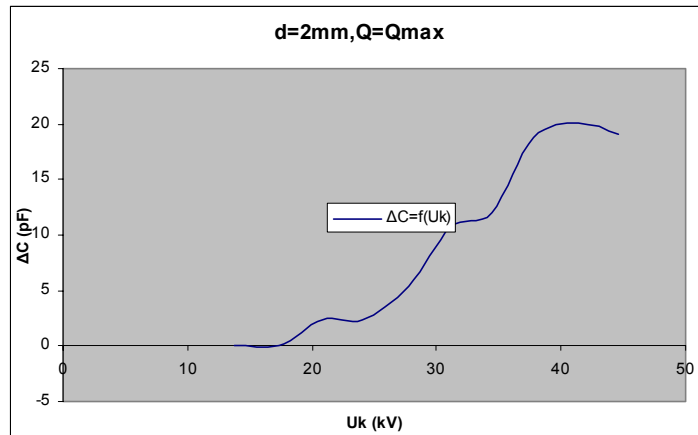
Σχήμα Β 2.9.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



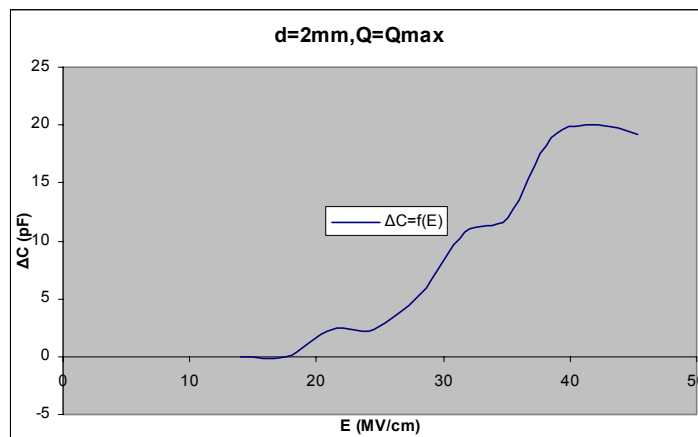
Σχήμα Β 2.9.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



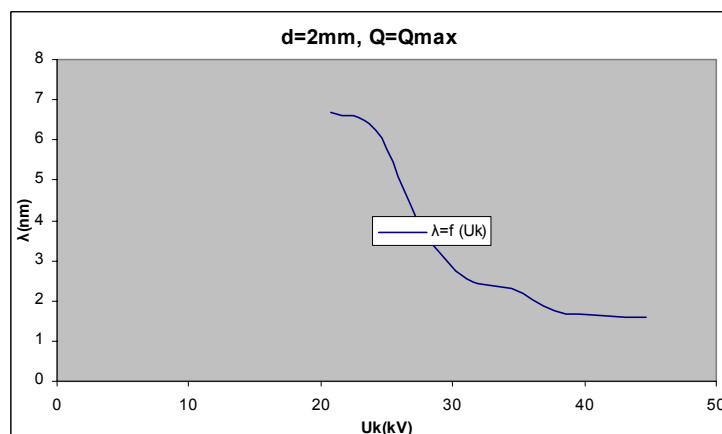
Σχήμα Β 2.9.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



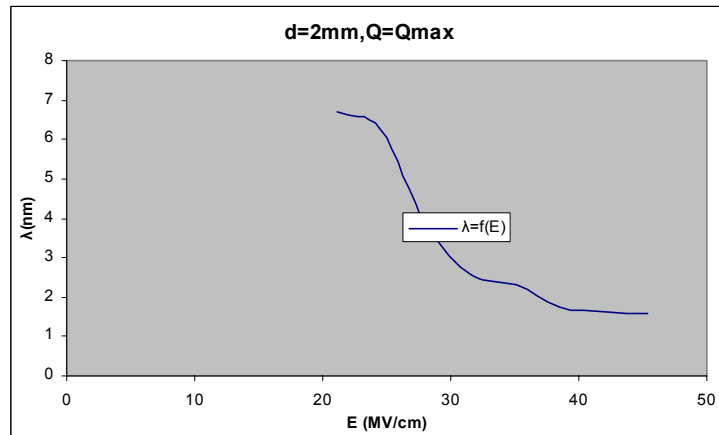
Σχήμα Β 2.9.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



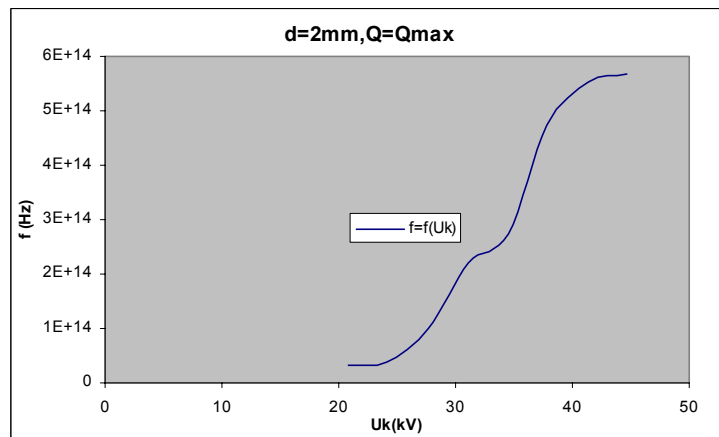
Σχήμα Β 2.9.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



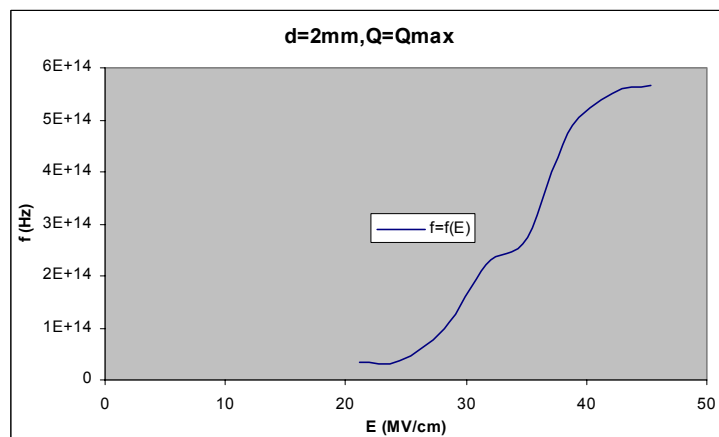
Σχήμα Β 2.9.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



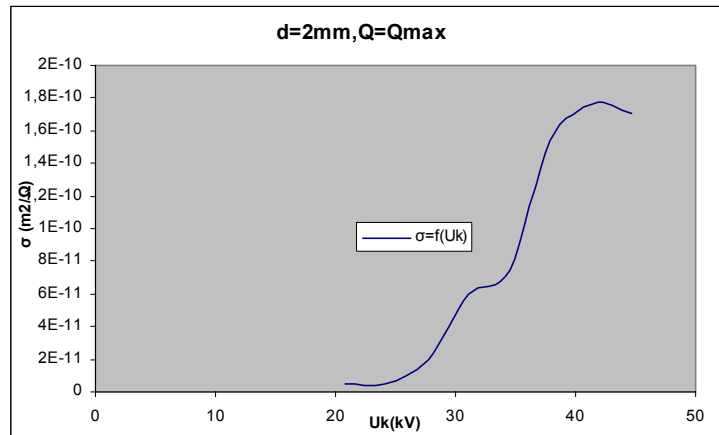
Σχήμα Β 2.9.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



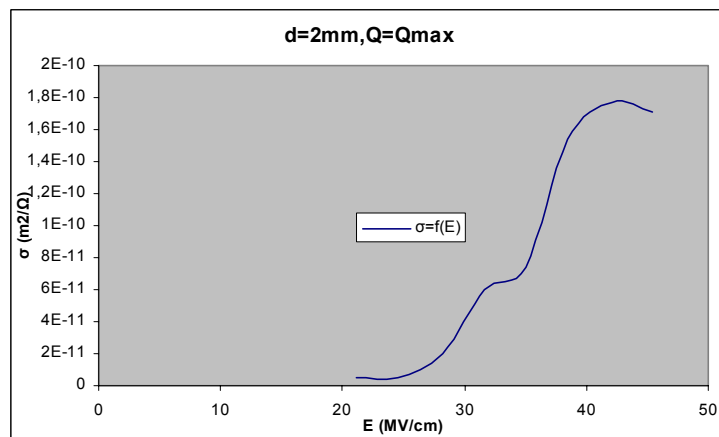
Σχήμα Β 2.9.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



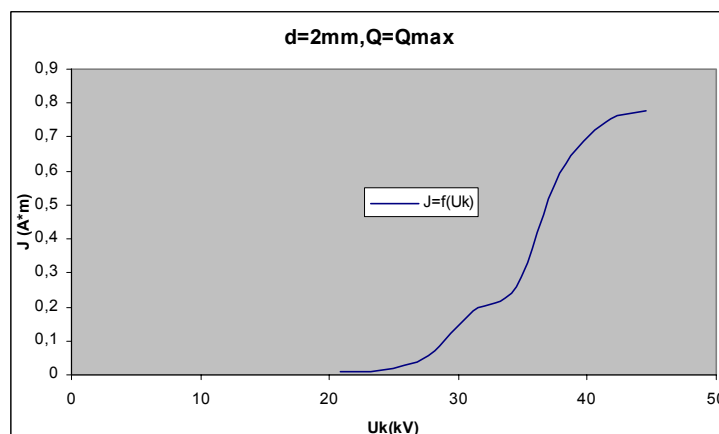
Σχήμα Β 2.9.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



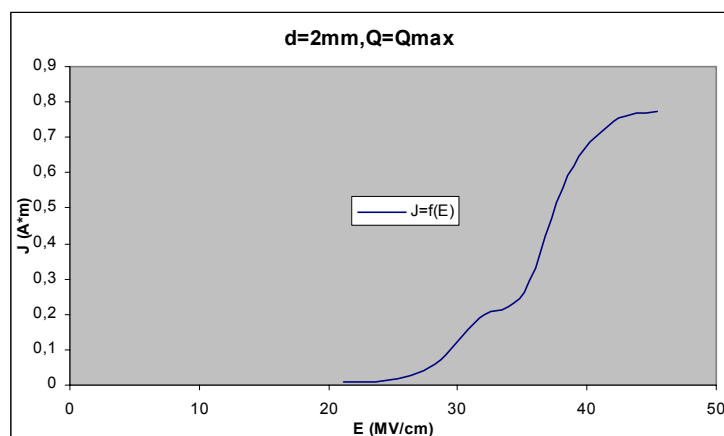
Σχήμα Β 2.9.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.9.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.9.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.9.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.10 d=2mm, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, θετική πολικότητα κρουστικής τάσης

U_k (kV)	Q_{1,min} (μCb)	Q_{2,min} (μCb)	ΔQ,min (μCb)
13,8	0,057		
17,3	0,073		
20,8	0,073	0,12	0,047
24,1	0,064	0,1	0,036
27,7	0,081	0,13	0,049
31,1	0,067	0,28	0,213
34,5	0,067	0,3	0,233
37,8	0,067	0,5	0,433
41,4	0,1	0,63	0,530
44,6	0,067	0,58	0,513

Πίνακας Β 2.10.1 Ελάχιστη Τιμή(Q_{1,min} Q_{2,min}) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

