



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

Ηλεκτρική διάσπαση δειγμάτων χώματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντιγόνη Ι. Λοΐζου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπουσα : Φανή Η. Ασημακοπούλου

Αθήνα, Μάρτιος 2010



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

155

Ηλεκτρική διάσπαση δειγμάτων χώματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντιγόνη Ι. Λοΐζου

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^α Μαρτίου 2010.

.....
Ιωάννης
Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος
Β. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος
Γ. Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2010

.....
Αντιγόνη Ι. Λοΐζου

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

Copyright © Αντιγόνη Ι. Λοΐζου

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.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ.....	2
1.3 ΕΙΔΗ ΓΕΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΙΩΣΗΣ	10
1.3.1 ΕΙΔΗ ΓΕΙΩΣΗΣ	10
1.3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΛΗΞΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	11
1.4 ΕΙΔΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	14
1.5 ΙΟΝΙΣΜΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	20
1.5.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	20
1.5.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΙΟΝΙΣΜΟ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	22
1.5.2.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων.....	22
1.5.2.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης.....	26
1.5.2.3 Μοντέλο Διατήρησης Ενέργειας.....	33
1.5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΔΙΑΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ E_0	40
1.5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΙΟΝΙΣΜΟΥ	40
1.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	42
1.6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ	42
1.6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟΝ ΙΟΝΙΣΜΟ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	46
1.6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΙΟΝΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΨΗΛΩΝ ΚΡΟΥΣΤΙΚΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ	50
1.6.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ ΣΕ ΕΔΑΦΗ ΧΑΜΗΛΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	60
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	69
2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	69
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	70
2.3.1 ΛΥΟΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΟΝΟΒΑΘΜΙΑΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	71
2.3.2 ΤΡΑΠΕΖΑ ΧΕΙΡΙΣΜΩΝ	73
2.3.3 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	74
2.3.4 ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗΣ	75
2.3.5 ΑΜΠΕΡΟΤΣΙΜΠΙΔΑ	76
2.3.6 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΣ ΤΕΚΤΡΟΝΙΧ TDS 3052.....	76
2.3.7 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΑ ΚΑΛΩΔΙΑ.....	77
2.3.8 ΘΕΡΜΟΜΕΤΡΟ-ΥΓΡΟΜΕΤΡΟ	78
2.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	78
2.4.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΧΩΜΑΤΟΣ	78
2.4.2 ΔΟΚΙΜΙΟ.....	80
2.4.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	81
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	88
3.2 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	88

3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	88
3.2.2 ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	92
3.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	94
3.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ.....	95
3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	95
3.3.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ.....	96
3.3.3 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ.....	98
3.3.3.1 Κανονική κατανομή.....	98
3.3.3.2 Τραπεζοειδής κατανομή.....	100
3.3.3.3 Η κατανομή Student (t-distribution).....	101
3.3.3.4 Η κατανομή χ^2 (Chi-square).....	102
3.4 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	103
3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	103
3.4.2 ΑΠΟ ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΗΝ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ.....	105
3.4.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ (ΤΥΠΟΥ Α & ΤΥΠΟΥ Β).....	107
3.4.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ Α.....	109
3.4.5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΤΥΠΟΥ Β.....	111
3.4.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ.....	112
3.4.7 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ-ΝΟΜΟΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ.....	112
3.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ.....	113
3.5.1 ΟΡΙΣΜΟΙ.....	113
3.5.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΥΞΟΜΕΙΩΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	115
3.5.3 ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	117
4.1 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ.....	119
4.1.1 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	120
4.1.2 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	122
4.1.3 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 5% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	124
4.1.4 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 10% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	126
4.1.5 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	129
4.1.6 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Β, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	131
4.1.7 ΠΑΛΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Β, ΥΓΡΑΣΙΑ 5% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	134
4.2 ΣΧΟΛΙΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	136
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	138
5.1.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΥ Α.....	138
5.1.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΤΥΠΟΥ Β.....	143
5.1.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΛΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ.....	147
5.1.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΔΙΑΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ.....	149
5.1.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	152
Π.1 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ.....	155
Π.1.1 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	156
Π.1.1.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2cm.....	156
Π.1.1.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,3cm.....	157
Π.1.2 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.....	158
Π.1.2.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,1cm.....	158
Π.1.2.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,5cm.....	159
Π.1.2.3 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,3cm.....	160
Π.1.2.4 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2cm (Α' ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ).....	161
Π.1.2.5 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 1,8cm.....	162
Π.1.2.6 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 1,9cm.....	163
Π.1.2.7 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 1,95cm.....	164

Π.1.2.8 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2CM (Β' ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ)	165
Π.1.2.9 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2CM (Γ' ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ).....	166
Π.1.2.10 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,1CM	167
Π.1.2.11 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,05CM	168
Π.1.3 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 5% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ	170
Π.1.3.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3CM	170
Π.1.3.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,9CM(Α' ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ)	171
Π.1.4 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 10% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.	173
Π.1.4.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,2CM.	173
Π.1.4.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,3CM.	175
Π.1.4.3 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,4CM	176
Π.1.5 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Α, ΥΓΡΑΣΙΑ 10% ΚΑΙ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.	177
Π.1.5.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,0CM.	177
Π.1.5.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,5CM	178
Π.1.5.3 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,3CM.	179
Π.1.5.4 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,45CM.	180
Π.1.5.5 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,4CM	181
Π.1.5.6 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,42CM.	182
Π.1.5.7 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 5CM.	184
Π.1.5.8 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,9CM.	186
Π.1.5.9 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 4,7CM	187
Π.1.6 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Β, ΥΓΡΑΣΙΑ 0% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.	188
Π.1.6.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 2,5CM.	188
Π.1.6.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,5CM.	189
Π.1.6.3 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3CM	190
Π.1.6.4 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,3CM.	191
Π.1.6.5 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,2CM.	192
Π.1.6.6 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,25CM.	193
Π.1.7 ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΔΕΙΓΜΑ ΧΩΜΑΤΟΣ Β, ΥΓΡΑΣΙΑ 5% ΚΑΙ ΘΕΤΙΚΗ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑ.	195
Π.1.7.1 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,25CM	195
Π.1.7.2 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,4CM	197
Π.1.7.3 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,6CM	198
Π.1.7.4 ΔΙΑΚΕΝΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ: 3,45CM	199

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της διάσπασης του εδάφους, ο προσδιορισμός της κρίσιμης έντασης E_c που απαιτείται για την έναρξη του φαινομένου, της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ καθώς και των αβεβαιοτήτων της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, του χρόνου διάσπασης $t_{U50\%}$, του ρεύματος κορυφής I_{peak} και του χρόνου ρεύματος κορυφής t_{ipeak} . Για το λόγο αυτό εισάγονται και αναλύονται έννοιες όπως η γείωση και τα είδη της, καθώς και η ειδική αντίσταση του εδάφους (χώματος). Παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία αναφέρονται πορίσματα πειραματικών ερευνών. Επίσης, περιγράφονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και ο τρόπος διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα που ελήφθησαν από τη διεξαγωγή των δοκιμών και τέλος, από την επεξεργασία των μετρήσεων εξάγονται συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά

Γείωση, ειδική αντίσταση, ηλεκτρική διάσπαση του εδάφους, θερμικός μηχανισμός, ιονισμός του εδάφους, τάση διάσπασης $U_{50\%}$, κρίσιμη ένταση ιονισμού E_c , αβεβαιότητα.

Πρόλογος

Η εργασία αυτή αποτελεί τη διπλωματική εργασία της φοιτήτριας Λοΐζου Αντιγόνης για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της διάσπασης του εδάφους τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πειραματικό επίπεδο. Σκοπός της είναι ο προσδιορισμός των αβεβαιοτήτων της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, του χρόνου διάσπασης $t_{U50\%}$, του ρεύματος κορυφής I_{peak} και του χρόνου ρεύματος κορυφής t_{peak} καθώς και της κρίσιμης πεδιακής έντασης και της τάσης διάσπασης και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά αυτών των μεγεθών. Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας εφαρμόστηκε κρουστική τάση σε δοκίμιο μεταξύ παράλληλων πλακών. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των θεμάτων που καλύπτονται σε κάθε κεφάλαιο.

Στο **Κεφάλαιο 1** της παρούσας εργασίας εισάγεται η έννοια της γείωσης και ορίζονται κάποια συναφή μεγέθη, τα οποία κρίθηκαν απαραίτητα για την καλύτερη κατανόηση της. Εν συνεχεία, αναφέρονται τα είδη και οι μέθοδοι γείωσης, η ειδική αντίσταση με τους παράγοντες, που την επηρεάζουν και επιπλέον παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση από δημοσιευμένες εργασίες που αφορούν τον ιονισμό και τη διάσπαση του εδάφους.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και τα όργανα που την αποτελούν. Επίσης περιγράφεται ο τρόπος της προετοιμασία των προς μέτρηση υλικών, όπως και διαδικασία των μετρήσεων.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής απαραίτητες για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, ο ορισμός της αβεβαιότητας και η μέθοδος προσδιορισμού της, καθώς επίσης και η μεθοδολογία υπολογισμού της τάσης διάσπασης.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα, που ελήφθησαν κατά τις δοκιμές για τάση διάσπασης $U_{50\%}$ και καταγράφονται παρατηρήσεις επ' αυτών.

Στο **Κεφάλαιο 5** υπολογίζεται η κρίσιμη ένταση διάσπασης καθώς και οι αβεβαιότητες της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, του χρόνου διάσπασης $t_{U50\%}$, του ρεύματος κορυφής I_{peak} και του χρόνου ρεύματος κορυφής t_{Ipeak} , και καταγράφονται σε πίνακες τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ύστερα από την επεξεργασία με τα προγράμματα matlab και excell. Παρατίθενται ραβδογράμματα και γραφήματα και εξάγονται συμπεράσματα μέσω αυτών.

Στο **Παράρτημα** παρατίθεται το σύνολο των παλμογραφήματα, που καταγράφηκαν κατά την προσπάθεια προσδιορισμού της τάσης διάσπασης 50% για τα διάφορα δοκίμια.

Στο σημείο αυτό, θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω θερμά όλους όσοι συνέδραμαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την αμέριστη συμπαράστασή του, το ευχάριστο και ασφαλές εργασιακό περιβάλλον, που μου παρείχε, καθώς και την ένδειξη πραγματικού ενδιαφέροντος για την πορεία της διπλωματικής μου εργασίας.

Την Κυρία Φανή. Η. Ασημακοπούλου, υποψήφια διδάκτορα και μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου για την καθοδήγηση, υποστήριξη και συμπαράστασή της, για την ουσιαστική βοήθεια που πρόθυμα και ακούραστα μου παρείχε κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας, καθώς και για το φιλικό και ευχάριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, που πρόθυμα προσέφερε τη βοήθεια του και τις γνώσεις του πάνω σε θέματα που αφορούσαν τη διπλωματική μου.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τους κ. κ. Χρήστο Ηλία και Αριστείδη Γιάννακα για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Τέλος, δε θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου, καθώς και για την κατανόηση που επέδειξαν και τη στήριξη που μου παρείχαν σε δύσκολες στιγμές κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Συστήματα γείωσης-Βασικές έννοιες

1.1 Εισαγωγή

Με τον όρο γείωση εννοούμε την σκόπιμη ή τυχαία αγωγήμη σύνδεση μεταξύ ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή μιας συσκευής με τη γη ή αγωγίμο σώμα μεγέθους τέτοιου που να μπορεί να θεωρηθεί γη [1]. Η γείωση παίζει σημαντικό και καθοριστικό ρόλο στην κατασκευή υποσταθμών υψηλής και υπερύψηλης τάσεως αλλά και γενικά στις κτιριακές εγκαταστάσεις παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη. Έτσι προστατεύονται από ηλεκτροπληξία άτομα που είτε δουλεύουν είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος γείωσης να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά να είναι ίση με το μηδέν) ώστε το ρεύμα να οδεύει ευκολότερα στη γη, διατηρώντας τις μέγιστες διαφορές δυναμικού (βηματική τάση και τάση επαφής) που δημιουργούνται κάτω από συγκεκριμένα όρια.

Συνοπτικά ένα σύστημα γείωσης αποσκοπεί [2]:

- Στην προστασία του ανθρώπου από τις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.
- Στην προστασία της κατασκευής και του εξοπλισμού από κεραυνοπληξίες ή ρεύματα σφαλμάτων.
- Στην μείωση του ηλεκτρικού θορύβου, εξασφάλιση ελάχιστης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διασυνδεδεμένων συσκευών και περιορισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών ζεύξεων.

1.2 Βασικοί ορισμοί

Βηματική τάση είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω βηματισμού [3].

Τάση επαφής είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ ενός γειωμένου μεταλλικού ικριώματος και ενός σημείου της επιφάνειας της γης σε οριζόντια απόσταση 1m [3].

Ηλεκτρόδιο γείωσης ή γειωτής είναι ένας αγωγός εμπεγμένος στη γη, ο οποίος διαχέει το ρεύμα στη γη. Τα είδη γειωτών που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1.1** και είναι τα ακόλουθα [3]:

- **Γειωτής ράβδου:** Είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μία ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U, L, T ή I-προφίλ. Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20^0) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος, π.χ. 2,5m με σφυρί χεριού, ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους (Πίνακας 1.1). Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Εφ' όσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.
- **Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινο:** Ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 0,5m. Το βάθος που προτιμάται είναι 0,7-1,0m, για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμα ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόχου. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δεν συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης, αν και το επιτρέπουν οι Κ.Ε.Η.Ε. [4], γιατί διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτό το

λόγο δεν το συνιστούν και οι κανονισμοί VDE 100 [5]. Μία περίπτωση του γειωτή ταινίας είναι η θεμελιακή γείωση, που θα εξετάσουμε λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο.