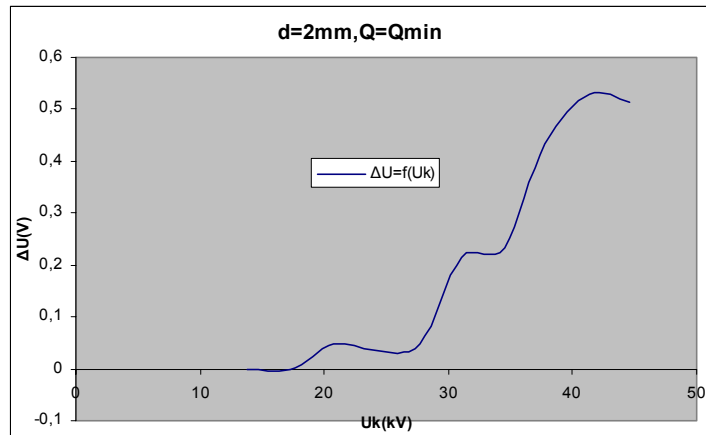
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
13,8	14,03635929	0	0		0		
17,3	17,59630549	0	0		0		
20,8	21,15625169	0,047	0,129485	Υπέρυθρη	213,385067	6,82468429	3,12667E+13
24,1	24,51277239	0,036	0,09918	Υπέρυθρη	186,7524659	7,797946374	2,39489E+13
27,7	28,17443133	0,049	0,134995	Υπέρυθρη	217,8778769	6,683954035	3,25972E+13
31,1	31,63266478	0,213	0,586815	Υπέρυθρη	454,2604181	3,205838889	1,41698E+14
34,5	35,09089823	0,233	0,641915	Υπέρυθρη	475,1087788	3,065162715	1,55003E+14
37,8	38,44741893	0,433	1,192915	Υπέρυθρη	647,6778469	2,248472325	2,88052E+14
41,4	42,10907788	0,53	1,46015	Υπέρυθρη	716,5607725	2,032326873	3,52581E+14
44,6	45,36388583	0,513	1,413315	Υπέρυθρη	704,9750989	2,065726458	3,41272E+14

Πίνακας Β 2.10.2 (α) Άλμα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

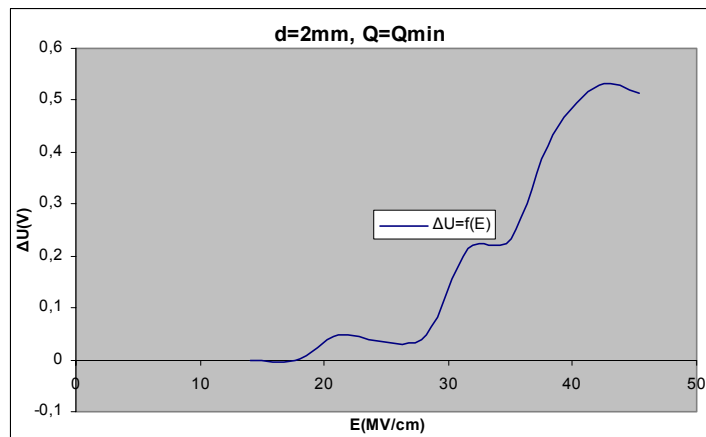
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
13,8	14,03635929	0			0	0
17,3	17,59630549	0			0	0
20,8	21,15625169	0,000100861	4,74049E-12	0,010029098	2,9375E+11	2,259615385
24,1	24,51277239	7,61858E-05	2,74269E-12	0,006723089	2,25E+11	1,493775934
27,7	28,17443133	7,73318E-05	3,78926E-12	0,010676016	3,0625E+11	1,768953069
31,1	31,63266478	0,000143605	3,05878E-11	0,096757469	1,33125E+12	6,848874598
34,5	35,09089823	0,000135394	3,15467E-11	0,110700345	1,45625E+12	6,753623188
37,8	38,44741893	0,000168458	7,29423E-11	0,280444508	2,70625E+12	11,45502646
41,4	42,10907788	0,000170168	9,01889E-11	0,379777209	3,3125E+12	12,80193237
44,6	45,36388583	0,000155404	7,97225E-11	0,361652226	3,20625E+12	11,50224215

Πίνακας Β 2.10.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

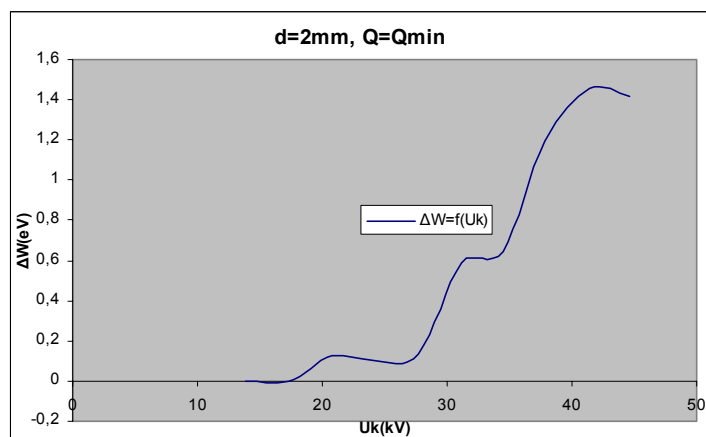
Πίνακας Β 2.10.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



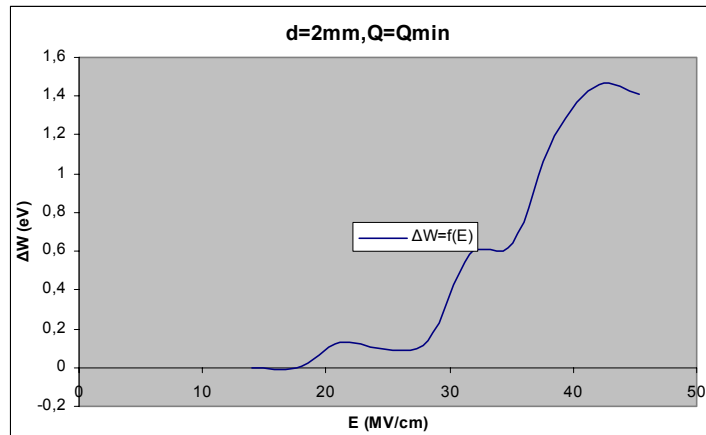
Σχήμα Β 2.10.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



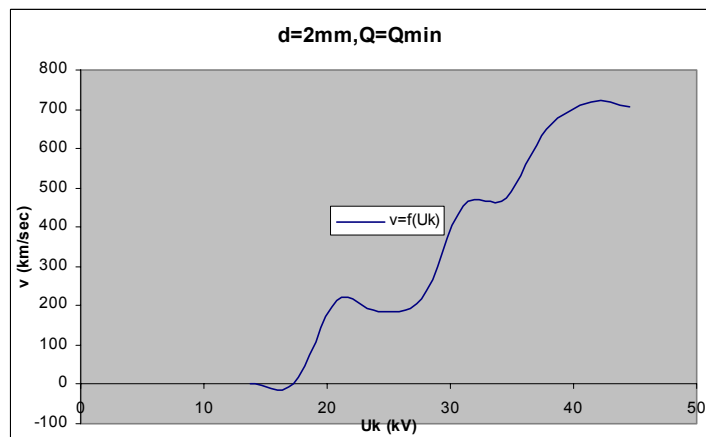
Σχήμα Β 2.10.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



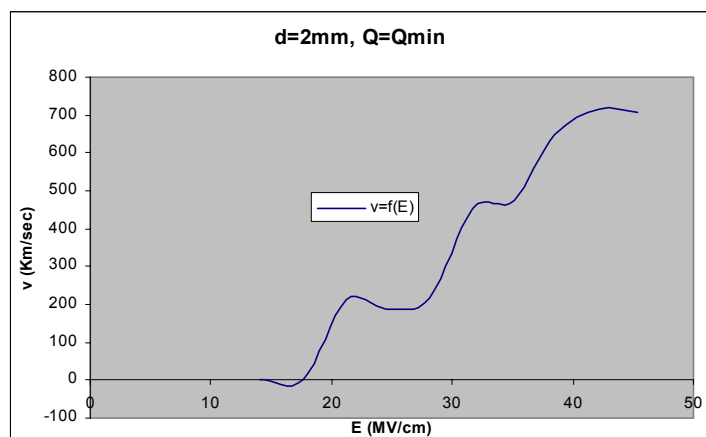
Σχήμα Β 2.10.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



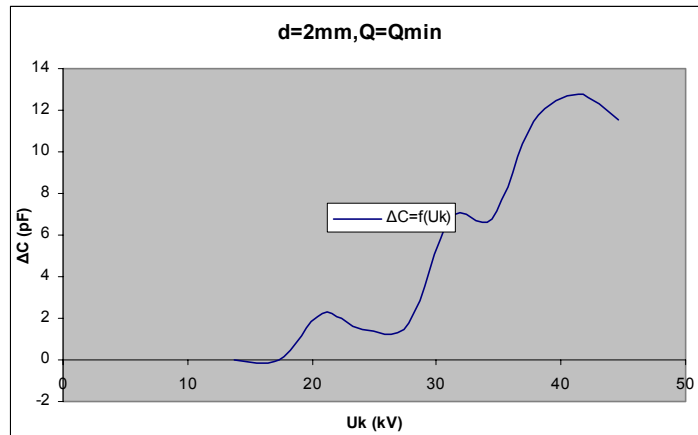
Σχήμα Β 2.10.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



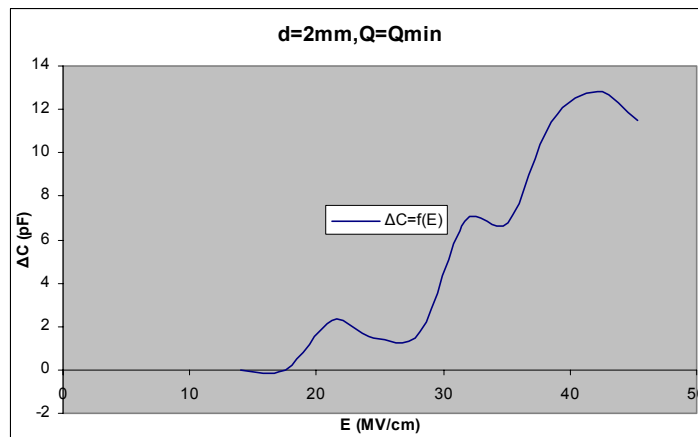
Σχήμα Β 2.10.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



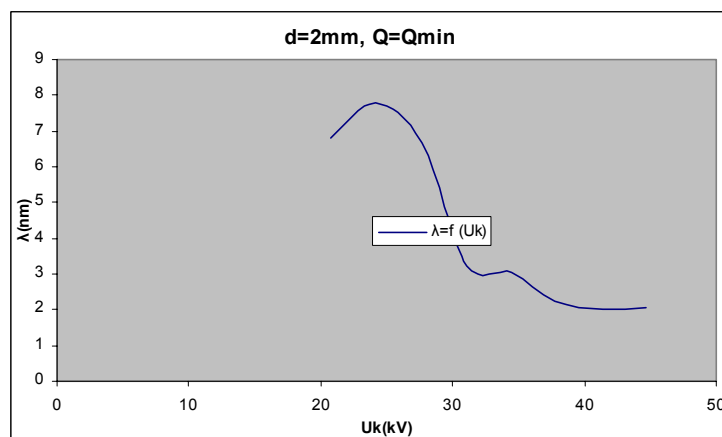
Σχήμα Β 2.10.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



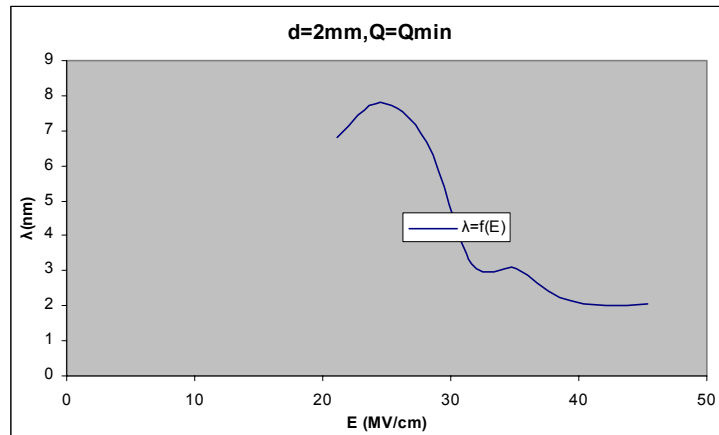
Σχήμα Β 2.10.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



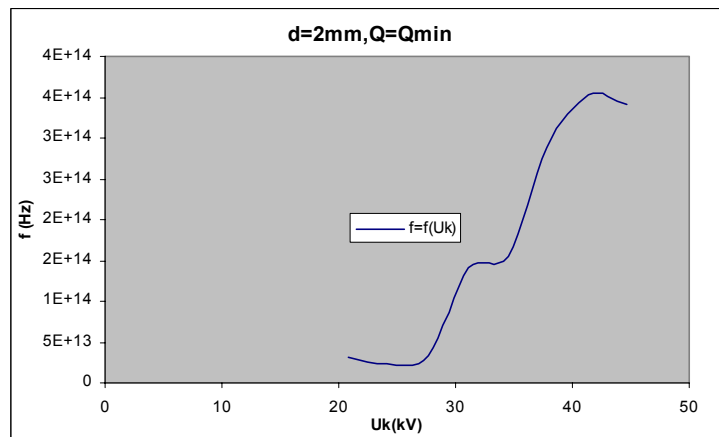
Σχήμα Β 2.10.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



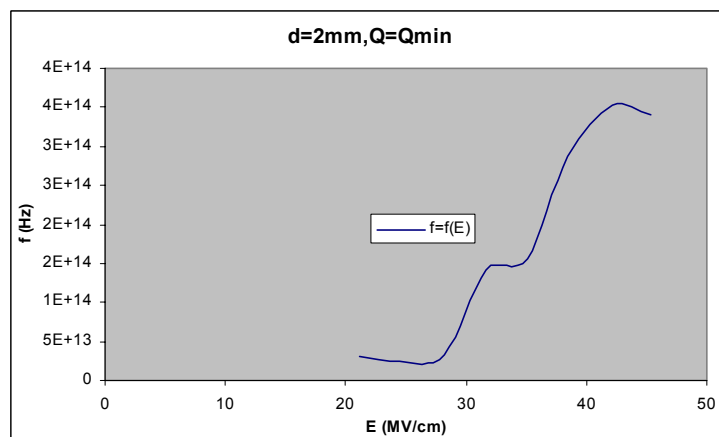
Σχήμα Β 2.10.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



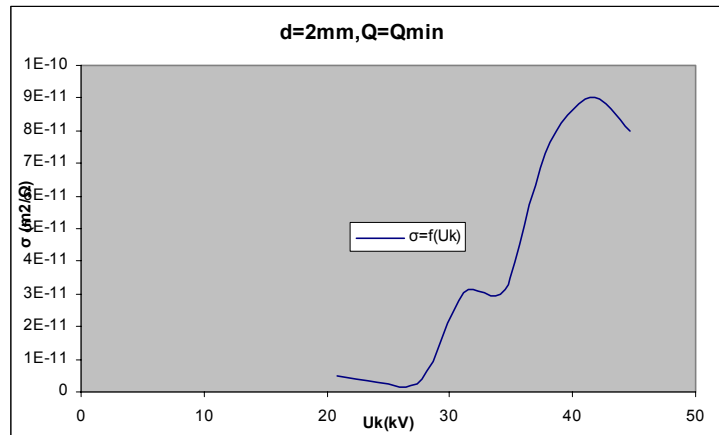
Σχήμα Β 2.10.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



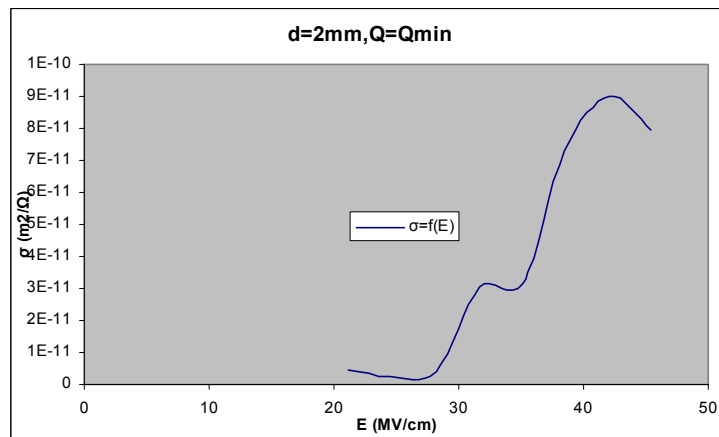
Σχήμα Β 2.10.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



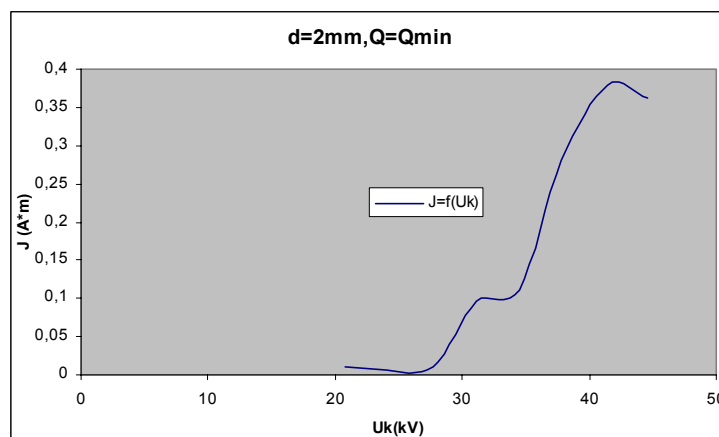
Σχήμα Β 2.10.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



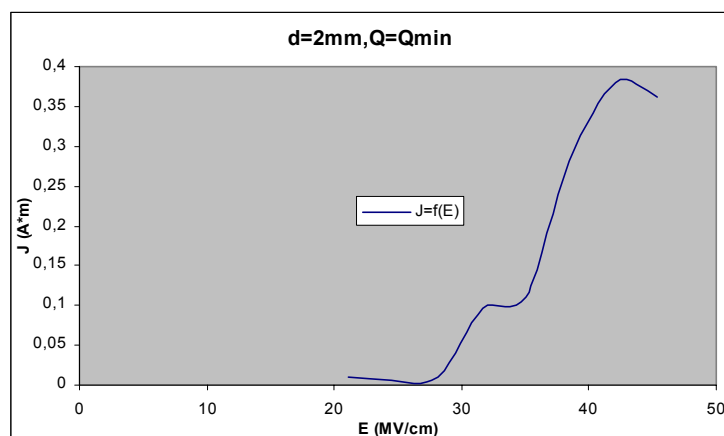
Σχήμα Β 2.10.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.10.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.10.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.10.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.11 d=2mm, Μέγιστη Τιμή Φορτίου, αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης

U _k (kV)	Q _{1,max} (μCb)	Q _{2,max} (μCb)	ΔQ _{max} (μCb)
-14	0,103		
-17,4	0,075		
-21,2	0,089	0,104	0,015
-24,6	0,097	0,16	0,063
-28,3	0,094	0,19	0,096
-31,8	0,081	0,29	0,209
-35,1	0,093	0,42	0,327
-38,6	0,067	0,55	0,483
-42,4	0,067	1,32	1,253
-44,8	0,067	1,11	1,043

Πίνακας Β 2.11.1 Μέγιστη Τιμή (Q_{1,max} Q_{2,max}) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

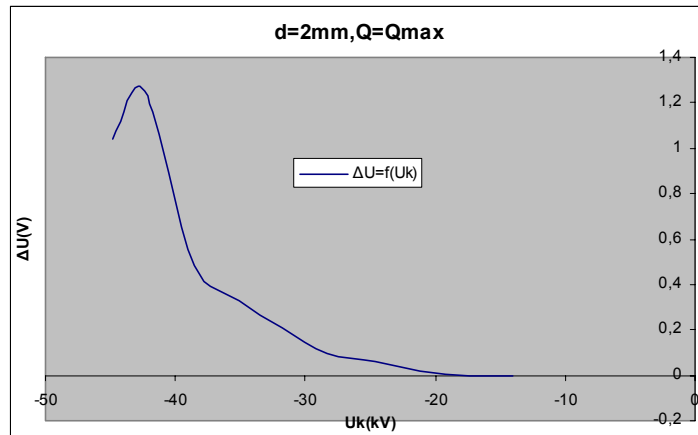
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
-14	-14,2397848	0	0		0		
-17,4	-17,6980182	0	0		0		
-21,2	-21,5631027	0,015	0,041325	Υπέρυθρη	120,5481984	12,08052658	9,97872E+12
-24,6	-25,0213361	0,063	0,173565	Υπέρυθρη	247,0502907	5,894693384	4,19106E+13
-28,3	-28,7847078	0,096	0,26448	Υπέρυθρη	304,9654998	4,775247415	6,38638E+13
-31,8	-32,3446540	0,209	0,575795	Υπέρυθρη	449,9748467	3,236371377	1,39037E+14
-35,1	-35,7011747	0,327	0,900885	Υπέρυθρη	562,8452054	2,587364519	2,17536E+14
-38,6	-39,2611209	0,483	1,330665	Υπέρυθρη	684,0512801	2,128913075	3,21315E+14
-42,4	-43,1262054	1,253	3,452015	Φωτεινή	1101,769207	1,321770209	8,33556E+14
-44,8	-45,5673113	1,043	2,873465	Φωτεινή	1005,211038	1,448736295	6,93854E+14