- **Γειωτής πλάκας:** Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου, π.χ. $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$, η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1,0m. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3mm ή χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2mm.
- **Γειωτής ακτινικός:** Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες (Πίνακας 1.1). Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0,8 m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως στον γειωτή ταινίας.
- **Γειωτής πλέγματος:** Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 0,7-2,0m τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0,5-1,0m (Πίνακας 1.1). Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Επιτρέπονται, προφανώς, και ανοίγματα μικρότερα από 0,7m. Σε αυτή την περίπτωση ωστόσο δεν επιτυγχάνονται μικρότερες βηματικές τάσεις απ' ότι σε πλέγματα με ανοίγματα 0,7m.
- **Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές:** Γίνεται διάκριση στους γειωτές ανάλογα με το βάθος τους, σε επιφανειακούς γειωτές, π.χ. γειωτές ταινίας, πλέγματος και ακτινικούς γειωτές και βαθείς γειωτές, π.χ. γειωτές ράβδου.
- **Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης:** Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά και μάλιστα 30cm μέσα και 30cm έξω από το έδαφος. Οι συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης γίνονται σε γειώσεις ουδέτερου με Cu, ελάχιστης διατομής ίσης με τη διατομή του ουδετέρου, όχι όμως μικρότερη των 16 mm^2 (HO7V-U), μονόκλωνα. Σε εγκαταστάσεις αλεξικέραυνου η ελάχιστη διατομή για

χαλκό είναι 50mm^2 . Η σύνδεση του ουδετέρου του Μ/Σ με τον γειωτή γίνεται με καλώδια H07-R (πριν NYA) 25mm^2 τουλάχιστον.

Σύστημα γείωσης είναι ένα σύνολο ομοειδών ή μη γειωτών, συνδεδεμένων με αγωγό (αγωγό γείωσης) καθώς και το σύνολο των εξαρτημάτων που απαιτούνται για τη σύνδεση και στήριξη αυτών.

Η επιλογή του είδους του συστήματος γείωσης εξαρτάται από το έδαφος (βραχώδες, αμμώδες), το χρήσιμο χώρο, τις κλιματολογικές συνθήκες, το κόστος κλπ. Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη είναι: πολυγωνική (τριγωνική κλπ) διάταξη, σύστημα γείωσης με πλάκες, περιμετρική γείωση, θεμελιακή γείωση, το δίκτυο ύδρευσης, γείωση τύπου 'Ε' ή και συνδυασμός ορισμένων από αυτά [6], [7], [8].

- **Πολυγωνική διάταξη:** Κατασκευάζεται από ραβδοειδείς γειωτές οι οποίοι τοποθετούνται στις κορυφές ισόπλευρου πολυγώνου, συνήθως τριγώνου (τριγωνική γείωση). Οι ράβδοι συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης ανάλογης διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Η απόσταση μεταξύ των ράβδων πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορές του βάθους έμπτυξης.
- **Γείωση με πλάκες:** Κατασκευάζεται από πλάκες οι οποίες τοποθετούνται σε τυχαία διάταξη αρκεί η απόσταση μεταξύ τους να είναι τουλάχιστον 3m. Οι πλάκες συνδέονται μεταξύ τους με αγωγό γείωσης ανάλογης διατομής με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης.
- **Περιμετρική γείωση:** Κατασκευάζεται από γειωτή ταινίας ο οποίος τοποθετείται σε όρυγμα βάθους 50cm ως 70cm συνήθως για να υπάρχει υγρό έδαφος περιμετρικά του κτιρίου, και σε απόσταση από αυτό περίπου 2m διότι τα χώματα κοντά στο κτίριο συνήθως δεν είναι αγωγίμα (μπάζα).
- **Θεμελιακή γείωση:** Η θεμελιακή γείωση είναι ένας γειωτής ταινίας που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση γίνεται στη βάση των εξωτερικών τοίχων και είναι ένας κλειστός βρόγχος. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό όλο το έτος συνήθως, ο θεμελιακός γειωτής έχει

σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τιμές των 2Ω ή μικρότερες δεν είναι σπάνιες. Σε κτίρια μεγάλης περιμέτρου συνίσταται η τοποθέτηση εγκάρσιων τμημάτων ταινίας έτσι ώστε κανένα σημείο του υπογείου να μην απέχει περισσότερο από 10m από το γειωτή.

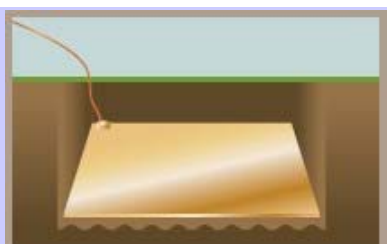
- **Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής:** Επιτρέπεται κατά το άρθρο 24 των Κ.Ε.Η.Ε. [4], χωρίς ιδιαίτερη άδεια, η χρησιμοποίηση μεταλλικών δικτύων ύδρευσης σαν γειωτές για εγκαταστάσεις με τάσεις ως προς γη μικρότερες των 250V, εφ' όσον υπάρχει η συγκατάθεση του Οργανισμού Ύδρευσης. Πάνω από αυτές τις τάσεις χρειάζεται ειδική άδεια από τον Οργανισμό Ύδρευσης. Η γραμμή γείωσης συνδέεται κατά προτίμηση πριν από τον μετρητή. Αν η σύνδεση γίνει μετά τον μετρητή, πρέπει βραχυκυκλωθεί μονίμως ο μετρητής με χάλκινο σύρμα H03V-U και διατομή τουλάχιστον 6mm^2 .

Οι σωλήνες του συστήματος ύδρευσης σήμερα φτιάχνονται από πλαστικό και έτσι δεν χρησιμοποιούνται σαν γειωτές

Προσοχή: Κατά VDE 100 [5] δεν επιτρέπεται η παράλληλη σύνδεση γειωτών από χαλκό με το δίκτυο ύδρευσης. Σχηματίζονται ηλεκτροχημικά στοιχεία με αποτέλεσμα τη διάβρωση του σιδήρου.

- **Γείωση με γειωτή τύπου 'Ε':** Κατασκευάζεται από ένα στοιχείο 'Π' και ένα ή παραπάνω στοιχεία 'Γ' και τοποθετείται εντός σκάμματος βάθους τουλάχιστον 1m πλάτους τουλάχιστον 75cm και μήκους ανάλογα με τον αριθμό των στοιχείων 'Γ' που θα τοποθετηθούν.
- **Συνδυασμός γειώσεων:** Το συνηθέστερο παράδειγμα συνδυασμού γειώσεων είναι αυτό της περιμετρικής γείωσης με ράβδους γείωσης κατά μήκος αυτής.

Στο **Σχήμα 1.1** φαίνονται μερικοί τύποι γειωτών και στο **Σχήμα 1.2** συνδυασμός συστήματος γείωσης και συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε κτιριακή εγκατάσταση.



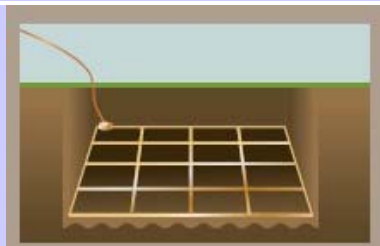
Γειωτής πλάκας



Θεμελιακή γείωση



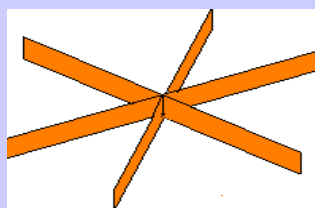
Οριζόντια θαμμένα καλώδια και ταινίες
γείωσης



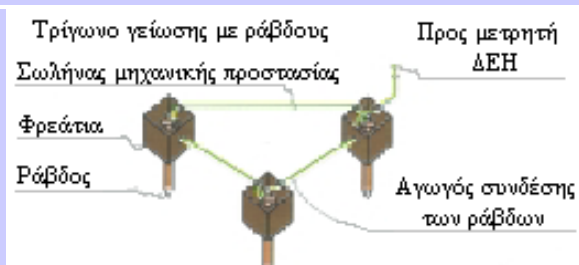
Γειωτής πλέγματος



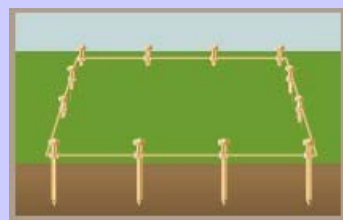
Γειωτής ράβδου



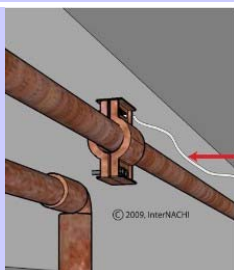
Γειωτής αστέρα



Γειωτής τριγώνου



Τετράγωνο πασσάλων

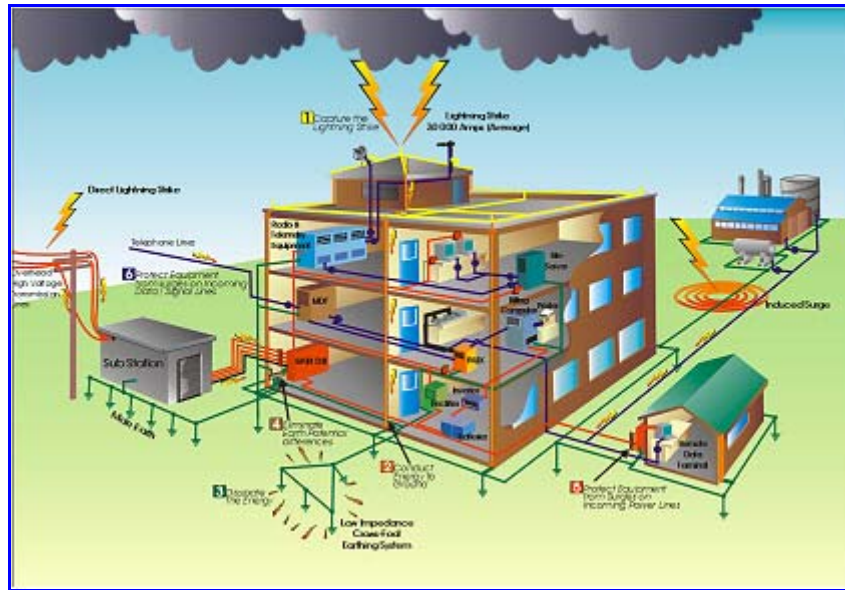


Τα δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής



Γειωτής τύπου Ε

Σχήμα 1.1 Διάφοροι τύποι γειωτών [9]-[11]

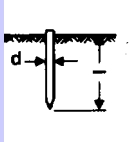
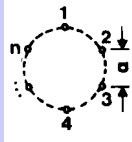
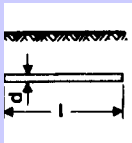
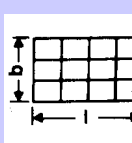
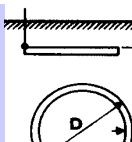
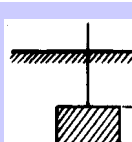


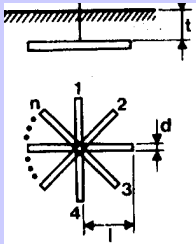
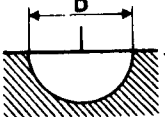
Σχήμα 1.2 Συνδυασμός συστήματος γείωσης και συστήματος αντικεραυνικής προστασίας[12]

Αντίσταση γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) προς την εκφόρτιση ρεύματος, δηλαδή $R=V/I$. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό μία ωμική αντίσταση στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [3]. Η αντίσταση γείωσης, την οποία μετράμε σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης, εκφράζει την αντίσταση διαβάσεως του ρεύματος, από το αγωγίμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους, και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για το λόγο αυτό, το υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης είναι κατά κανόνα χαλκός επικασσιτερωμένος, για την αποφυγή οξειδωσης. Η αντίσταση γείωσης R είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω, αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως R_δ .

Στον παρακάτω **Πίνακα 1.1** δίνονται μερικοί τύποι γειωτών, τοποθετημένοι σε έδαφος με τιμή ειδικής αντίστασης ρ και οι τύποι βάσει των οποίων υπολογίζεται η αντίσταση γείωσής τους [4].

Πίνακας 1.1 Τύποι αντίστασης γειωτών [4]

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}$	$R_A \approx \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασσάλων $\alpha \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ R_{A1} = αντίσταση ενός πασσάλου	$k = (1 \dots 1.5)$ για $n = 10 : k \approx 1.25$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0.5 \dots 1.0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)		$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
 S εμβαδόν επιφανείας	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$		$R_4 = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
	Πλέγμα σε βάθος $0.5 - 1.0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4bl}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right) \quad R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l_g}$ l_g συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right) \cdot \left(1 + \frac{\ln \frac{2D}{t}}{\ln \frac{8D}{d}}\right)$	$R = \frac{2\rho}{\pi D} *$
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη $S [\text{m}^2]$		$R = \frac{\rho}{4.5\alpha} **$

	$n=2$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.27td} \right)$	
	$n=3$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.25td} \right)$	
	$n=4$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.22td} \right)$	
	$n=5$	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{l^2}{0.09td} \right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D} ***$	
• D=ισοδύναμη διάμετρος. • Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος $D = 0,33U$, όπου U = μήκος αγωγού. • ** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα θέτουμε: $\alpha = \sqrt{S}$, όπου S=επιφάνεια. • *** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με $D = 1,57\sqrt[3]{V}$			

Κρουστική μεταβατική σύνθετη αντίσταση ενός συστήματος γείωσης ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη προς το εγχεόμενο ρεύμα. Αυτή η τιμή εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη μορφή του επιβαλλόμενου ρεύματος. Επειδή η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων της [2].