Πίνακας Β 2.11.2 (α) Άλμα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

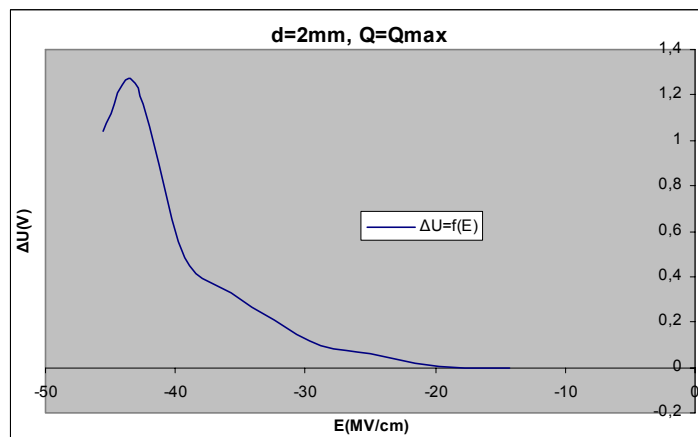
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
-14	-14,2397848	0			0	0
-17,4	-17,6980182	0			0	0
-21,2	-21,5631027	5,59048E-05	8,38573E-13	0,001808223	93750000000	0,70754717
-24,6	-25,0213361	9,87359E-05	6,22036E-12	0,015564168	3,9375E+11	2,56097561
-28,3	-28,7847078	0,000105947	1,01709E-11	0,029276688	6E+11	3,392226148
-31,8	-32,3446540	0,000139119	2,90758E-11	0,094044743	1,30625E+12	6,572327044
-35,1	-35,7011747	0,000157655	5,1553E-11	0,184050382	2,04375E+12	9,316239316
-38,6	-39,2611209	0,000174231	8,41537E-11	0,330396768	3,01875E+12	12,51295337
-42,4	-43,1262054	0,000255476	3,20111E-10	1,380516816	7,83125E+12	29,55188679
-44,8	-45,5673113	0,000220599	2,30085E-10	1,048435113	6,51875E+12	23,28125

Πίνακας Β 2.11.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

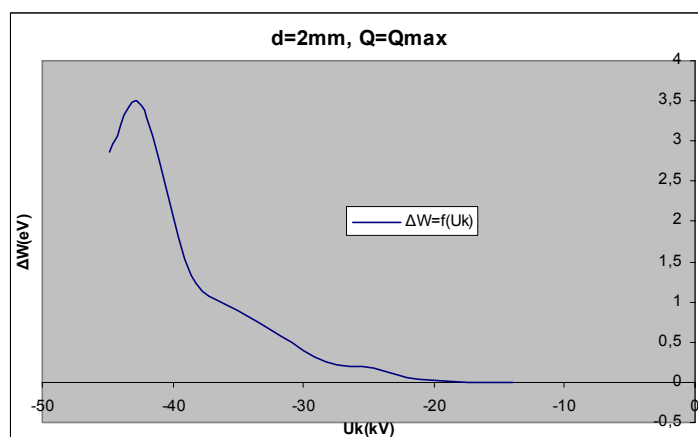
Πίνακες Β 2.11.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



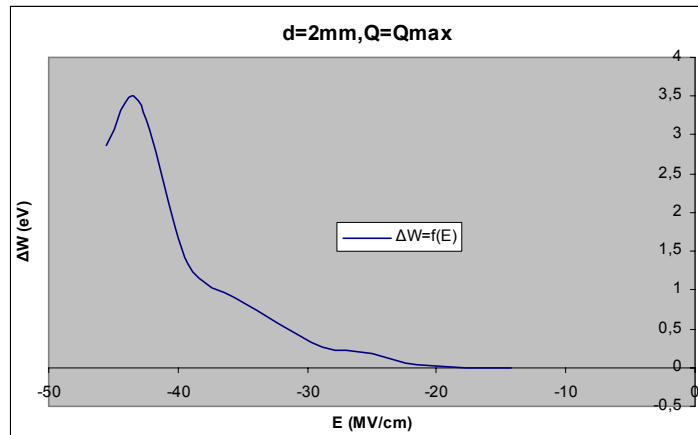
Σχήμα Β 2.11.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



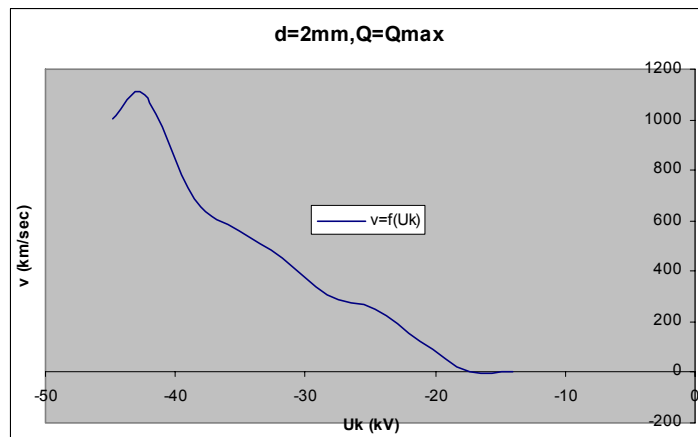
Σχήμα Β 2.11.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



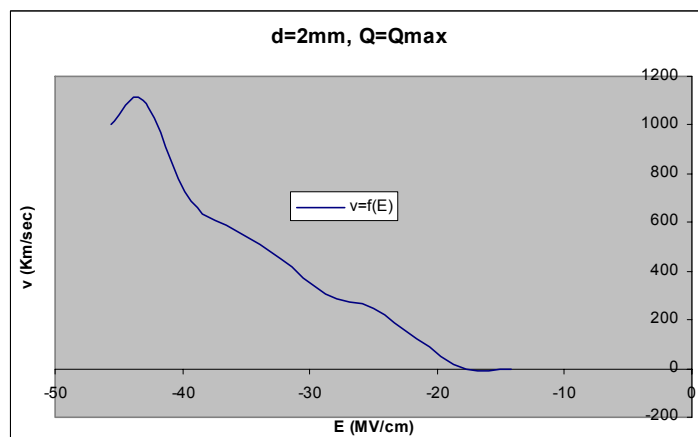
Σχήμα Β 2.11.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



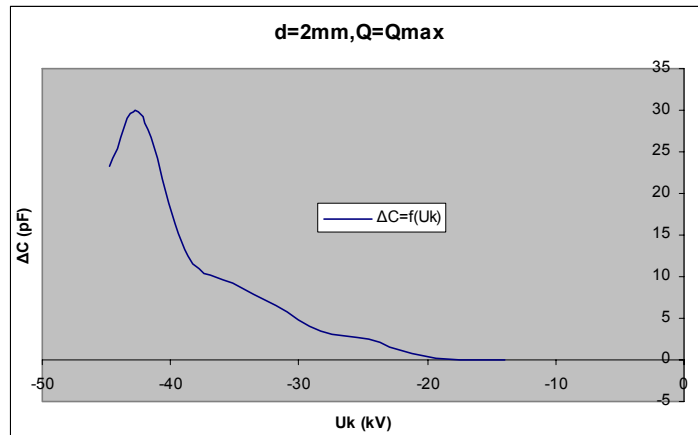
Σχήμα Β 2.11.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



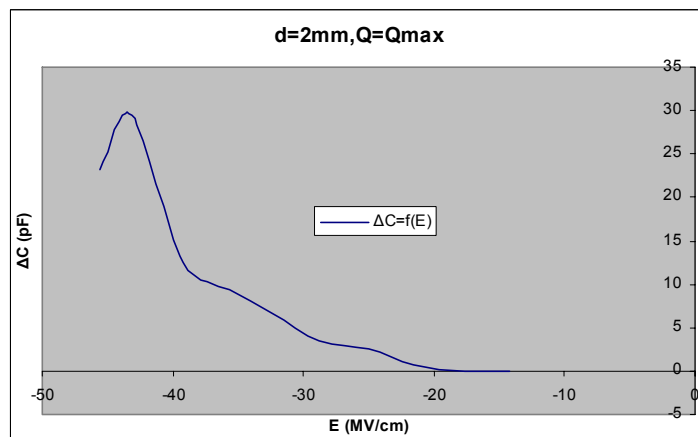
Σχήμα Β 2.11.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



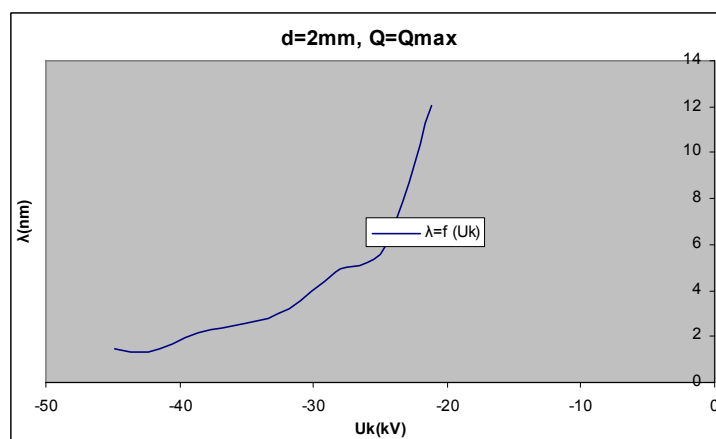
Σχήμα Β 2.11.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



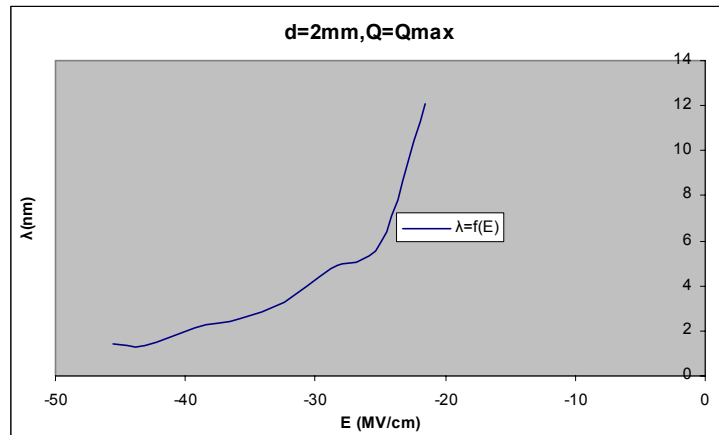
Σχήμα Β 2.11.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



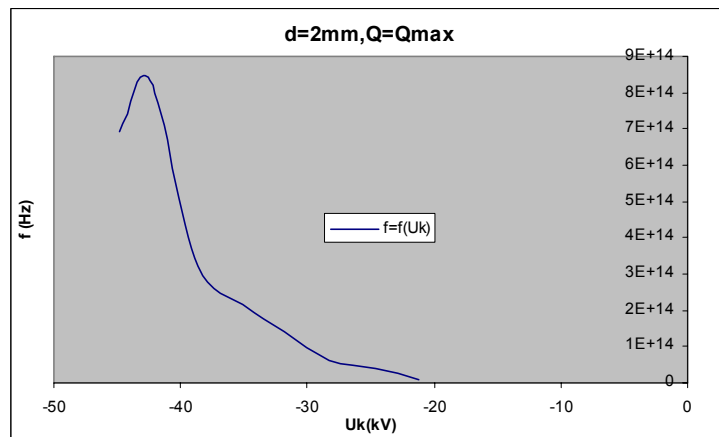
Σχήμα Β 2.11.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



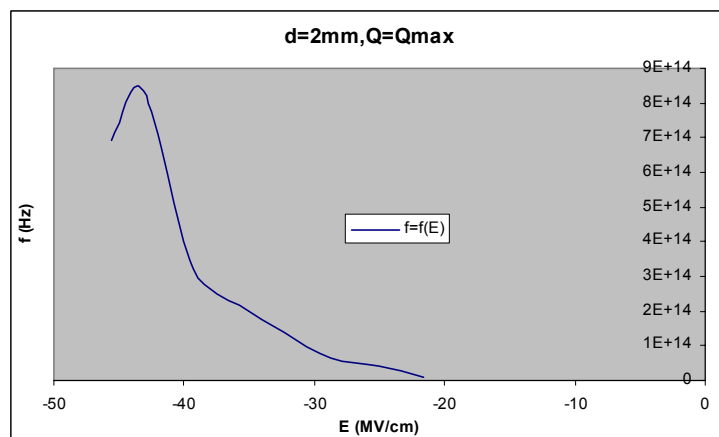
Σχήμα Β 2.11.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