- Z_1 είναι η μέγιστη τιμή του λόγου της τάσης προς το ρεύμα
- Z_2 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς το ρεύμα τη στιγμή κατά την οποία η τάση λαμβάνει η μέγιστη τιμή της
- Z_3 είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος
- Z_4 είναι ο λόγος της τιμής της τάσης όταν το ρεύμα λαμβάνει η μέγιστη τιμή προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος

1.3 Είδη γείωσης και μέθοδοι γείωσης

1.3.1 Είδη γείωσης

Οι γειώσεις ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής τους διακρίνονται στα παρακάτω τρία είδη [4]:

- **Γείωση λειτουργίας** είναι η γείωση ενός τμήματος εγκαταστάσεως που ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας, όπως είναι ο ουδέτερος κόμβος γεννητριών, μετασχηματιστών ή άλλων στοιχείων του δικτύου συνδεδεμένων σε αστέρα. Η γείωση λειτουργίας εκτός της αντίστασης του ηλεκτροδίου γείωσης και της αντίστασης του αγωγού γείωσης μπορεί να περιλαμβάνει και πρόσθετες ωμικές, επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις πως αντιστάσεις για τον περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την εκδήλωση σφαλμάτων ως προς γη.

Η γείωση λειτουργίας διακρίνεται σε [13]:

Άμεση, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης.

Έμμεση, εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Η περίπτωση της ανοικτής γείωσης, δηλαδή όταν στη γραμμή της γείωσης έχει παρεμβληθεί σπινθηριστής, δεν συμπεριλαμβάνεται στις γειώσεις λειτουργίας.

- **Γείωση προστασίας**: Καλείται η γείωση κάθε αγώγιμου τμήματος των εγκαταστάσεων του δικτύου που δεν ανήκει στο κύκλωμα λειτουργίας. Η γείωση προστασίας συνδέει με τη γη όλα τα αγώγιμα μέρη μιας εγκατάστασης ή κατασκευής τα οποία δεν συμμετέχουν στη λειτουργία της (π.χ. οι γειώσεις των μεταλλικών μερών των εγκαταστάσεων, των μεταλλικών περιβλημάτων των μετασχηματιστών και των διακοπών, των μολύβδινων μανδυνών και των οπλισμών των καλωδίων, των μεταλλικών μερών του εξοπλισμού των εναέριων γραμμών, κλπ.) και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με αυτά.

- **Γείωση ασφαλείας ή αντικεραυνικής προστασίας:** Η γείωση ασφαλείας χρησιμεύει στην ασφάλεια των παρευρισκόμενων στον προστατευόμενο χώρο. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων, των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας. Η γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι η ανοικτή ή συνεχής γείωση των προστατευτικών διατάξεων κατά των κεραυνών. Αυτές οι διατάξεις διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη.

1.3.2 Μέθοδοι προστασίας έναντι ηλεκτροπληξίας σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης [13]

Οι μέθοδοι προστασίας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

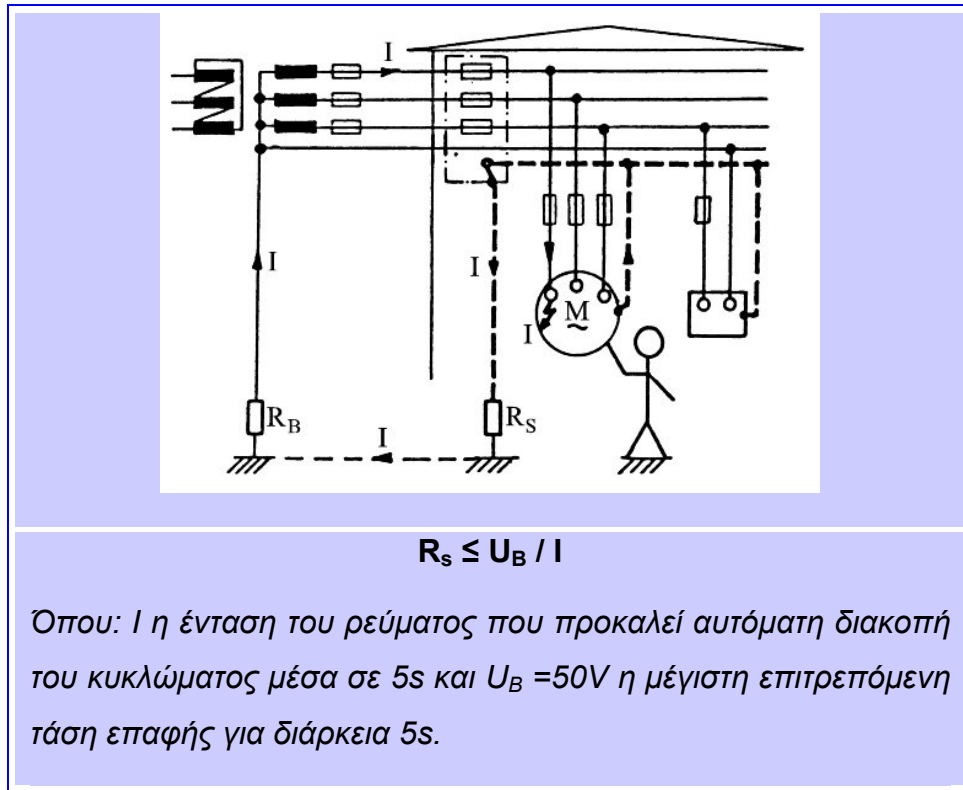
(Α) Μέθοδοι που εφαρμόζονται σε ειδικές περιπτώσεις και αποκλείουν την εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων επαφής, όπως:

- Χρησιμοποίηση συσκευών με διπλή μόνωση.
- Μόνιμη εγκατάσταση συσκευών σε μονωμένο δάπεδο.
- Ηλεκτρικός (γαλβανικός) διαχωρισμός ενός κυκλώματος, συνήθως με ένα μετασχηματιστή.
- Χρησιμοποίηση τάσης $U \leq 50V$

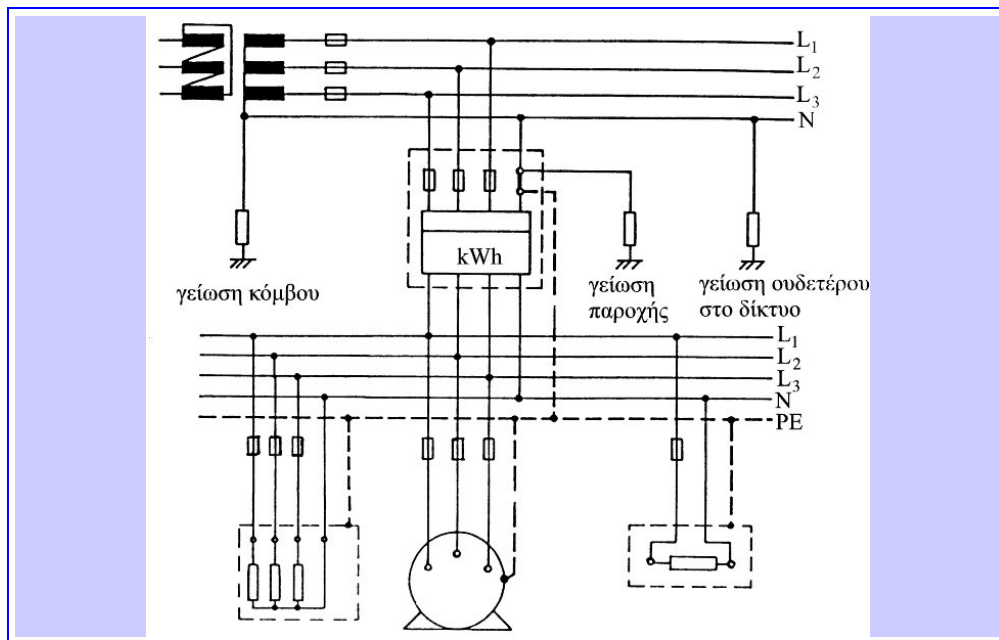
(Β) Μέθοδοι που εξασφαλίζουν τη διακοπή της τάσης τροφοδότησης μετά την εμφάνιση σφάλματος ώστε να μην εμφανίζονται επικίνδυνες τάσεις επαφής. Τέτοιες μέθοδοι είναι:

- Η **άμεση γείωση**, με απ' ευθείας αγωγήμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης (πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο, κλπ). Ένα παράδειγμα άμεσης γείωσης φαίνεται στο **Σχήμα 1.3**.
- Η **ουδετέρωση**, δηλαδή το σύστημα γείωσης που προκύπτει από αγωγήμη σύνδεση του ουδέτερου μιας πηγής ενέργειας ή υποσταθμού, σε κοινή διάταξη γείωσης με τον αγωγό προστασίας, (αγωγό γείωσης- 'PE') και συμβολίζεται με TN [14] (**Σχήμα 1.4**).

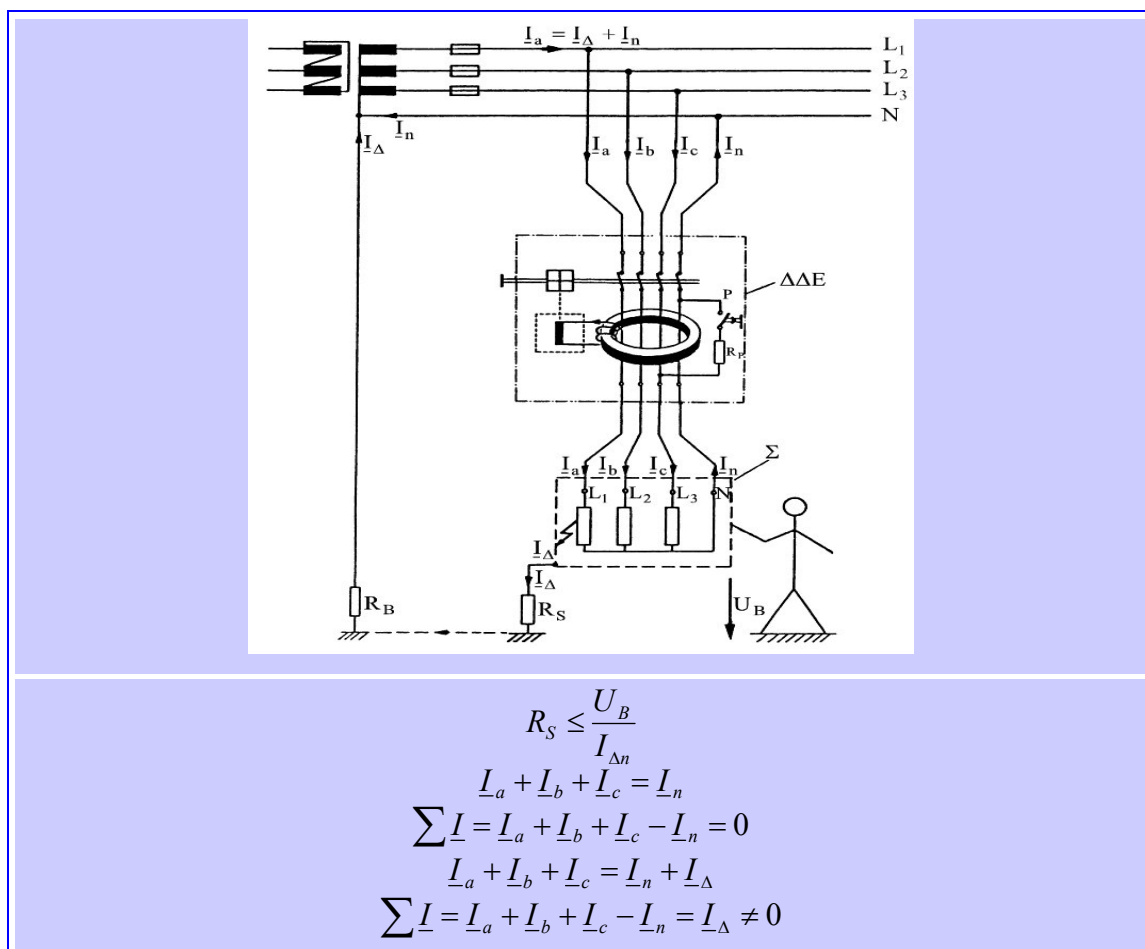
- Η προστασία με **διακόπτες διαφυγής** (τάσης ή έντασης), σε συνδυασμό με την άμεση γείωση ή την ουδετέρωση για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης (**Σχήμα 1.5, Σχήμα 1.6**).



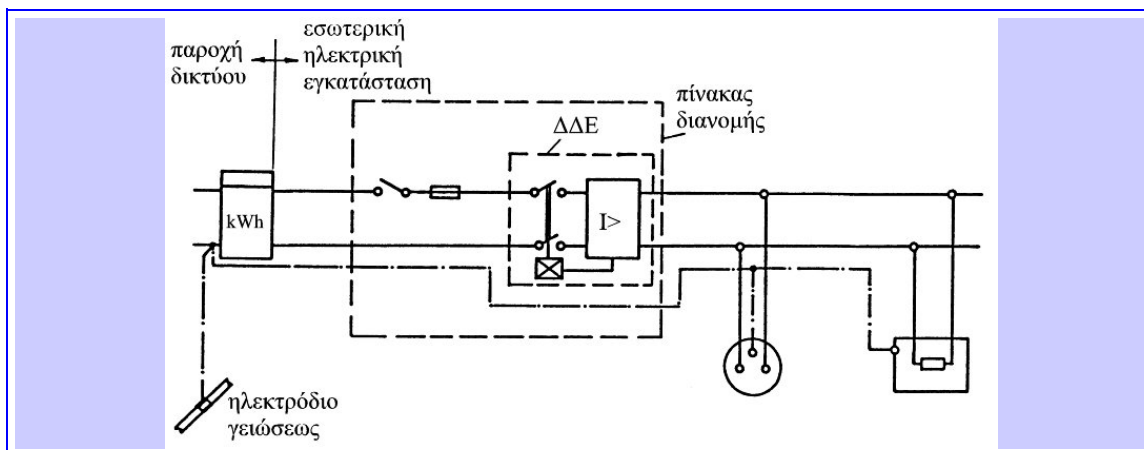
Σχήμα 1.3 Άμεση γείωση [7]



Σχήμα 1.4 Ουδετερότητα [7]



Σχήμα 1.5 Προστασία με διακόπτες διαφυγής έντασης [7]



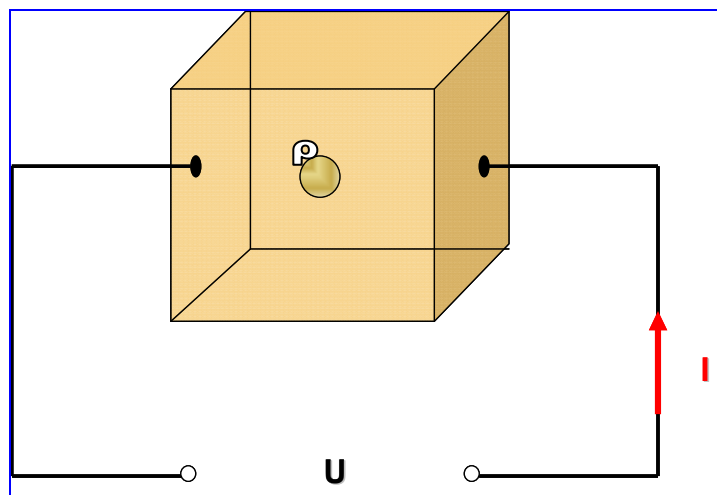
Σχήμα 1.6 Συνδεσμολογία εγκατάστασης ΔΔΕ (διακόπτη διαφυγής έντασης) ως πρόσθετης προστασίας όταν εφαρμόζεται η ουδετέρωση [7]

1.4 Ειδική αντίσταση εδάφους

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη αποτελεσματική σχεδίαση ενός συστήματος γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και, συνεπώς, ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων: εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ. με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων, ή αγωγιμοτήτων. Όσο ξηρότερο και πετρώδες το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του, ρ , η οποία μετράται συνήθως σε Ωm . Η ειδική αντίσταση του εδάφους επηρεάζεται από την ποσότητα του νερού που κατακρατείται στο έδαφος, καθώς και από την ειδική αντίσταση του ίδιου του νερού. Με άλλα λόγια η αγωγιμότητα δια μέσω του εδάφους γίνεται αγωγιμότητα μέσω του νερού που κατακρατείται στο έδαφος και έτσι η αγωγιμότητα είναι ηλεκτρολυτική. Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση είναι διαφορετική περιφερειακά του ηλεκτροδίου γείωσης και μη γραμμική.

Η ειδική αντίσταση του εδάφους (ρ) ορίζεται ως η αντίσταση, από το υλικό του εδάφους που έχει ένας μοναδιαίος κύβος ($1 \times 1 \times 1 \text{m}^3$), όταν ηλεκτρόδια

τοποθετούνται στις απέναντι πλευρές του κύβου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα1.7**.



Σχήμα 1.7 Ειδική αντίσταση εδάφους

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση είναι οι εξής [15]:

- **Ο τύπος του εδάφους:** Αποτελεί καθοριστικό παράγοντα διαμόρφωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Δυστυχώς δεν έχουν ορισθεί καθαρά οι τύποι του εδάφους, για παράδειγμα, με τη λέξη άργιλος μπορεί να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα εδαφών. Ένας αριθμός ερευνητών έχει μετρήσει κατά καιρούς την ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους, είτε παίρνοντας δείγματα και μετρώντας τα σε ειδικές συσκευές, είτε μετρώντας την ειδική αντίσταση in situ. Στον ακόλουθο **Πίνακα 1.2** παρατίθενται οι τιμές της ειδικής αντίστασης για διαφορετικούς τύπους εδαφών.

Πίνακας 1.2 Ειδική αντίσταση διαφορετικών τύπων εδάφους [16]

Έδαφος	Ειδική αντίσταση (Ωm)
Επιφάνεια εδάφους, παχύ χώμα κ.τ.λ.	1-50
Λάσπη, πηλός, χώμα	2-100
Άμμος και χαλίκι	50-1000
Επιφάνεια ασβεστόλιθου	100-10000
Σχιστόλιθος	5-100
Αμμόπετρα με χαλαζία και άμμο	20-2000
Γρανίτης, βασάλτης, κ.τ.λ.	1000
Διαλυόμενος γνευσίτης (ορυκτό)	50-500
Πλακόστρωτα κ.τ.λ.	10-100

- **Επίδραση μεγέθους κόκκων:** Το μέγεθος των κόκκων αλλά και η παρουσία κόκκων διαφορετικών μεγεθών διαδραματίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της ειδικής αντίστασης τους εδάφους. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης. Επίσης, το μέγεθος των κόκκων αλλά και η κατανομή τους μέσα στο έδαφος επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο κατακρατείται η υγρασία. Στην περίπτωση κόκκων μεγάλου μεγέθους η υγρασία κατακρατείται λόγω της επιφανειακής τάσης. Στην περίπτωση που το μέγεθος των κόκκων ποικίλει, τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των μεγάλων σε μέγεθος κόκκων συμπληρώνονται από τους μικρότερους κόκκους και έτσι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται.
- **Περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία:** Δεδομένου ότι η αγωγιμότητα του ρεύματος είναι σε μεγάλο βαθμό ηλεκτρολυτική, συνάγεται ότι η ποσότητα του νερού και οι ιδιότητές του, καθώς και το ποσό των διαλυμένων αλάτων θα παίξουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ειδικής αντίστασης. Η ακριβής περιεκτικότητα σε νερό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και είναι μεταβλητή ποσότητα. Μεταβάλλεται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την εποχή του χρόνου, τη φύση του υπεδάφους και το βάθος της υπόγειας στάθμης του νερού.

Σπάνια το έδαφος είναι πολύ ξηρό, παρόλα αυτά είναι πιθανό η άμμος της ερήμου να είναι η πιο κοντινή προσέγγιση σε αυτό. Από την άλλη, δεν εμφανίζονται συχνά εδάφη με περιεκτικότητα υγρασίας μεγαλύτερη του 40%. Στον **Πίνακα 1.3** καταγράφονται ενδεικτικές τιμές της μεταβολής της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία.

Πίνακας 1.3 Επίδραση της περιεκτικότητας της υγρασίας στην ειδική αντίσταση [16]

Περιεκτικότητα σε υγρασία Επί τις εκατό κατά βάρος	Ειδική αντίσταση (Ωm)	
	Top soil	Sandy loam
0.0	1.000×10^4	1.000×10^4
2.5	2500	1500
5.0	1650	430
10.0	530	220
15.0	210	130
20.0	120	100
30.0	100	80

- **Επίδραση των διαλυμένων αλάτων στο νερό**

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, όπως είδαμε παραπάνω, επηρεάζει την ειδική αντίσταση του εδάφους. Το νερό, όμως, περιέχει και διαλυμένα σε αυτό άλατα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης. Ένα αρκετά μικρό ποσό διαλυμένων αλάτων είναι ικανό να μειώσει αξιοσημείωτα την ειδική αντίσταση σε σχέση με την τιμή που αυτή έχει όταν το νερό, που έχει προστεθεί στο χώμα, είναι απιονισμένο. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι διαφορετικά άλατα έχουν διαφορετικές επιδράσεις και πιθανώς αυτή είναι η εξήγηση γιατί η ειδική αντίσταση όμοιων εδαφών από διαφορετικές περιοχές παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η τεχνητή προσθήκη διαλυμάτων αλάτων στο

χώμα, όπως χλωριούχου νατρίου (αλάτι), χλωριούχου ασβεστίου (CaCl_2), θειικού χαλκού (CuSO_4) ή θειικού μαγνησίου (MgSO_4) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στον **Πίνακα 1.4** παρουσιάζονται οι τιμές της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε άλατα.

Πίνακας 1.4 Επίδραση της περιεκτικότητας των αλάτων στην ειδική αντίσταση του εδάφους [16]

Προστιθέμενα άλατα Επί τις εκατό δια βάρος υγρασίας	Ειδική αντίσταση (Ωm)
0,0	107
0,1	18
1,0	4,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1

- **Επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης**

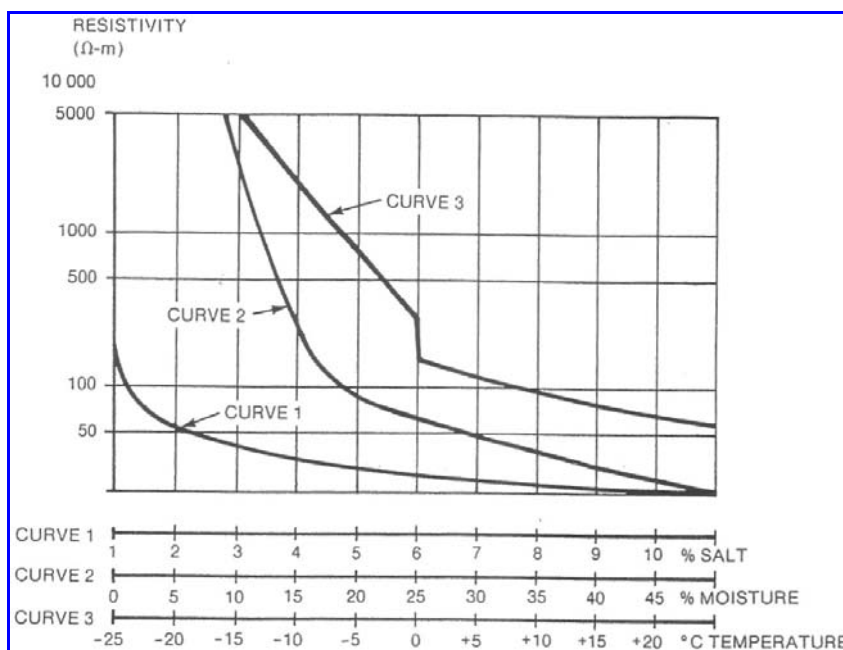
Εφόσον η ειδική αντίσταση του εδάφους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία του νερού και είναι γνωστό ότι η ειδική αντίσταση του νερού έχει μεγάλο θερμοκρασιακό συντελεστή, είναι αναμενόμενο ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί καθώς η θερμοκρασία θα μειώνεται. Σε περίπτωση μάλιστα, που η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 0°C τότε η ειδική αντίσταση του εδάφους θα αυξηθεί πάρα πολύ. Στον **Πίνακα 1.5** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Πίνακας 1.5 Επίδραση της θερμοκρασίας στην ειδική αντίσταση [6]

Θερμοκρασία (°C)	Ειδική αντίσταση (Ωm)
20	72
10	99
0 (νερό)	138
0 (πάγος)	300
-5	790
-15	3300

Όσον αφορά στην επίδραση της πίεσης, έχει παρατηρηθεί ότι υψηλότερες πιέσεις, που οφείλονται σε πιο συμπαγείς δομές του εδάφους, οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές ειδικής αντίστασης.

Στο **Σχήμα 1.8** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα, της υγρασίας και της θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.8 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άλατα (CURVE 1), της υγρασίας (CURVE 2) και της θερμοκρασίας (CURVE 3) [17]

- **Επίδραση της έντασης του πεδίου (voltage gradient)**

Η ειδική αντίσταση του εδάφους δεν επηρεάζεται από την ένταση εκτός εάν η τελευταία υπερβαίνει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή. Η τιμή αυτή διαφέρει ανάλογα με το είδος του εδάφους, αλλά συνήθως είναι της τάξης μερικών kV/cm. Αν ξεπεραστεί αυτή η τιμή, θα δημιουργηθούν τόξα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, τα οποία οδηγούν σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Τα τόξα θα εκδηλώνονται σε εκείνη την περιοχή όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θα ξεπερνά την κρίσιμη τιμή. Σε όλο τον υπόλοιπο χώρο η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη [17].

- **Επίδραση της μορφής της τάσης**

Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10m, έχει παρατηρηθεί αύξηση της τιμής της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0,3/30μs, η μεταβατική αντίσταση θεμελιακού γειωτή κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 3Ω και 26Ω. Η αύξηση της τιμής της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο της τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

1.5 Ιονισμός εδάφους [2]

Ο ιονισμός του εδάφους αποτελεί ένα από τους μηχανισμούς διάσπασης του εδάφους. Συγκεκριμένα είναι μία διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η πυκνότητα ρεύματος, που εγχέεται από το σύστημα γείωσης στο έδαφος, είναι αρκετά υψηλή ώστε να προκαλέσει μία ένταση ηλεκτρικού πεδίου αρκετά υψηλότερη από μια κρίσιμη τιμή E_c .

1.5.1 Μηχανισμοί Διάσπασης του Εδάφους

Το έδαφος, σε επίπεδο μικροδομής αποτελείται από ανομοιόμορφα αγωγίμα σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχει νερό, στο οποίο περιέχονται διαλυμένα άλατα ή αέρας. Στο νερό και τα διαλυμένα σε αυτό άλατα οφείλεται κατά κύριο λόγο η αγωγιμότητα του εδάφους, ενώ το μέγεθος των διακένων μεταξύ των κόκκων του εδάφους επηρεάζει την αναπτυσσόμενη σε αυτά ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, εξαιτίας της επιβαλλόμενης τάσης. Παρόλο, που οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους στη μόνιμη κατάσταση έχουν μελετηθεί [18], [19] και η συμπεριφορά τους

είναι πλήρως κατανοητή, όταν ένα σύστημα γείωσης υπόκειται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. κεραυνικό ρεύμα, ρεύμα σφάλματος) τότε, μέσα στο έδαφος και γύρω από τους αγωγούς του συστήματος γείωσης, αναπτύσσονται ηλεκτρικά πεδία, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του εδάφους. Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο γίνεται η διάσπαση του εδάφους μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστός. Ωστόσο έχουν καταβληθεί προσπάθειες από πλήθος ερευνητών για τη μελέτη της συμπεριφοράς του εδάφους σε μεταβατικά φαινόμενα και την περιγραφή των μηχανισμών, που λαμβάνουν χώρα. Μέχρι σήμερα δύο είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την περιγραφή του μηχανισμού διάσπασης του εδάφους: ο ένας είναι ο **θερμικός μηχανισμός** και ο άλλος είναι ο **ιονισμός του εδάφους**.