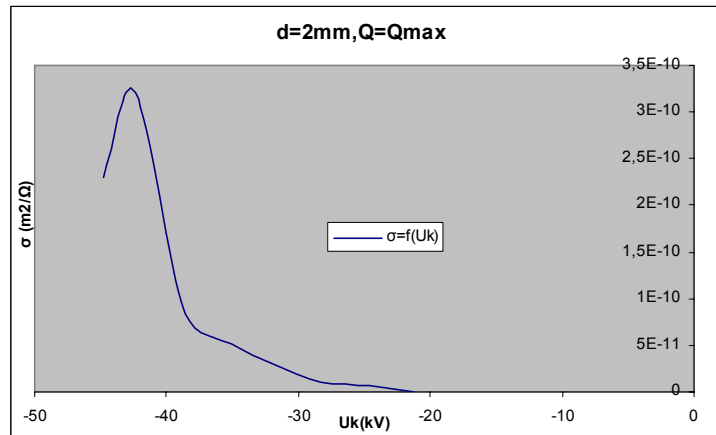
Σχήμα Β 2.11.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



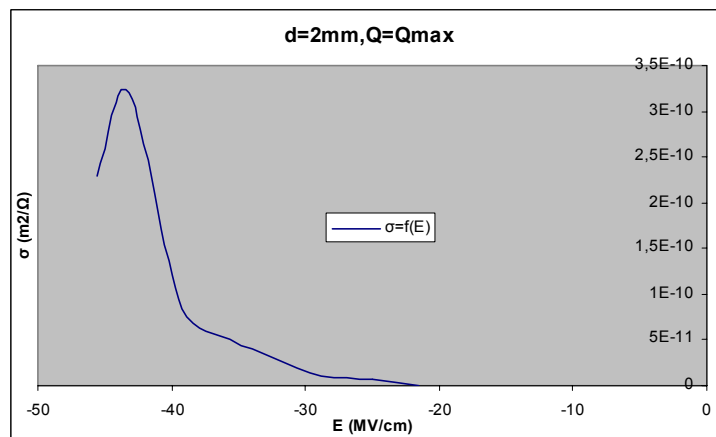
Σχήμα Β 2.11.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



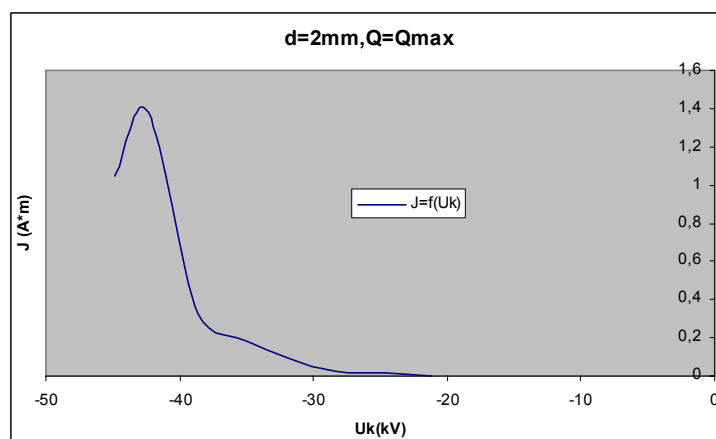
Σχήμα Β 2.11.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



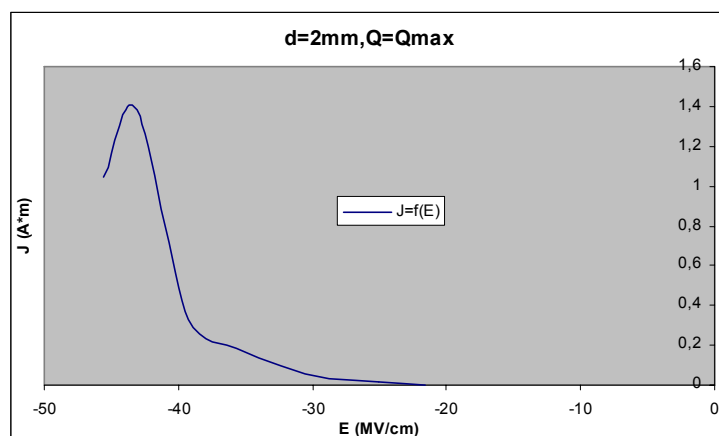
Σχήμα B 2.11.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα B 2.11.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα B 2.11.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.11.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

2.12 d=2mm, Ελάχιστη Τιμή Φορτίου, αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης

Uk (kV)	Q1,min (μCb)	Q2,min (μCb)	ΔQ ,min (μCb)
-14	0,097		
-17,4	0,067		
-21,2	0,081	0,096	0,015
-24,6	0,081	0,14	0,059
-28,3	0,094	0,13	0,036
-31,8	0,081	0,19	0,109
-35,1	0,081	0,26	0,179
-38,6	0,067	0,29	0,223
-42,4	0,067	0,44	0,373
-44,8	0,067	0,47	0,403

Πίνακας Β 2.12.1 Ελάχιστη Τιμή(Q1,min Q2,min) Φορτίων λόγω μερικών εκκενώσεων

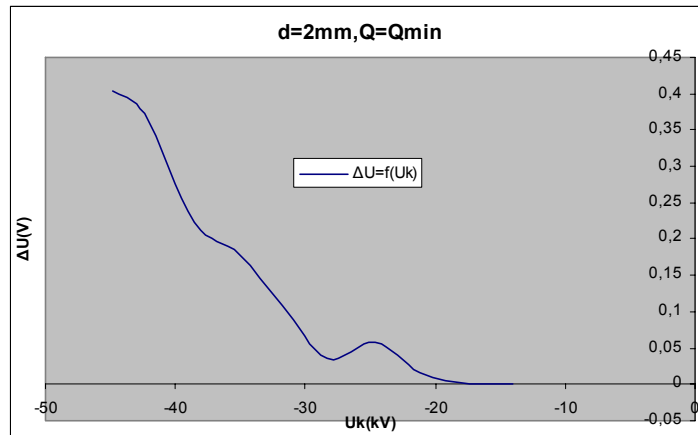
U _k (kV)	E (MV/cm)	Δu (V)	ΔW (eV)	Είδος Ακτινοβολίας	v (km/sec)	λ (nm)	f (Hz)
-14	-14,2397848	0	0		0		
-17,4	-17,6980182	0	0		0		
-21,2	-21,5631027	0,015	0,041325	Υπέρυθρη	120,5481984	12,08052658	9,97872E+12
-24,6	-25,0213361	0,059	0,162545	Υπέρυθρη	239,0788182	6,091236878	3,92496E+13
-28,3	-28,7847078	0,036	0,09918	Υπέρυθρη	186,7524659	7,797946374	2,39489E+13
-31,8	-32,3446540	0,109	0,300295	Υπέρυθρη	324,9588309	4,481446805	7,2512E+13
-35,1	-35,7011747	0,179	0,493145	Υπέρυθρη	416,4296176	3,497075263	1,19079E+14
-38,6	-39,2611209	0,223	0,614365	Υπέρυθρη	464,8015055	3,133134676	1,4835E+14
-42,4	-43,1262054	0,373	1,027615	Υπέρυθρη	601,1315338	2,42257415	2,48138E+14
-44,8	-45,5673113	0,403	1,110265	Υπέρυθρη	624,8382648	2,330660263	2,68095E+14

Πίνακας Β 2.12.2 (α) Άλμα Δυναμικού (Δu), εκπεμπόμενη ακτινοβολία ενέργειας (ΔW), ταχύτητα ηλεκτρονίων (v), μήκος κύματος (λ) και συχνότητα (f) ακτινοβολίας λόγω μερικών εκκενώσεων

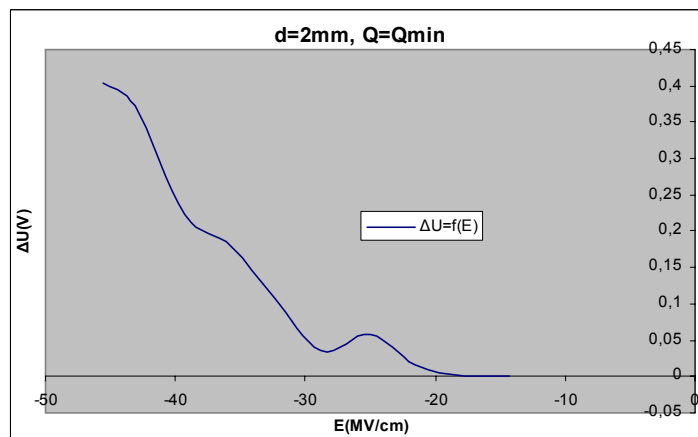
U _k (kV)	E (MV/cm)	b (m ² /Vsec)	σ (m ² /Ω)	J (A*m)	N	ΔC (pF)
-14	-14,2397848	0			0	0
-17,4	-17,6980182	0			0	0
-21,2	-21,5631027	5,59048E-05	8,38573E-13	0,001808223	93750000000	0,70754717
-24,6	-25,0213361	9,555E-05	5,63745E-12	0,01410565	3,6875E+11	2,398373984
-28,3	-28,7847078	6,48791E-05	2,33565E-12	0,006723089	2,25E+11	1,272084806
-31,8	-32,3446540	0,000100468	1,0951E-11	0,035420513	6,8125E+11	3,427672956
-35,1	-35,7011747	0,000116643	2,08791E-11	0,074540902	1,11875E+12	5,0997151
-38,6	-39,2611209	0,000118387	2,64004E-11	0,103650736	1,39375E+12	5,777202073
-42,4	-43,1262054	0,000139389	5,19921E-11	0,224222062	2,33125E+12	8,797169811
-44,8	-45,5673113	0,000137124	5,52611E-11	0,251809821	2,51875E+12	8,995535714

Πίνακας Β 2.12.2 (β) Κινητικότητα ηλεκτρονίων (b), ειδική αγωγιμότητα (σ), πυκνότητα ροής (J), αριθμός ηλεκτρονίων (N) και αύξηση χωρητικότητας (ΔC) λόγω μερικών εκκενώσεων

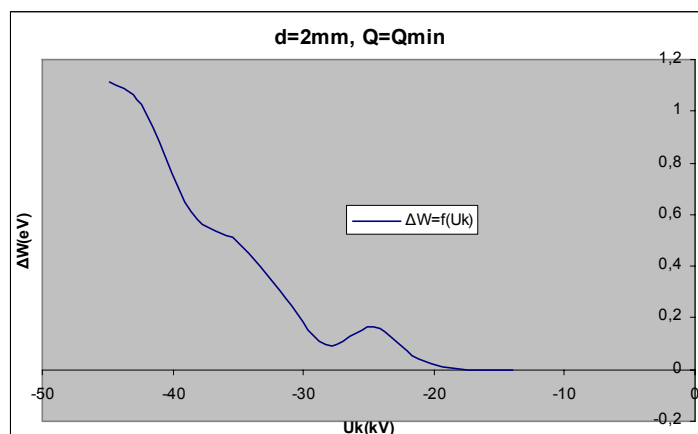
Πίνακες Β 2.12.2 Τιμές Υπολογιζόμενων Μεγεθών