Σύμφωνα με το **θερμικό μηχανισμό**, που προτάθηκε από τους Snowden et al. [20] και [21], όταν το ρεύμα εγχέεται μέσω του συστήματος γείωσης στο έδαφος, λόγω του φαινομένου Joule, θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του νερού, που είναι παγιδευμένο στο έδαφος, και μείωση της ειδικής του αντίστασης. Καθώς το ρεύμα επιλέγει να ρέει μέσω του δρόμου μικρότερης αντίστασης θα διαρρεύσει εκείνα τα μονοπάτια, που παρουσιάζουν τη μικρότερη αντίσταση (και συνεπώς έχουν την υψηλότερη θερμοκρασία) προκαλώντας την εξάτμιση του νερού. Στις περιοχές εκείνες, που το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ξεπερνάει μία κρίσιμη τιμή εκδηλώνεται διάσπαση του εδάφους. Ο χρόνος για την έναρξη της διάσπασης εξαρτάται από τον απαιτούμενο χρόνο για τη θέρμανση και εξάτμιση του νερού, που με τη σειρά του εξαρτάται από την αγωγιμότητα και τη θερμοχωρητικότητα του νερού, το μήκος των μονοπατιών, στα οποία έχει εκδηλωθεί διάσπαση και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους και προτάθηκε από τους Leadon et al [22]. Ο μηχανισμός του **ιονισμού του εδάφους**, όπως προαναφέρθηκε είναι ηλεκτρική διαδικασία και λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό πεδίο στο διάκενο μεταξύ των κόκκων του εδάφους ενισχυθεί προκαλώντας τον ιονισμό του αέρα και την εκδήλωση τόξου, μειώνοντας έτσι την αντίσταση του εδάφους. Μάλιστα, λόγω της ανομοιομορφίας των κόκκων, η μέση τιμή της ηλεκτρικής έντασης, που προκαλεί διάσπαση του εδάφους, είναι μικρότερη από την τιμή

που απαιτείται για διάσπαση ενός διακένου αέρα αντίστοιχων διαστάσεων [23]. Με τη βοήθεια πειραμάτων, οι Flanagan et al. [24], [25] υπολόγισαν την κρίσιμη τιμή της έντασης στα 10-20kV/cm. Πειραματικά αποτελέσματα των Oettle [26], [27], Petropoulos [28] και Liew et al. [29] υποστηρίζουν το μηχανισμό διάσπασης του εδάφους μέσω του ιονισμού. Επιπρόσθετα, σημειώνεται, ότι ο θερμικός μηχανισμός βασίζεται σε απλουστευτικές θεωρήσεις. Σύμφωνα με τους Nor και Ramli [30] για να καταστεί δυνατή η διάκριση μεταξύ των δύο μηχανισμών είναι απαραίτητη η εκτίμηση της ενέργειας, που απορροφάται από το χώμα, για δεδομένη επιβαλλόμενη τάση και περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία. Οι δυσκολίες, που σχετίζονται με τον υπολογισμό της απορροφούμενης ενέργειας από το υγρό έδαφος, τους οδήγησαν στη μελέτη ξηρών εδαφών. Όπως ήταν αναμενόμενο ο επικρατών μηχανισμός είναι ο ιονισμός του εδάφους, παραδόξως, όμως, παρατηρήθηκαν και φαινόμενα που σχετίζονται με το θερμικό μηχανισμό διάσπασης. Για το λόγο αυτό απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε ό,τι αφορά τους μηχανισμούς διάσπασης. Στα πλαίσια, ωστόσο, της παρούσας εργασίας ο μηχανισμός διάσπασης που υιοθετείται είναι ο ιονισμός του εδάφους.

1.5.2 Μοντέλα για τον ιονισμό του εδάφους

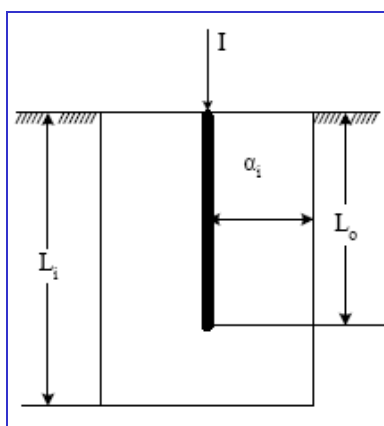
Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για την περιγραφή της διαδικασίας του ιονισμού του εδάφους. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες και αναλύονται παρακάτω.

1.5.2.1 Μοντέλο ηλεκτροδίου αυξημένων διαστάσεων

Οι Bellaschi et al. [31] και ο Petropoulos [28] θεώρησαν ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού είναι ίση με την ειδική αντίσταση του ηλεκτροδίου. Με άλλα λόγια, μοντελοποίησαν το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων. Αναλυτικότερα, ο Bellaschi σε εργασία του [31] συνέκρινε τη συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης σε μόνιμη κατάσταση με τη συμπεριφορά τους σε μεταβατική κατάσταση. Προς επίτευξη τούτου διεξήγαγε πειράματα τρεις διαφορετικές εποχές του χρόνου, υπολόγισε τους λόγους της κρουστικής αντίστασης προς την τιμή της αντίστασης γείωσης μόνιμου καταστάσεως και παρατήρησε τη μείωση της μεταβατικής τιμής της αντίστασης όσο το επιβαλλόμενο κρουστικό ρεύμα

αυξανόταν. Αυτό αποδόθηκε στη βραχυκύκλωση μέσω τόξων της αντίστασης επαφής μεταξύ των αγωγίμων συστατικών του εδάφους στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Έτσι, καθώς η εφαρμοζόμενη στο ηλεκτρόδιο γείωσης τάση αυξάνεται, η τιμή της αντίστασης του παραμένει σταθερή μέχρις ότου η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Τότε εμφανίζονται εκκενώσεις και η αντίσταση μειώνεται.

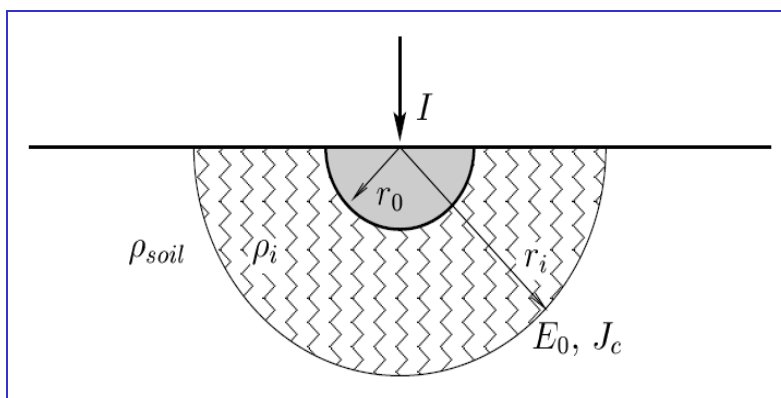
Σε άλλη εργασία τους, ο Bellaschi και οι συνεργάτες του [32] έκαναν την υπόθεση ότι, για δεδομένη τιμή ρεύματος, ο χώρος των εκκενώσεων εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια εκείνη, στην οποία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή, που εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Μάλιστα, υπέθεσαν ότι η ζώνη των εκκενώσεων κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το ηλεκτρόδιο. Στο **Σχήμα 1.9** παρουσιάζεται η μορφή της ζώνης ιονισμού, σύμφωνα με τους Bellaschi et al. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, υπολόγισαν τις διαστάσεις του χώρου εκκενώσεων και, κατ' επέκταση, τη μείωση της αντίστασης.



Σχήμα 1.9 Μοντέλο Bellaschi [23]

Ο Γ. Μ. Πετρόπουλος σε άρθρο του [28] αναφέρει ότι, η αντίσταση των γειώσεων υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων παίρνει τιμές κατά πολύ μικρότερες από εκείνες που μετρώνται με μεθόδους διέλευσης ασθενών εναλλασσομένων ρευμάτων. Η αντίσταση των συνηθισμένων γειώσεων μειώνεται κατά το 1/5 περίπου υπό την επίδραση κρουστικών

ρευμάτων της τάξης των 10kA. Σε περιπτώσεις όπου άλλα αγωγίμα σώματα υπάρχουν κοντά στα ηλεκτρόδια γείωσης, τότε η αντίσταση γείωσης μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η μείωση αυτή της αντίστασης αποδίδεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις, οι οποίες βραχυκυκλώνουν τη σχετικά υψηλή αντίσταση μεταξύ των αγωγίμων τμημάτων του εδάφους καταλαμβάνοντας ένα χώρο στον οποίο η αγωγιμότητα γίνεται πολύ μεγαλύτερη απ' ότι στο υπόλοιπο έδαφος. Τότε το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται σαν να έχει αυξημένες διαστάσεις και συνεπώς παρουσιάζει μειωμένη αντίσταση ως προς τη γη. Στα πειράματα, που διεξήγαγε, χρησιμοποίησε ημισφαιρικό δοχείο από άνθρακα γεμάτο με χώμα. Στο κέντρο του τοποθέτησε το σφαιρικό ηλεκτρόδιο. Για τους υπολογισμούς του υπέθεσε ότι οι εκκενώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση δίνει για σφαιρικά ηλεκτρόδια γείωσης ένα συγκεκριμένο χώρο εκκενώσεων για κάθε τάση, διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο χώμα με μία ημισφαιρική επιφάνεια, η ακτίνα του οποίου εξαρτάται από την τιμή της τάσης. Στο **Σχήμα 1.10** φαίνεται το μοντέλο των εκκενώσεων που πρότεινε ο Πετρόπουλος.



Σχήμα 1.10 Μοντέλο Πετρόπουλου [33]

Η αντίσταση μόνιμου καταστάσεως του ηλεκτροδίου δίνεται από τον τύπο:

$$R_0 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi r_0} \quad (1.1)$$

όπου R_0 είναι η αντίσταση μόνιμου καταστάσεως σε Ω

r_0 είναι η ακτίνα του ηλεκτροδίου σε m

ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

Όταν επιβάλλεται κεραυνικό ρεύμα στο ηλεκτρόδιο τότε η πυκνότητα ρεύματος σε συγκεκριμένη ακτίνα από το ηλεκτρόδιο δίδεται από τον τύπο:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.2)$$

όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

I είναι το επιβαλλόμενο ρεύμα σε A

r είναι η απόσταση από το ηλεκτρόδιο

Το φαινόμενο του ιονισμού εκδηλώνεται όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί μία κρίσιμη τιμή, E_c η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$J_c = \frac{E_c}{\rho_{soil}} \quad (1.3)$$

όπου J_c είναι η κρίσιμη πυκνότητα ρεύματος σε A/m^2

E_c είναι η κρίσιμη ένταση ιονισμού σε V/m

ρ_{soil} είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους σε Ωm

Από τις εξισώσεις (1.2) και (1.3) μπορεί να υπολογιστεί η ακτίνα της περιοχής ιονισμού, η οποία δίδεται από τον τύπο:

$$r_i = \sqrt{\frac{\rho_{soil} I}{2\pi E_c}} \quad (1.4)$$

Βέβαια η ομοιομορφία του χώρου εκκενώσεων προϋποθέτει την ομοιογένεια του εδάφους, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πράξη. Ωστόσο, η μείωση της τιμής της μεταβατικής αντίστασης αποδίδεται και σε άλλους παράγοντες, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας που περιβάλλει τα ηλεκτρόδια, αφού μείωση της αντίστασης γείωσης παρατηρείται και όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι σχετικά μικρή, ώστε να μη συμβαίνουν εκκενώσεις.

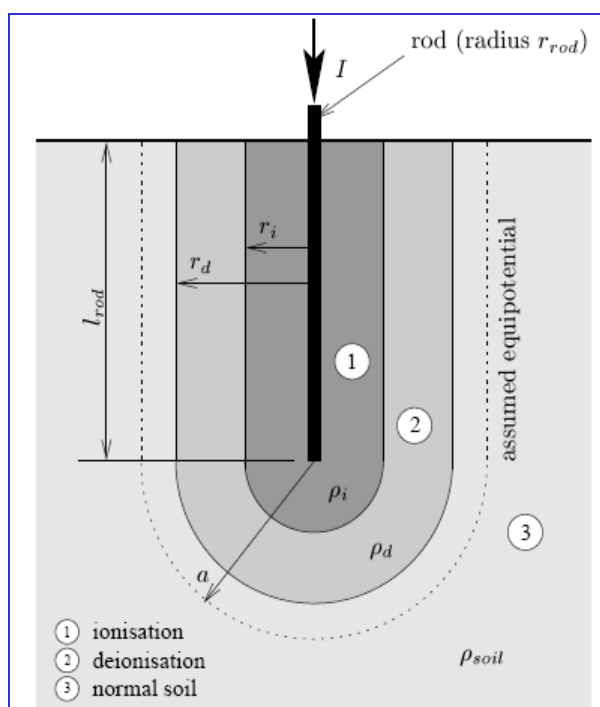
Τέλος, σύμφωνα με τις έρευνες των Loboda et al [34], όταν ένα ηλεκτρόδιο διαρρέεται από ρεύμα τότε στο έδαφος γύρω από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου δημιουργείται μία ζώνη εκκενώσεων. Στη ζώνη αυτή, αρχικά, εκδηλώνονται σπινθήρες και καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται, δημιουργούνται τόξα. Στην περιοχή, που εκδηλώνονται τα τόξα η διαφορά δυναμικού είναι μηδενική. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το ηλεκτρόδιο μαζί με τη γύρω απ' αυτό περιοχή ισοδυναμούν με ένα ηλεκτρόδιο αυξημένων διαστάσεων (κυρίως αυξημένης διαμέτρου). Η ζώνη των εκκενώσεων

εκτείνεται μέχρι εκείνη την περιοχή, όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δεν προκαλεί διάσπαση του εδάφους.

1.5.2.2 Μοντέλο μεταβλητής ειδικής αντίστασης

Σε αυτό το μοντέλο, η μείωση της αντίστασης του ηλεκτροδίου ερμηνεύεται ως μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (ρ_{soil}) στην περιοχή που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, εξαιτίας του φαινομένου του ιονισμού.

Το 1974 οι Liew και Darveniza [29] πρότειναν ένα δυναμικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς διαφόρων ειδών χώματος σε κρουστικά ρεύματα, θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ισοτροπικό, δηλαδή η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις. Σύμφωνα με το μοντέλο τους το έδαφος, γύρω από το ηλεκτρόδιο, χωρίζεται σε τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή που έχει η πυκνότητα ρεύματος που εγχέεται. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1.11** διακρίνονται τρεις περιοχές: (1) η περιοχή ιονισμού, (2) η περιοχή απιονισμού και (3) η περιοχή όπου δεν εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού.



Σχήμα 1.11 Μοντέλο Liew και Darveniza [33]

Αναλυτικότερα, καθώς το επιβαλλόμενο στο ηλεκτρόδιο ρεύμα αυξάνεται και εγγέεται στο έδαφος, η ειδική αντίσταση στις περιοχές, στις οποίες η πυκνότητα ρεύματος (J) είναι μεγαλύτερη από μία κρίσιμη τιμή (J_c), θα παρουσιάζει μια τιμή μικρότερη από την τιμή της ειδικής αντίστασης μονίμου καταστάσεως (ρ_{soil}). Σε κάθε άλλη περίπτωση η τιμή της ειδικής αντίστασης θα παραμείνει αμετάβλητη Δηλαδή:

$$\rho = \rho_{soil} \quad J < J_c \quad (1.5)$$

$$\rho = \rho_{soil} e^{\frac{-t}{\tau_1}} \quad \text{για} \quad J \geq J_c \quad (1.6)$$

όπου: τ_1 είναι η χρονική σταθερά ιονισμού κατά την αύξηση του ρεύματος

t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του ιονισμού

Ο ιονισμός θα επεκταθεί σε μια περιοχή με ακτίνα r_{cm} η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή που θα πάρει το ρεύμα.

Στη συνέχεια, καθώς το ρεύμα θα αρχίσει να μειώνεται θα διαμορφωθούν στο έδαφος τρεις περιοχές:

- Η περιοχή 3 ($r > r_{cm}$, $J < J_c$) στην οποία δεν έχει εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού και συνεπώς η τιμή της ειδικής αντίστασης είναι ρ_{soil} .
- Η περιοχή 2 στην οποία η πυκνότητα ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από την κρίσιμη τιμή και η ειδική αντίσταση αρχίζει να ανακτά την αρχική τιμή της, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho = \rho_i + (\rho_{soil} - \rho_i) \left(1 - \exp \frac{-t}{\tau_2} \right) \left(1 - \frac{J}{J_c} \right)^2 \quad \text{για } r < r_{cm} \text{ και } J < J_c \quad (1.7)$$

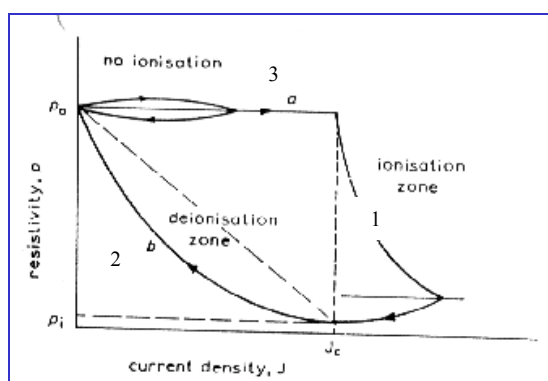
όπου: ρ_i είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης, όταν η πυκνότητα του ρεύματος (J) είναι ίση με την κρίσιμη τιμή της πυκνότητας ρεύματος (J_c)

τ_2 είναι η χρονική σταθερά απιονισμού

t είναι ο μετρούμενος χρόνος από την έναρξη του απιονισμού

- Η περιοχή 1 για την οποία ισχύουν $r < r_{cm}$ και $J \geq J_c$. εξακολουθούν να εκδηλώνονται φαινόμενα ιονισμού. Η διαδικασία αυτή θα σταματήσει όταν η πυκνότητα ρεύματος J θα πάρει τιμές μικρότερες από J_c , οπότε θα αρχίσει η διαδικασία του απιονισμού.

Το παρακάτω **Σχήμα 1.12** δείχνει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης καθώς το εγχεόμενο ρεύμα αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται.



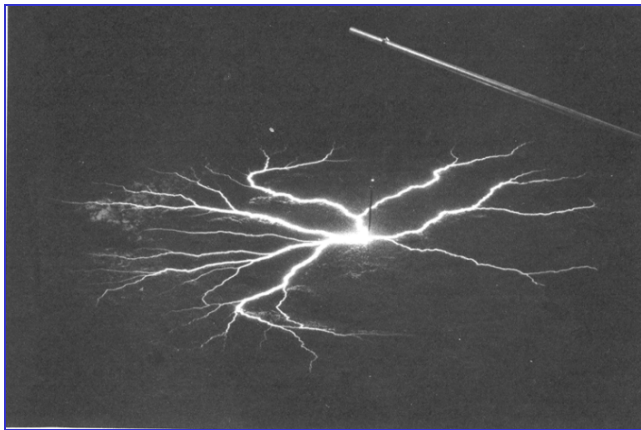
Σχήμα 1.12 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

Καθώς όλα τα στοιχειώδη κελύφη έχουν διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος για μία ορισμένη τιμή ρεύματος και χρόνου, κάθε κελυφος εντός της r_{cm} πρέπει να έχει διαφορετική ειδική αντίσταση. Η συνολική αντίσταση σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται αθροίζοντας τις στοιχειώδεις αντιστάσεις όλων των κελυφών κατά τις διάφορες φάσεις του ιονισμού τους. Ένας τέτοιος υπολογισμός μπορεί να γίνει πολύ εύκολα με χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Κατά τη δεκαετία του '90 διενεργήθηκαν πειράματα στη Φλόριδα και την Αλαμπάμα στα οποία καταγράφηκαν μέσω φωτογραφιών ακτινωτά νηματοειδή τόξα κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους με κέντρο το σημείο της εκφόρτισης (**Σχήματα 1.13** και **1.14**).



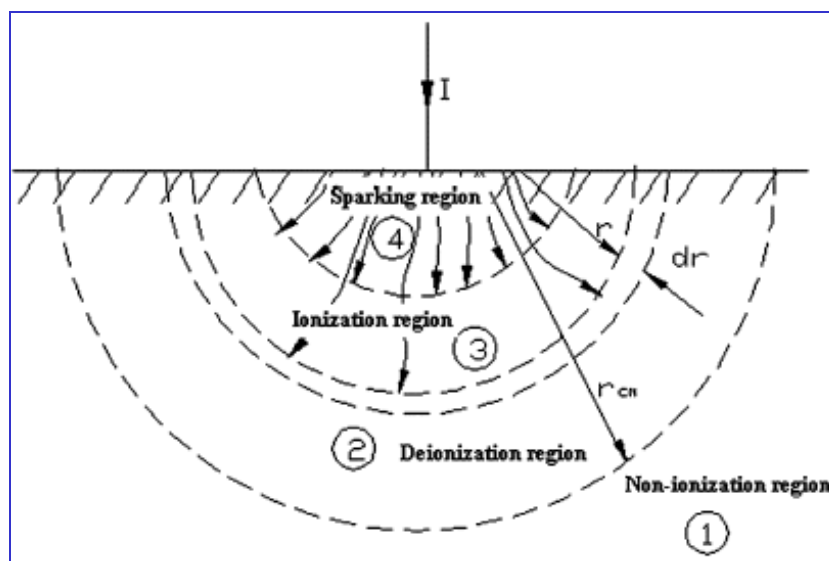
Σχήμα 1.13 Επιφανειακές εκκενώσεις [35]



Σχήμα 1.14 Επιφανειακές εκκενώσεις [35]

Από πειραματικά αποτελέσματα αλλά και αναλύσεις, οι ερευνητές κατέληξαν στο ότι η διαδικασία της διάσπασης οδηγεί στη διαμόρφωση διακριτών τόξων τόσο μέσα στο έδαφος όσο και στην επιφάνειά του και είναι πιθανόν αυτά τα δύο φαινόμενα να οδηγούν στη μείωση της αντίστασης γείωσης [36]. Ο Song, κατόπιν διεξαγωγής πειραμάτων, τόσο σε εργαστηριακό, όσο και σε εξωτερικό χώρο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται όχι μόνο από τα χαρακτηριστικά του εδάφους, αλλά και από το μηχανισμό διάσπασης [37]. Επίσης, διεξήγαγε πειράματα με σκοπό τον καθορισμό των παραγόντων, που δημιουργούν διακριτά μονοπάτια διάσπασης ώστε να καταστεί δυνατή η επαλήθευση ενός μοντέλου ικανού να περιγράψει τη μεταβατική συμπεριφορά του εδάφους υπό την επίδραση υψηλών κεραυνικών ρευμάτων [38]. Βάσει των αποτελεσμάτων των νέων μελετών, οι J. Wang, A.C. Liew και M. Darveniza σε εργασία τους το 2005 [39]

επέκτειναν το μοντέλο του 1974, εισάγοντας και την περιοχή όπου εκδηλώνονται τόξα. Χάριν απλότητας θεώρησαν ότι οι ισοδυναμικές επιφάνειες είναι ημισφαιρικές. Κατ' αυτόν τον τρόπο η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογισθεί αθροίζοντας το στοιχειώδη ημισφαιρικά κελύφη πλάτους dr . Στο **Σχήμα 1.15** παρουσιάζεται το ημισφαιρικό μοντέλο, γνωστό και ως μοντέλο Wang – Liew – Darveniza.



Σχήμα 1.15 Μοντέλο Wang: (1) μη ιονισμένη περιοχή, (2) περιοχή απιονισμού, (3) περιοχή ιονισμού, (4) περιοχή τόξων [39]

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, καθώς το εγχέόμενο ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταβάλλεται ως εξής: όταν η πυκνότητα ρεύματος είναι μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή $J < J_c$ δεν εκδηλώνονται τόξα στο έδαφος και η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή και ίση με ρ_{soil} .

Όταν η πυκνότητα ρεύματος υπερβεί την κρίσιμη τιμή τότε μπορούν να θεωρηθούν δυο περιοχές: μία περιοχή, στην οποία εκδηλώνεται ο ιονισμός του εδάφους ($r < r_{cm}$ (κρίσιμη απόσταση) και $J \leq J_c < J_s$) και η ειδική αντίσταση δίνεται από τον τύπο (2.6), και μία περιοχή σπινθηρισμού ($r < r_{cm}$ και $J \geq J_s$), στην οποία η ειδική αντίσταση εδάφους μηδενίζεται. Παρουσιάζεται επομένως, η ανάγκη εισαγωγής μίας νέας σταθεράς, η οποία συσχετίζει την J_s με την J_c ,

όπου J_s είναι η πυκνότητα ρεύματος πάνω από την οποία εκδηλώνονται τόξα. Η σταθερά a ορίζεται ως εξής:

i) Καθώς το ρεύμα αυξάνεται και διαπερνά το έδαφος, η σταθερά μεταβάλλεται σύμφωνα με τον τύπο (1.8)

$$a = a_0(1 - \lambda e^{I^{\beta_1}}) \quad (1.8)$$

όπου I είναι το εγχεόμενο ρεύμα, a_0 είναι η αρχική τιμή του a , ο όρος β_1 περιλαμβάνεται στην ενεργειακή θεώρηση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του J_s τόσο πιο έντονα θα είναι τα τόξα και θα εκδηλώνονται σε μεγαλύτερη περιοχή. Με άλλα λόγια όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του εγχεόμενου ρεύματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η περιοχή εμφάνισης τόξων. Η σταθερά λ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της χρονικής στιγμής που το a θα αρχίσει να μειώνεται.

Η παραπάνω συνθήκη (1.8) εφαρμόζεται μόνο για $a > 1$. Καθώς το a μειώνεται λόγω των τόξων και του ιονισμού, εκδηλώνονται τόξα και στην επιφάνεια του εδάφους. Για την περιγραφή αυτής της κατάστασης χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι:

$$a = 1 + (e^{1/I})^{\beta_2} \quad (\alpha) \quad (1.9)$$

$$\beta_2 = I(t - \Delta t) \ln(a_s - 1) \quad (\beta)$$

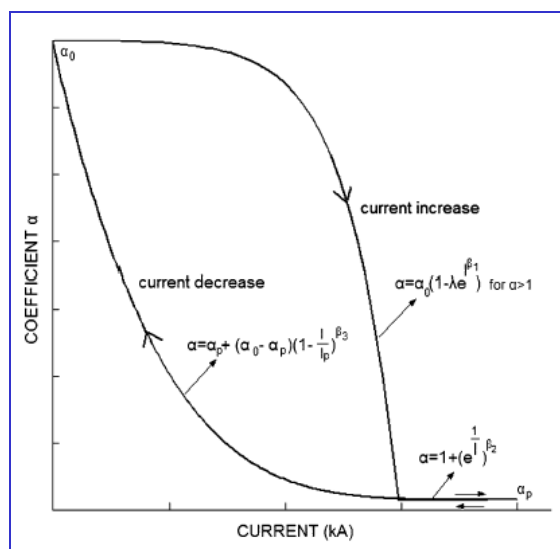
με $a_s > 1$ και είναι η ελάχιστη τιμή που υπολογίζεται από τον (1.9(α)).

ii) Καθώς το ρεύμα μειώνεται από τη μέγιστη τιμή του, το a ανακτά την αρχική τιμή του σύμφωνα με τον τύπο:

$$a = a_p + (a_0 - a_p) \left(1 - \frac{I}{I_p} \right)^{\beta_3} \quad (1.10)$$

όπου a_p είναι η τιμή του a που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα I_p και β_3 είναι μια σταθερά προς προσδιορισμό. Η τιμή του β_3 μεταβάλλεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ρεύματος τόσο πιο αργά το a θα ανακτήσει την αρχική του τιμή (a_0).