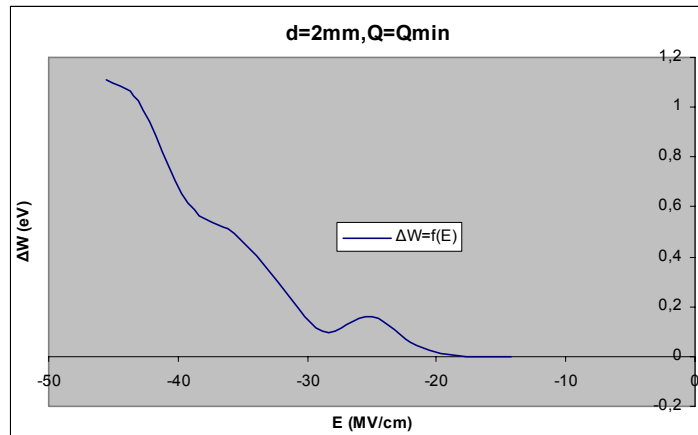
Σχήμα Β 2.12.1 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



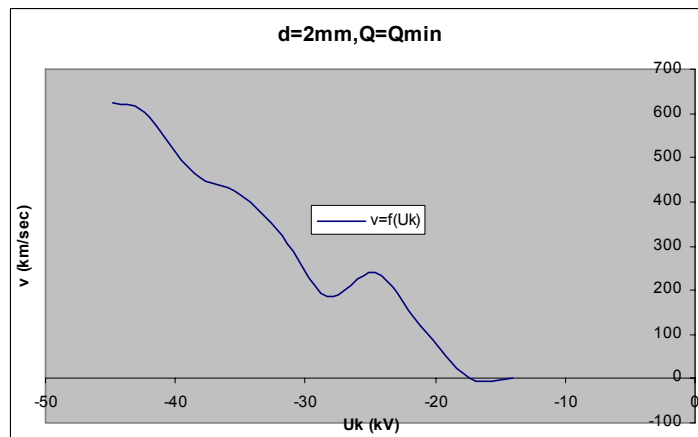
Σχήμα Β 2.12.2 Μεταβολή Άλματος Δυναμικού σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



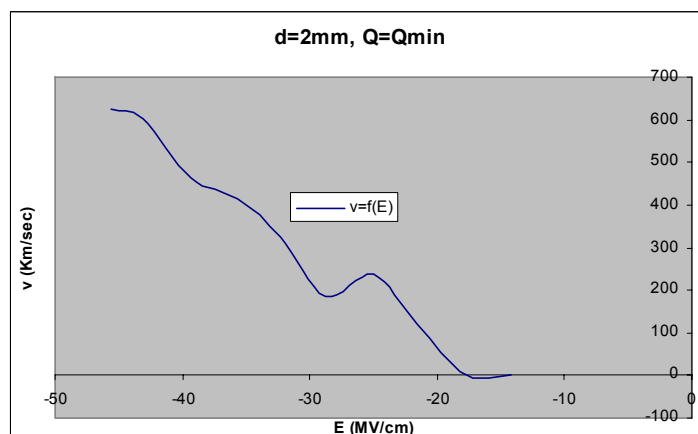
Σχήμα Β 2.12.3 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



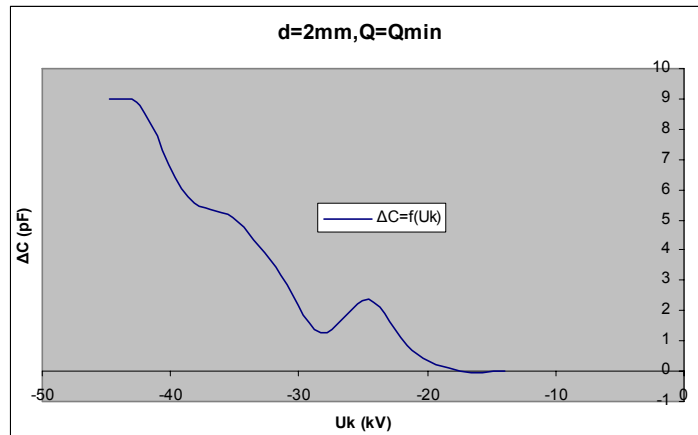
Σχήμα Β 2.12.4 Μεταβολή Ενέργειας Η/Μ Ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



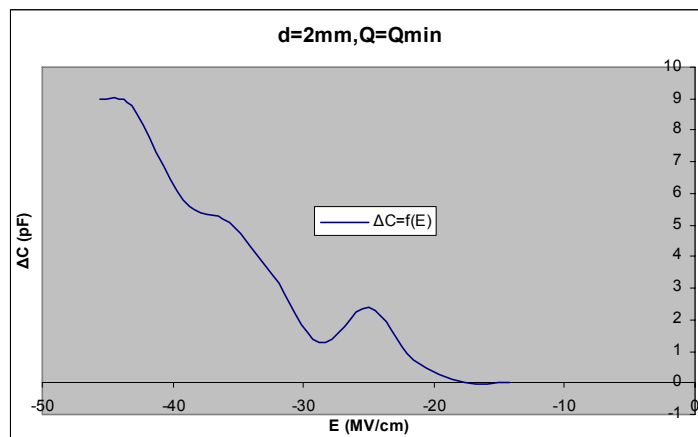
Σχήμα Β 2.12.5 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



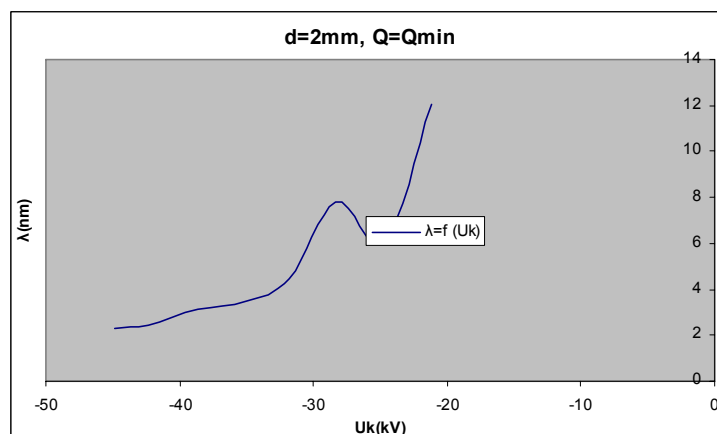
Σχήμα Β 2.12.6 Μεταβολή Ταχύτητας Ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



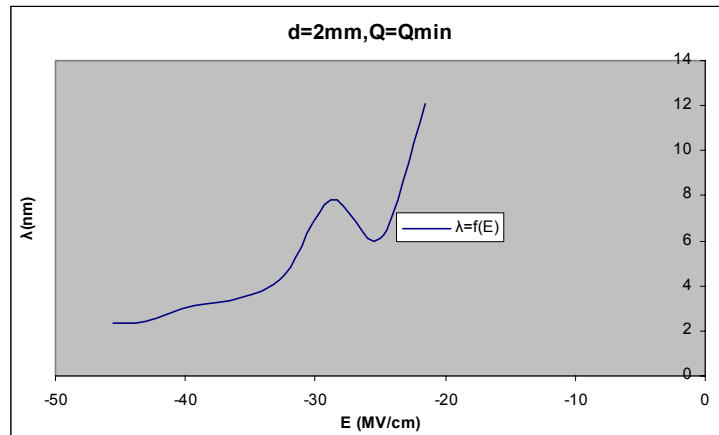
Σχήμα Β 2.12.7 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



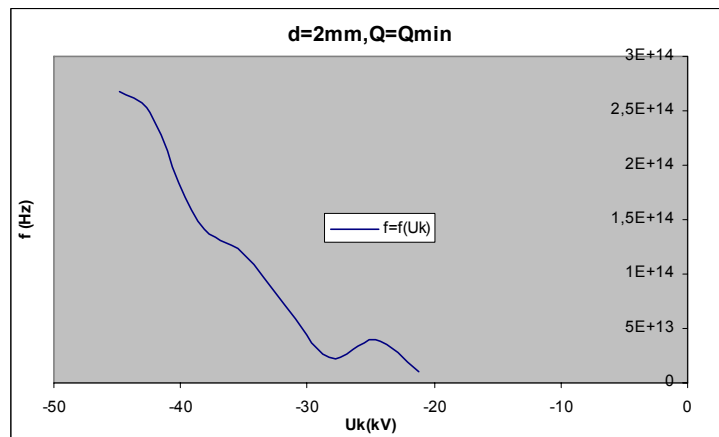
Σχήμα Β 2.12.8 Μεταβολή Χωρητικότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



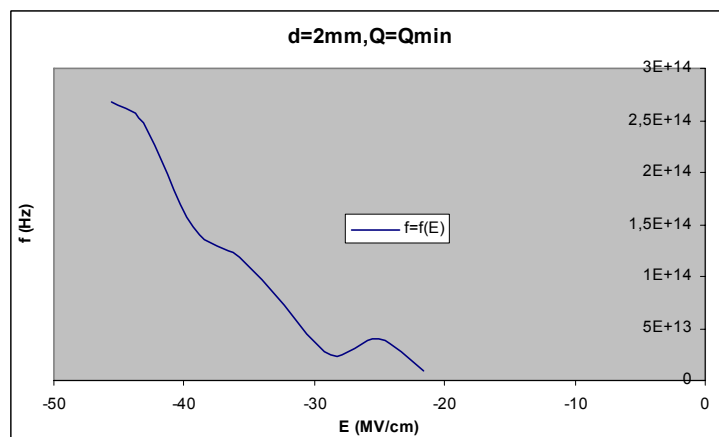
Σχήμα Β 2.12.9 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



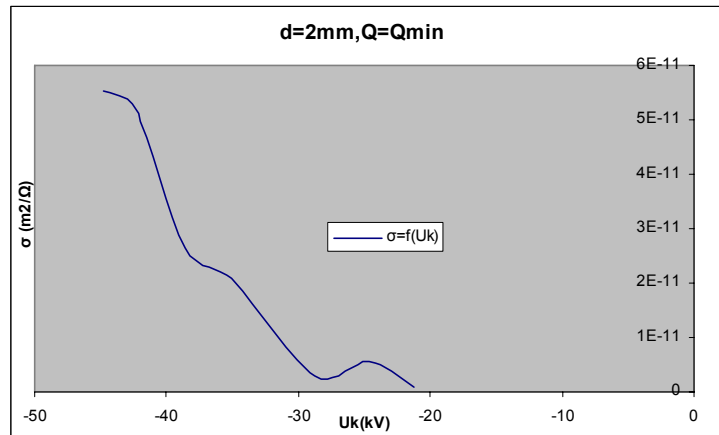
Σχήμα Β 2.12.10 Μεταβολή Μήκους Κύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



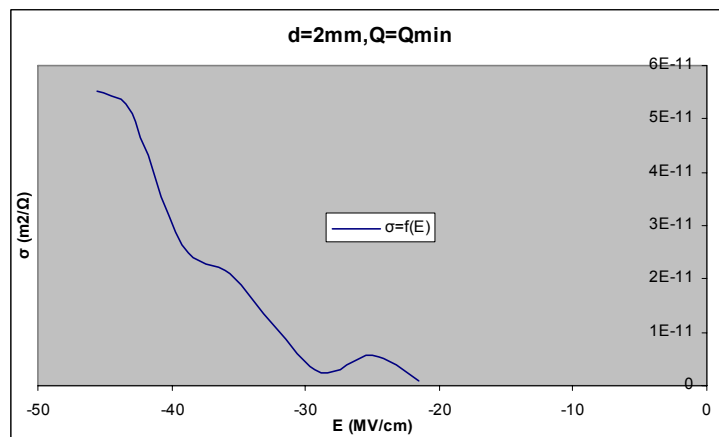
Σχήμα Β 2.12.11 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