Στο **Σχήμα 1.16** παρουσιάζεται η συμπεριφορά του a καθώς το ρεύμα μεταβάλλεται.



Σχήμα 1.16 Η μεταβολή του συντελεστή α καθώς μεταβάλλεται το εγχεόμενο ρεύμα

Εν συνεχεία, καθώς το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται μπορούν να θεωρηθούν 4 περιοχές:

Η περιοχή 1, όπου $r > r_{cm}$ και $J < J_c$, στην οποία το έδαφος δεν ιονίστηκε καθόλου και επομένως η τιμή της ειδικής αντίστασης παρέμεινε σταθερή (ρ_{soil}). Η περιοχή 2, όπου $r < r_{cm}$ και $J < J_c$. Σε αυτήν την περιοχή η πυκνότητα του ρεύματος είναι μικρότερη από την κρίσιμη τιμή ιονισμού και η τιμή της ειδικής αντίστασης ανακτά την αρχική τιμή της σύμφωνα με τον τύπο (1.7).

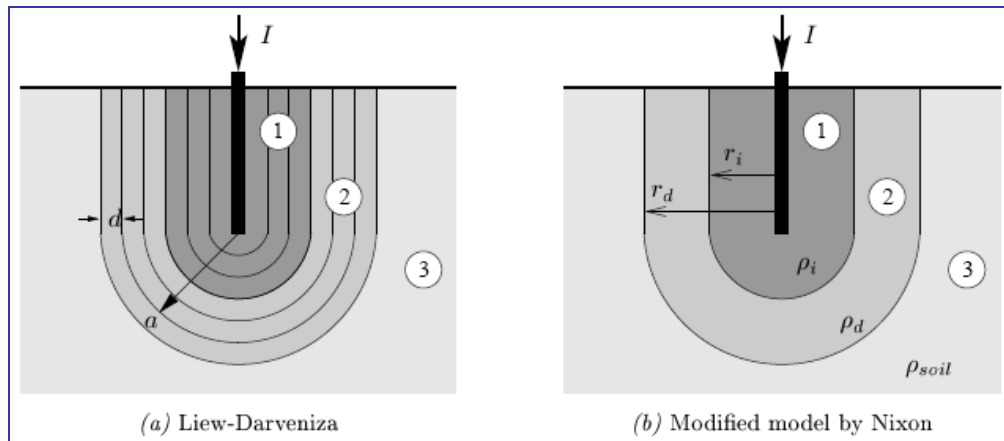
Η περιοχή 3, όπου $r < r_{cm}$ και $J_s > J \geq J_c$. Σε αυτήν την περιοχή θα εξακολουθεί να λαμβάνει χώρα ο ιονισμός μέχρι τη στιγμή που $J = J_c$ οπότε και θα ξεκινήσει η διαδικασία απιονισμού.

Η περιοχή 4, όπου $r < r_{cm}$ και $J \geq J_s$ στην οποία εμφανίζονται τόξα και η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι μηδενική.

Μειονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η εισαγωγή και άλλων παραμέτρων, που θα πρέπει να προσδιοριστούν, καθιστώντας το δύσχρηστο.

Το 2006 ο K.J. Nixon [33] πρότεινε μία απλοποίηση του μοντέλου των Liew – Darveniza (1974). Το μοντέλο των Liew - Darveniza υπέθετε ότι η ζώνη ιονισμού (απιονισμού αντίστοιχα) αποτελείται από στοιχειώδη κελύφη, στα οποία η πυκνότητα ρεύματος μεταβάλλεται κάθε στιγμή, και συνεπώς για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) θα

πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η αντίσταση κάθε κελύφους. Ο Nixon εκτίμησε ότι η ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού (απιονισμού) μπορεί να θεωρηθεί ίδια σε όλο τον όγκο της ζώνης και μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα ρεύματος που ρέει στο εξωτερικό όριο της ζώνης. **Στο Σχήμα 1.17** μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά μεταξύ του μοντέλου των Liew και Darveniza [12] και του μοντέλου που πρότεινε ο Nixon.



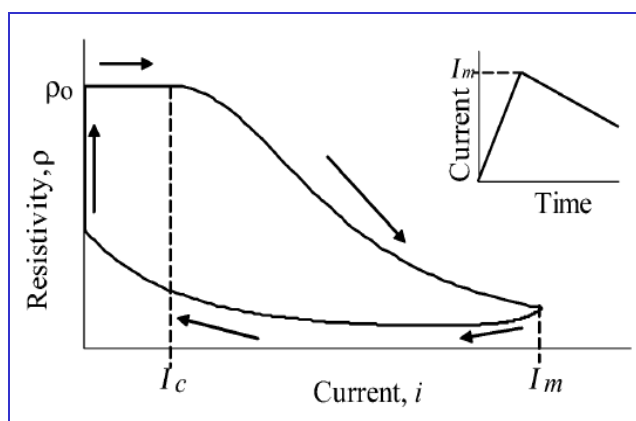
Σχήμα 1.17 Διαφορές μεταξύ του μοντέλου των Liew – Darveniza (2.7a) και του μοντέλου του Nixon (2.7b). (1) Περιοχή ιονισμού, (2) Περιοχή απιονισμού, (3) Περιοχή όπου δεν έχει λάβει χώρα ο ιονισμός [33]

Όπως προέκυψε από συγκρίσεις που έκανε ο Nixon με το μοντέλο των Liew και Darveniza αλλά και με πειραματικά αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι το μοντέλο του είναι αρκετά ακριβές.

1.5.2.3 Μοντέλο Διατήρησης Ενέργειας

Μια διαφορετική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση του φαινομένου του ιονισμού έχει προταθεί από τους Sekioaka et al [40]. Η νέα προσέγγιση βασίζεται στη διατήρηση της ενέργειας εφόσον η ανάπτυξη της ζώνης ιονισμού εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με τις εκφορτίσεις στον αέρα. Ο Hayashi [41] περιγράφει την ανάπτυξη των ζωνών ιονισμού και αντιστοιχεί τα χαρακτηριστικά τους με αυτά της διάσπασης στον αέρα. Στην εργασία [23] επιβεβαιώνεται η ομοιότητα μεταξύ του ιονισμού του εδάφους και της διάσπασης του ιονισμένου αέρα. Συνεπώς, ο ιονισμός του εδάφους μπορεί να

θεωρηθεί ως ένα είδος εκφόρτισης και μπορεί να παρομοιαστεί με το φαινόμενο τόξου που εμφανίζεται στο εσωτερικό των διακοπών. Έτσι, η αποκτηθείσα εμπειρία στη μοντελοποίηση των τόξων σε διακόπτες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φαινομένου του ιονισμού στο έδαφος και τον προσδιορισμό της ζώνης ιονισμού. Στο **Σχήμα 1.18** παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην περιοχή, όπου λαμβάνει χώρα ο ιονισμός του εδάφους.



Σχήμα 1.18 Μεταβολή της ειδικής αντίστασης συναρτήσει του ρεύματος [40]

Με βάση την εξίσωση του ενεργειακού ισοζυγίου και την εξίσωση του Mayr [42], προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση (1.11):

$$\frac{1}{Q} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{Q_0} (ui - P) \xrightarrow{\frac{ui-P}{Q_0} = a, \text{ σταθερά}} Q = Q_0 \exp(-at) \quad (1.11)$$

όπου u είναι η τάση εκφόρτισης

i είναι το ρεύμα εκφόρτισης

Q είναι η αποθηκευμένη ενέργεια

P είναι οι απώλειες ισχύος

$Q = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right)$ είναι η αγωγιμότητα του τόξου (Sm)

t είναι ο χρόνος

K (Sm) και Q_0 (J/m) είναι σταθερές.

Η απώλεια ισχύος οφείλεται στην απώλεια θερμότητας, και γι' αυτόν το λόγο θα πρέπει να θεωρηθεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και της ενθαλπίας.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν μάλιστα ότι, η θερμοκρασία στην περιοχή του ιονισμού μειώνεται, καθώς απομακρυνόμαστε από το ηλεκτρόδιο, η απώλεια θερμότητας μπορεί να φθάνει και έξω από την περιοχή ιονισμού. Αυτό οδηγεί στην απώλεια ισχύος. Έτσι λοιπόν, η απώλεια ενέργειας στο προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη προς την επιφάνεια κάθε τμήματος σύμφωνα με το μοντέλο του Cassie [43] για το τόξο και να περιγραφεί από την εξίσωση

$$P = \lambda S \quad (1.12)$$

όπου λ (W/m³) σταθερά.

Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ όταν το εγχεόμενο ρεύμα υπερβεί μια κρίσιμη τιμή I_c αρχίζει να μειώνεται. Ωστόσο, μετά τη μείωση του ρεύματος η ειδική αντίσταση δεν αρχίζει να αυξάνεται άμεσα, αλλά παρουσιάζεται μία υστέρηση λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας $E_n - N$, όπου $E_n = \int u i dt$ (1.13) (J/m) και $N = \int p dt$ (1.14) (J/m), που εξακολουθεί να είναι αποθηκευμένη σε κάθε στοιχειώδες κέλυφος. Η ειδική αντίσταση αρχίζει να αυξάνεται για να ανακτήσει την αρχική τιμή της κατά τον απιονισμό του εδάφους όταν $ui < P$.

Θεωρώντας $i = g u$ η γενική έκφραση του προτεινόμενου μοντέλου είναι:

$$Q = Q_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \left[1 + \frac{1}{g_0 Q_0} \int i^2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt \right]^{-1} \quad (1.15)$$

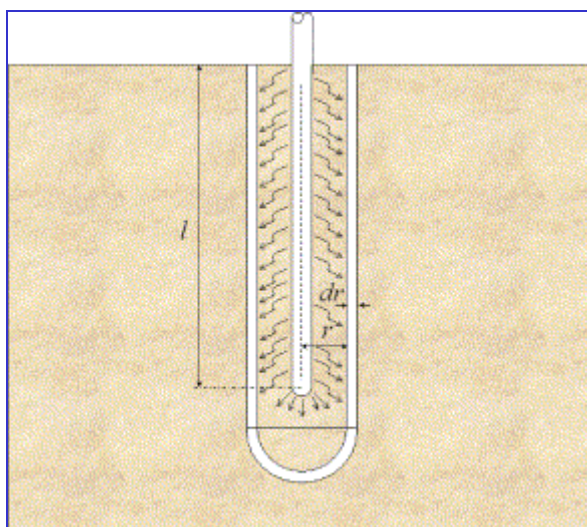
όπου ο χρόνος t είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει ιονισμός σε ένα στοιχειώδες κέλυφος και $\tau = Q_0 / P$ μια χρονική σταθερά που εκφράζει την επαναφορά της τιμής της ειδικής αντίστασης στην αρχική της τιμή (ρ_0).

Πλεονέκτημα του προτεινόμενου μοντέλου είναι ότι δίδεται φυσική σημασία στα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της αντίστασης γείωσης, εξαιτίας του ιονισμού και του απιονισμού του εδάφους.

Οι Cooray et al. [44] εισήγαγαν ένα φυσικό μοντέλο για την περιγραφή της μη γραμμικής συμπεριφοράς κατακόρυφων ηλεκτροδίων. Στο μοντέλο τους λαμβάνουν υπ' όψιν τη δημιουργία ιονισμένων οχετών εκκένωσης γύρω από το ηλεκτρόδιο. Η αντίσταση αυτών των οχετών, ως συνάρτηση της ροής του ρεύματος μέσω αυτών, διαμορφώνεται λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή

θερμότητας και την απαγωγή της από τους οχετούς και την εξαρτημένη από τη θερμοκρασία αγωγιμότητα του αέρα. Φυσικά, όπως σε κάθε μοντέλο έτσι και στο συγκεκριμένο, οι συγγραφείς υιοθέτησαν κάποιες προσεγγίσεις, χάριν απλότητας. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν στις ακόλουθες:

- Οι ισοδυναμικές επιφάνειες που περιβάλλουν την εμπηγμένη ράβδο μπορούν να απεικονιστούν από κυλινδρικά τμήματα με μία ημισφαιρική απόληξη, που διατηρούνται και κατά τη διάρκεια του ιονισμού του αέρα στο χώμα.