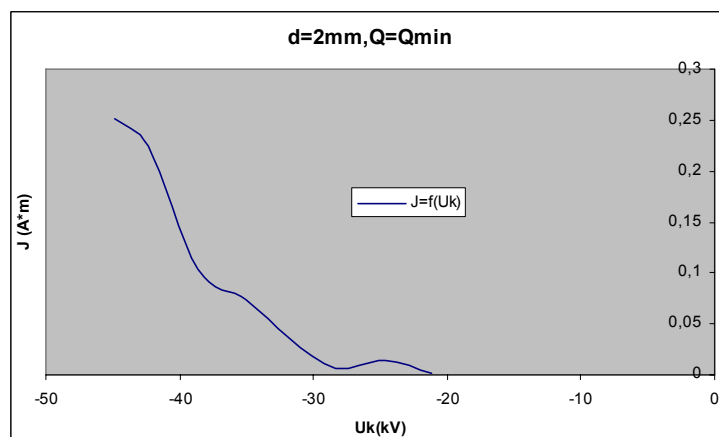
Σχήμα Β 2.12.12 Μεταβολή Συχνότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



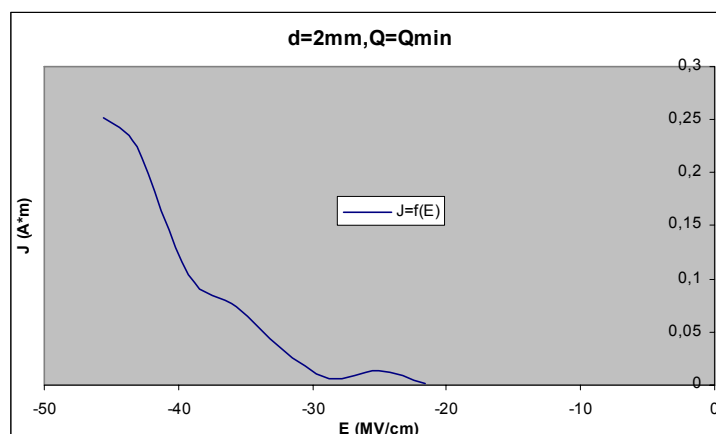
Σχήμα Β 2.12.13 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.12.14 Μεταβολή Ειδικής Αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου



Σχήμα Β 2.12.15 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Κρουστική Τάση



Σχήμα Β 2.12.16 Μεταβολή Πυκνότητας Ρεύματος σε συνάρτηση με την Ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου

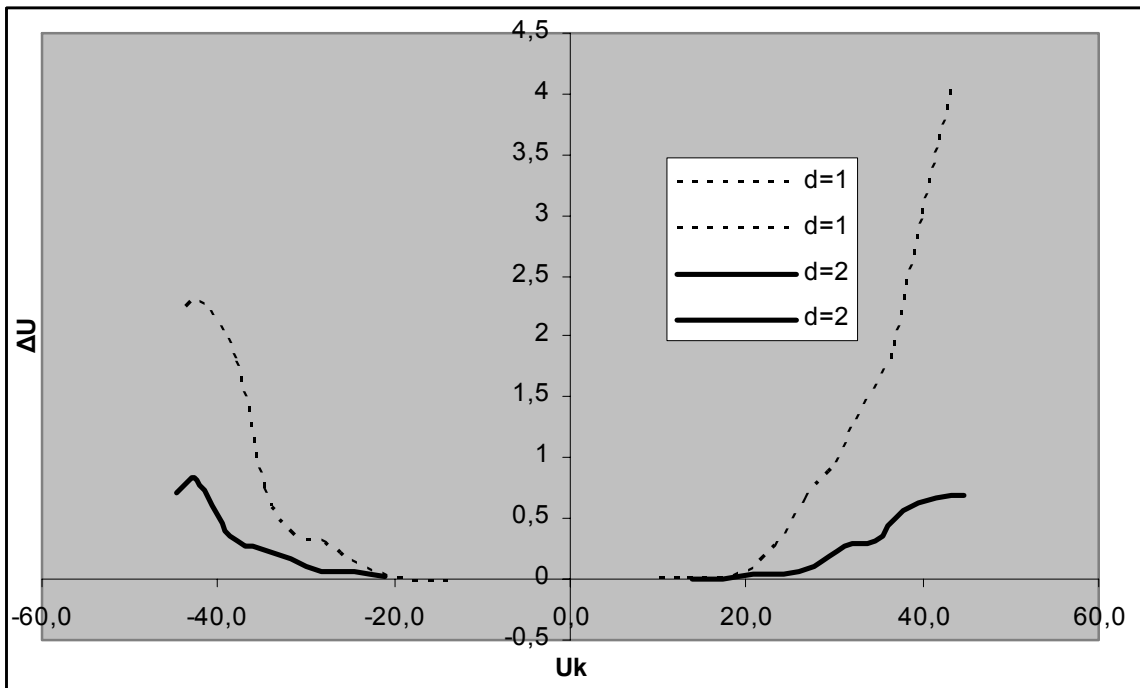
Γ. ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Από τις μετρήσεις της ενέργειας συναρτήσει της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης (ή της αντίστοιχης προς αυτήν πεδιακής έντασης), φαίνεται εκθετική αύξηση της ενέργειας οφειλόμενη κατά πάσα πιθανότητα στην εκθετική αύξηση του φορτίου κατά την σχέση $Q = Q_0 e^{A(E^2 - E_0^2)/E_0^2}$ όπου:

- Q_0, E_0 : Φορτίο και πεδιακή ένταση αντίστοιχα κατά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων
- A : Συντελεστής του υλικού που εξαρτάται από τον χρόνο
- Q, E : οι υπολογιζόμενες τιμές ανά επίπεδο τάσης

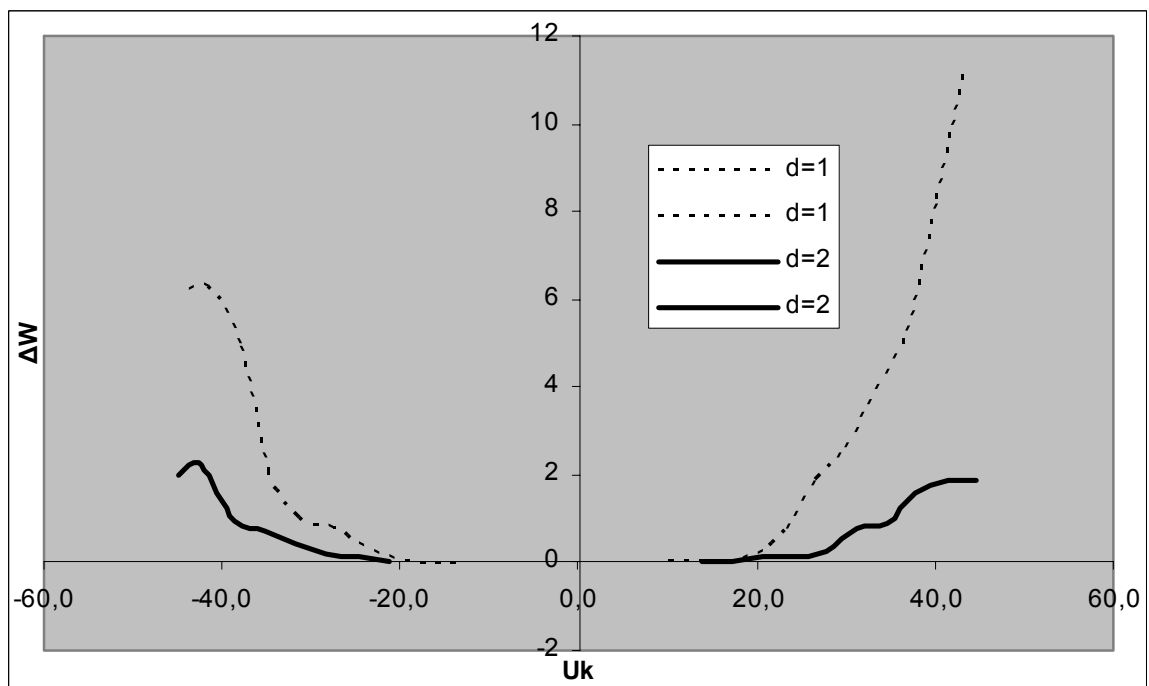
Από την προαναφερθείσα εκθετική μορφή, μπορεί κανείς να υποθέσει, ότι στα στερεά μονωτικά η γήρανση οφείλεται στον ιονισμό με κρούσεις.

2. Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται πώς επηρεάζει το πάχος του δοκιμίου και η πολικότητα της κρουστικής τάσης τα άλματα δυναμικού. Όσο μικρότερο είναι το πάχος του μονωτικού, τα άλματα δυναμικού αυξάνονται σημαντικά με άμεσο συμπέρασμα, τα μονωτικά αυτά να είναι περισσότερο επιρρεπή στις μερικές εκκενώσεις. Επίσης φαίνεται ότι τα άλματα δυναμικού τείνουν να σταθεροποιηθούν πιο γρήγορα σε παχύτερα δοκίμια. Τέλος κατά την εφαρμογή κρουστικής τάσης ανάστροφης πολικότητας, μετά από κάποια τιμή τάσης (μεγαλύτερης τιμής για δοκίμια πάχους 2mm) έχουμε μείωση των αλμάτων Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το φαινόμενο της πολικότητας, σύμφωνα με το οποίο προκαλείται εξομάλυνση του πεδίου προ της αρνητικής ακίδας, λόγω συγκέντρωσης θετικών ηλεκτρικών φορέων.



Σχήμα Δ.1 Επίδραση πάχους δοκιμίου και πολικότητας κρουστικής τάσης στα άλματα δυναμικού

3. Παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της προηγούμενης παραγράφου εμφανίζει και η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού ενέργεια και άλματα δυναμικού είναι μεγέθη ανάλογα σύμφωνα με την σχέση B 1.1-5. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπεριώδης ακτινοβολία εμφανίζεται μόνο σε πάχος δοκιμίου 1mm και θετική πολικότητα τάσης, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις εμφανίζονται υπέρυθρη και φωτεινή ακτινοβολία.



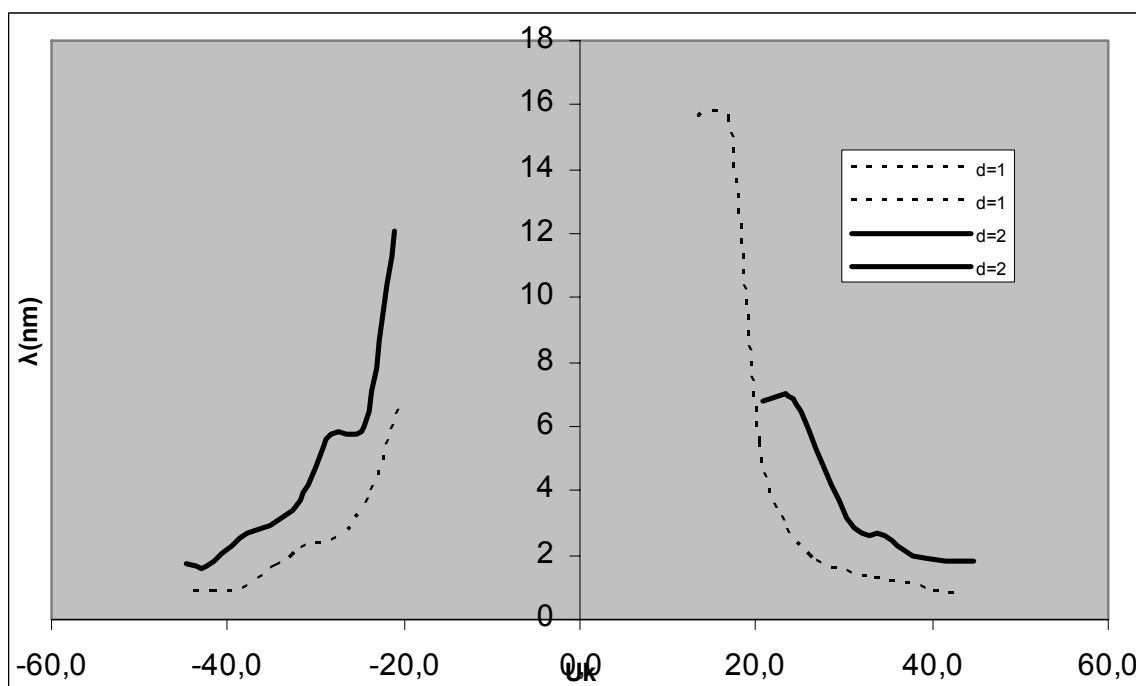
Σχήμα Δ.2 Επίδραση πάχους δοκιμίου και πολικότητας κρουστικής τάσης στην ενέργεια της ακτινοβολίας

4. Κατόπιν έρευνας στο Διαδίκτυο η αντιστοίχιση του είδους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και του μήκους κύματος έχει ως εξής:

ΕΙΔΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (σε μm)
Ακτίνες X	0.00001-0.01
Υπεριώδης	0.1 – 0.37
α. UV-C (μικρού μήκους)	0.10-0.28
β. UV-B (μεσαίου μήκους)	0.28-0.315
γ. UV-A (μεγάλου μήκους)	0.315-0.37
Ορατό Φως	0.38-0.77
Υπέρυθρη	0.77-1000
α. IR-A (μικρού μήκους)	0.78-1.4
β. IR-B (μεσαίου μήκους)	1.4-3
γ. IR-C (μεγάλου μήκους)	3-1000

Πίνακας Δ.1 Μήκη κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

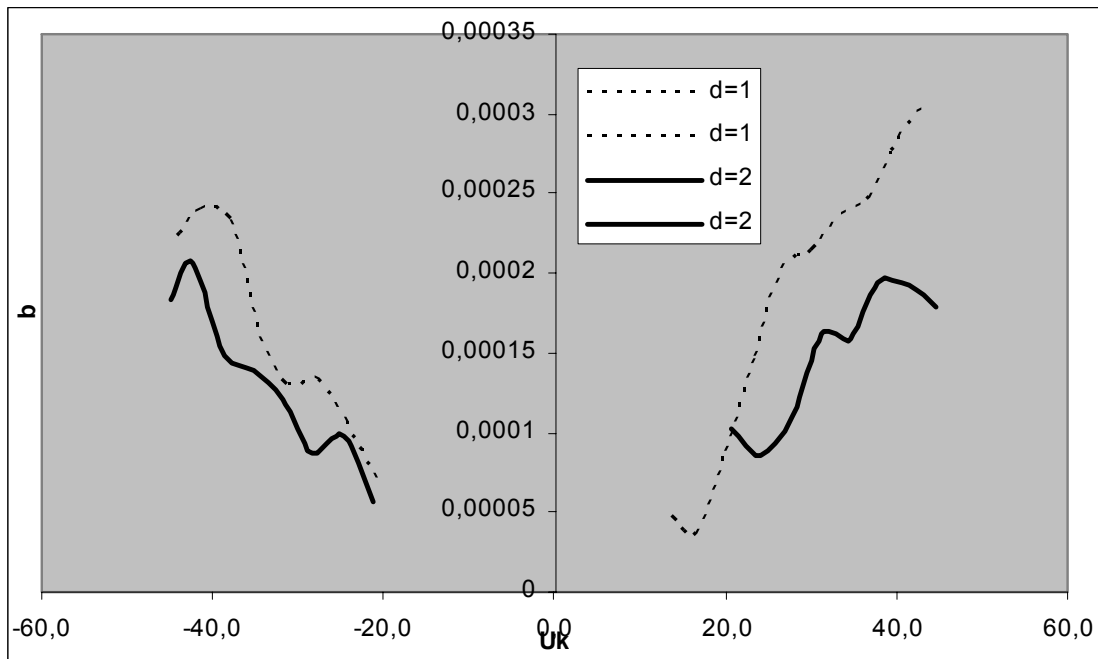
Η αναντιστοιχία που υπάρχει με τους υπολογισμούς σε αυτήν την εργασία εντοπίζεται στο γεγονός ότι, ενώ η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται έχοντας σαν κριτήριο την ενέργειά της σύμφωνα με τον πίνακα Β1.1-1, τα υπολογιζόμενα μήκη κύματος δεν ανήκουν στις περιοχές του Πίνακα Δ.1 όπως θα αναμενόταν, αλλά είναι πολύ μικρότερα (της τάξης nm). Αυτό συμβαίνει γιατί, πιθανώς, δεν ευσταθεί ο υπολογισμός της ταχύτητας, καθώς η ακτινοβολία κατά την ηλεκτρική καταπόνηση των στερεών μονωτικών έχει μετρηθεί σε όλο το φάσμα της. Σίγουρα πάντως είναι ένα θέμα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.



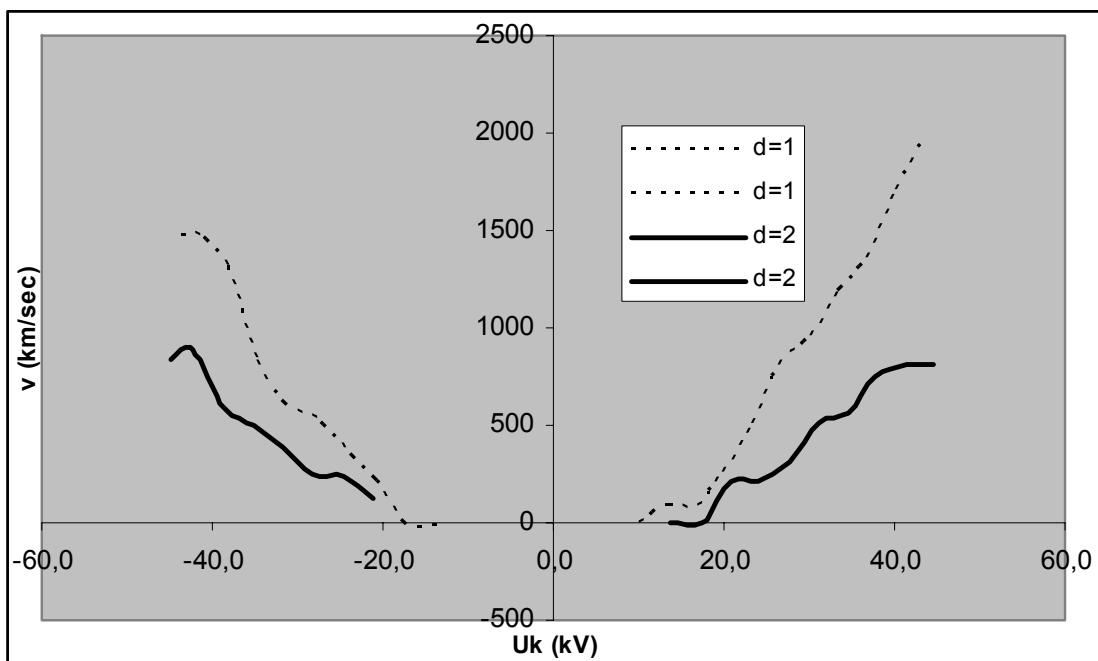
Σχήμα Δ.3 Επίδραση πάχους δοκιμίου και πολικότητας κρουστικής τάσης στο μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας

5. Παρόμοια συμπεριφορά με τις καμπύλες των σχημάτων Δ.1 και Δ.2 εμφανίζουν ο αριθμός των ηλεκτρονίων N , η ειδική αγωγιμότητα σ , η πυκνότητα ρεύματος J και η

χωρητικότητα ΔC , ενώ λίγο διαφορετική είναι η μορφή των καμπυλών για την ταχύτητα και την κινητικότητα των ηλεκτρονίων (Σχήματα Δ.4, Δ.5). Η γενική παρατήρηση είναι ότι δοκίμια μεγαλύτερου πάχους απαιτούν μεγαλύτερες κρουστικές τάσεις για την εκδήλωση φαινομένων, τα οποία δεν είναι τόσο έντονα όσο στα πιο λεπτά και επιπλέον η ανάστροφη πολικότητα της τάσης εμφανίζει λίγο διαφορετική συμπεριφορά από την θετική. Επίσης στα σημεία όπου οι καμπύλες εμφανίζουν πτώση συμβαίνει υπαναχώρηση των μερικών εκκενώσεων προς όφελος των δυνάμεων Coulomb. Όταν όμως επικρατούν οι μερικές εκκενώσεις παρατηρείται εκθετική αύξηση των μεγεθών.



Σχήμα Δ.4 Επίδραση πάχους δοκιμίου και πολικότητας κρουστικής τάσης στην κινητικότητα των ηλεκτρονίων



Σχήμα Δ.5 Επίδραση πάχους δοκιμίου και πολικότητας κρουστικής τάσης στην ταχύτητα των ηλεκτρονίων

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ
Π.Δ. Μπούρκας και Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος
Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
Αθήνα 2003
2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΤΙΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ
Π.Δ. Μπούρκας
Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
Αθήνα 1998
3. ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ Ι
Ι.ΑΘ. Σταθόπουλος
Εκδόσεις Συμεών
4. Διπλωματική Εργασία : «Στατιστική ανάλυση των μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά υπό κρουστικές τάσεις χειρισμού και υπό κεραυνικές τάσεις »
Δ.Δ. Δημητριάδου
Αθήνα 2004
5. Διπλωματική Εργασία : «Μελέτη μερικών εκκενώσεων σε βιομηχανικό υλικό τύπου Pertinax υπό κρουστική τάση σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα»
Αναστάσιος Ε. Τσικουρλής
Αθήνα 2007

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

6. http://www.geo.auth.gr/431/th/Lesson02_Radiation.pdf «Η Ηλιακή Ακτινοβολία»
7. <http://panacea.med.uoa.gr> « Τα laser και οι εφαρμογές τους» - ΙΑΣΠΙΣ
8. <http://www.astro.noa.gr> « Αστρονομία στο Υπέρυθρο-Ένας αθέατος κόσμος»-Δρ Μανώλης Ξυλούρης
9. <http://www.materials.uoc.gr> « Οπτική και κύματα » - Δημ Παπάζογλου
10. <http://el.wikipedia.org/> « Ακτίνες Χ »