Σχήμα 1.19 Ισοδυναμικές επιφάνειες που περιβάλλουν τη θαμμένη ράβδο [44]

- Η διαδικασία ιονισμού σε έναν δεδομένο στοιχειώδες κέλυφος θα αρχίσει όταν το ηλεκτρικό πεδίο σε αυτό ξεπεράσει μία ορισμένη κρίσιμη τιμή. Δεδομένου ότι κάθε κέλυφος υποτίθεται ότι οριοθετείται από τις ισοδυναμικές επιφάνειες, ο ιονισμός πραγματοποιείται σε ολόκληρο το κέλυφος ταυτόχρονα.
- Η διαδικασία διάσπασης στο χώμα είναι δυνατό να αποτελείται από μια σειρά ηλεκτρικών εκκενώσεων που πραγματοποιούνται στα κενά αέρα μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Στην πραγματικότητα, ένα μέρος αυτής της ενέργειας διασπά μόρια αζώτου και οξυγόνου, ένα μέρος προκαλεί ιονισμό και ένα άλλο μέρος διεγείρει τα μόρια του αέρα.
- Ο όγκος του θερμαινόμενου αέρα υποτίθεται ότι είναι ένα ποσοστό F του συνολικού όγκου της άμμου, στον οποίο πραγματοποιείται ο ιονισμός, και παραμένει σταθερός καθώς τα φαινόμενα εκφόρτισης

εξελίσσονται ακτινωτά γύρω από το ηλεκτρόδιο. Αυτή η υπόθεση απαιτεί την αύξηση του αριθμού των οχετών εκκένωσης, καθώς η εκκένωση απομακρύνεται από τον αγωγό. Αυτό δεν απέχει από την πραγματικότητα, επειδή, γενικά, οι ηλεκτρικές εκκενώσεις διακλαδίζονται και επεκτείνονται πλευρικά γύρω από τα ηλεκτρόδια υψηλής τάσεως. Εντούτοις, το μέγεθος F δεν χρειάζεται να παραμείνει σταθερό καθώς η εκκένωση αναπτύσσεται. Η ροή ρεύματος μέσω αυτού του θερμανθέντος όγκου του αέρα θα συμβάλει στην έκλυση περισσότερης ενέργειας προκαλώντας περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας και της αγωγιμότητας του αέρα. Επίσης, υποτίθεται ότι η απαγωγή θερμότητας από τον θερμανθέντα όγκο στο περιβάλλον χώμα είναι ανάλογη προς τον όγκο και τη θερμοκρασία του θερμανθέντος αέρα. Τέλος, έχει γίνει η υπόθεση ότι η έκλυση ενέργειας από τους οχετούς στον περιβάλλοντα χώρο είναι ανάλογη προς τον θερμανθέντα όγκο αέρα και τη θερμοκρασία του (έστω S η σταθερά αναλογίας). Εάν οι διάμετροι των καναλιών εκκένωσης είναι ίδιες σε ολόκληρη την περιοχή ιονισμού, τότε ο ιονισμένος όγκος αερίου είναι ανάλογος προς την επιφάνεια των καναλιών εκφόρτισης. Αυτό επικυρώνει την υπόθεση, επειδή η έκλυση θερμότητας είναι ανάλογη προς την επιφάνεια των οχετών εκκένωσης. Στην πραγματικότητα, η έκλυση θερμότητας από τα κανάλια είναι ανάλογη προς τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των οχετών εκκένωσης και των μορίων του εδάφους με τα οποία έρχεται σε επαφή ο οχετός εκκένωσης. Επομένως, η υπόθεση ισχύει μόνο εάν η θερμότητα, που απορροφάται από το χώμα, απάγεται γρήγορα από την περιοχή επαφής, έτσι ώστε η θερμοκρασία του εδάφους στα σημεία επαφής να παραμένει μικρότερη από τη θερμοκρασία των οχετών.

Στο μοντέλο τα T_0 , F και S είναι οι παράμετροι, που πρέπει να καθοριστούν συγκρίνοντας τα πειραματικά στοιχεία με τις προσομοιώσεις.

Στην παράγραφο, που ακολουθεί, περιγράφεται αναλυτικά το προτεινόμενο μοντέλο.

Έστω ένας όγκος πάχους dr που βρίσκεται σε μια ακτινωτή απόσταση r από τη θαμμένη ράβδο. Η πυκνότητα του ρεύματος που περνά μέσω αυτού του στοιχείου σε χρόνο t δίνεται από τη σχέση (1.16):

$$J(t) = \frac{I(t)}{2\pi r l + 2\pi r^2} \quad (1.16)$$

όπου $I(t)$ είναι το ρεύμα που εισέρχεται στη ράβδο

l το μήκος της ράβδου.

Υποτίθεται ότι ο ιονισμός του αέρα σε αυτό το στοιχείο θα αρχίσει όταν η πυκνότητα του ρεύματος που περνά μέσω αυτού υπερβεί μια κρίσιμη τιμή (J_c). Αυτή δίνεται από τη σχέση (1.3).

Για μια δεδομένη τιμή κορυφής του εισερχομένου ρεύματος I_p , η κρίσιμη ακτίνα r_c , πέρα από την οποία δεν πραγματοποιείται ιονισμός του χώματος υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης (1.17):

$$J_c = \frac{I_p}{2\pi r_c l + 2\pi r_c^2} \quad (1.17)$$

Τότε η αντίσταση των στοιχείων του όγκου που βρίσκονται πέρα από αυτήν την κρίσιμη ακτίνα δίνεται από την (1.18):

$$dR_s = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi r l + 2\pi r^2)} \quad \gamma\iota\alpha \quad r \geq r_c \quad (1.18)$$

όπου σ_s η αγωγιμότητα του χώματος.

Για έναν στοιχειώδη όγκο, ο οποίος βρίσκεται εντός της κρίσιμης ακτίνας, ο ιονισμός του αέρα αρχίζει τη χρονική στιγμή t_0 κατά την οποία η πυκνότητα του ρεύματος του στοιχειώδους όγκου ξεπερνά την κρίσιμη τιμή J_c . Για τις τιμές $t \leq t_0$, η αντίσταση του στοιχείου δίνεται από την (1.19):

$$dR(t < t_0) = \frac{dr}{\sigma_s(2\pi r l + 2\pi r^2)} \quad \gamma\iota\alpha \quad r \leq r_c \quad (1.19)$$

Όταν εκδηλωθεί το φαινόμενο του ιονισμού τη χρονική στιγμή $t=t_0$, η θερμοκρασία ενός όγκου αέρα μεγέθους ίσου με F , που αποτελεί ποσοστό του στοιχειώδους όγκου ($2\pi r l dr + 2\pi r^2 dr$) αυξάνεται σε κάποια τιμή T_0 . Κατά συνέπεια, η αντίσταση του στοιχείου για $t=t_0$ θα δίνεται από τη σχέση (1.20):

$$dR(t=t_0) = \frac{dr}{(\sigma_s + \sigma_a(T_0)F\{T_0/T_a\})(2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (1.20)$$

όπου σ_a είναι η αγωγιμότητα του αέρα, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας

T_a είναι η θερμοκρασία του όγκου του αέρα πριν από τον ιονισμό.

Η μεταβολή της αγωγιμότητας του αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας προκύπτει από τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία. Στην παραπάνω εξίσωση θεωρείται ότι το F είναι πολύ μικρότερο από την μονάδα και ότι ο θερμός αέρας βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση.

Στο χρονικό διάστημα $t=t_0$ μέχρι $t=t_0+dt$ εκλύεται στον στοιχειώδη όγκο θερμότητα Joule, που δίνεται από τη σχέση (1.21):

$$dH = \frac{I^2(t_0)drdt}{(\sigma_s + \sigma_a(T_0) \cdot F\{T_0/T_a\})(2\pi rl + 2\pi r^2)} \quad (1.21)$$

ενώ η ενέργεια που εκλύεται από τον όγκο του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο δίνεται από τη σχέση (1.22).

$$dU = SF\{T_0/T_a\}(2\pi rl + 2\pi r^2)T_0drdt \quad (1.22)$$

Επομένως, η αύξηση της θερμοκρασίας του όγκου του αέρα στο χρονικό διάστημα dt υπολογίζεται από τη σχέση (1.23):

$$dT = \frac{dH - dU}{F\{T_0/T_a\}(2\pi rl + 2\pi r^2)dr\delta(T)C_p} \quad (1.23)$$

όπου $\delta(T)$ είναι η πυκνότητα του αέρα σε θερμοκρασία T και πίεση ίση με την ατμοσφαιρική

C_p είναι η θερμοχωρητικότητα του αέρα σε σταθερή πίεση.

Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί ώστε να εκτιμηθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του όγκου του αέρα ως συνάρτηση του χρόνου και να υπολογιστεί, στη συνέχεια, η χρονική μεταβολή της αντίστασης του όγκου του αέρα. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται σε κάθε στοιχειώδη όγκο από $r=r_0$ (όπου r_0 είναι η ακτίνα του αγωγού) μέχρι $r=\infty$. Συνεπώς, η συνολική αντίσταση του ηλεκτροδίου συναρτήσει του χρόνου, $R(t)$, μπορεί έτσι να ληφθεί από τη σχέση (1.24):

$$R(t) = \int_{r_0}^{R_i} dR(t)dr + \int_{R_i}^{\infty} dR_s dr \quad (1.24)$$

1.5.3 Χαρακτηριστικά της κρίσιμης πεδιακής έντασης E_C

Η ποσότητα E_C , σύμφωνα με τον μηχανισμό διάσπασης του εδάφους που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά:

- Το E_C για κάθε έδαφος θα είναι πάντα μικρότερο από αυτό του αέρα.
- Το E_C μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό αφού αυτό προκαλεί αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους.
- Για την ίδια περιεκτικότητα σε νερό, εδάφη που αποτελούνται από πολύ μικρά σωματίδια (όπως η σκόνη) θα έχουν σχετικά υψηλότερες τιμές του E_C συγκρινόμενα με τα εδάφη που περιέχουν μετρίου μεγέθους ή μεγάλους κόκκους (*grains*).
- Μερικοί έχουν την άποψη ότι υπάρχει ένας άμεσος συσχετισμός μεταξύ της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ_o και της πεδιακής έντασης διάσπασης: δηλαδή αν το ρ_o είναι υψηλό τότε θα είναι υψηλό και το E_C . Ο μηχανισμός της διάσπασης αποδεικνύει ότι ένας τέτοιος συσχετισμός δεν ισχύει. Κι αυτό γιατί το E_C σχετίζεται με τον ιονισμό του αέρα των κενών ενώ το ρ_o σχετίζεται με τη ροή του ρεύματος στο νερό που καλύπτει τα σωματίδια του εδάφους. Είναι αλήθεια ότι αυξανόμενης της περιεκτικότητας σε νερό θα μειωθούν και το ρ_o και το E_C . Ωστόσο η σχέση δεν είναι αναλογική αφού το E_C θα ήταν σταθερό για ένα δοσμένο δείγμα εδάφους εάν η περιεκτικότητα σε νερό ήταν συγκεκριμένη, ενώ το ρ_o μπορεί να μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται η ποσότητα του διαλυμένου αλατιού στο νερό [46].

1.5.4 Αποτελέσματα ιονισμού

Η διάσπαση του εδάφους που περιγράφηκε παραπάνω είναι βασικά ισοδύναμη με μία αύξηση των διαστάσεων του ηλεκτροδίου. Έτσι η αντίσταση γείωσης R που υπολογίζεται κατά τη διάρκεια των εκκενώσεων θα είναι διαφορετική από αυτή της μόνιμης κατάστασης (R_o). Από πολλούς ερευνητές έγιναν προσπάθειες να εκτιμηθεί η E_C . Με αυτήν την παράμετρο γνωστή είναι πιθανό να εκτιμηθεί η R [46]. Εκτός από τη μεταβολή της τιμής της αντίστασης γείωσης από εκείνη της μόνιμης κατάστασης, από δοκιμές που έγιναν παρατηρήθηκε ότι, κατά τον ιονισμό συμβαίνουν επίσης αλλαγές του πλάτους

και του χρόνου μετώπου των ρευμάτων. Τα αποτελέσματα μελετών έδωσαν μη γραμμικές χαρακτηριστικές ρεύματος και τάσης σε διαφορετικά εδάφη και μετρούμενες και υπολογίσιμες τιμές της κατανομής του δυναμικού στο σύστημα ηλεκτροδίων εντός του εδάφους [47]. Από τις καταγραφές των κυματομορφών των τάσεων και των ρευμάτων παρατηρήθηκε ότι αυξανόμενου του κρουστικού ρεύματος που εφαρμοζόταν σε δοκίμια, ο χρόνος μετώπου του ρεύματος, t_{cl} , αυξανόταν ενώ ο χρόνος μετώπου της τάσης, t_{cu} , παρέμενε σχεδόν ο ίδιος και σημαντικά μικρότερος από τον t_{cl} . Όταν η τιμή του κρουστικού ρεύματος ήταν αρκετά υψηλή εμφανιζόταν ιονισμός του εδάφους και τότε το ρεύμα αυξανόταν ταχέως ενώ η τάση την ίδια στιγμή έπεφτε απότομα. Τα πλάτη του ταχέως αυξανόμενου ρεύματος και οι χρόνοι μέχρι την έναρξη του ιονισμού διέφεραν ανάλογα με τη μορφή του ρεύματος, τη διάμετρο του εσωτερικού ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η χρονική διαφορά $\Delta t = t_{cl} - t_{cu}$ για μικρότερες τιμές του κρουστικού ρεύματος παρέμενε σχεδόν η ίδια και άρχιζε να αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ρεύματος. Αυτό ήταν μία ένδειξη των αναπτυσσόμενων εκκενώσεων στο έδαφος και της επίδρασης τους στη μείωση της κρουστικής αντίστασης του.

Τα φαινόμενα μη γραμμικότητας και υστέρησης, των μεγάλων παλμών ρεύματος, στη σύνθετη αντίσταση μικρών και μεγάλων συστημάτων γείωσης καθιστούν απαραίτητο να λαμβάνονται υπ' όψιν τα πλήρη δυναμικά φαινόμενα των ηλεκτρικών εκκενώσεων. Στο έδαφος που περιβάλλει την επιφάνεια του ηλεκτροδίου δημιουργείται μία ζώνη εκκενώσεων. Όσο η πτώση τάσης στην περιοχή εκκενώσεων είναι πολύ μικρότερη απ' ότι στο υπόλοιπο έδαφος, το ηλεκτρόδιο με το περιβάλλον χώρο έχει τις ιδιότητες ενός ηλεκτροδίου με αυξημένες διαστάσεις, κυρίως διάμετρο. Η επέκταση της περιοχής εκκενώσεων πρακτικά περιορίζεται όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην οριακή επιφάνεια αυτής της περιοχής είναι μικρότερη από την αντίστοιχη κρίσιμη [46].

1.6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

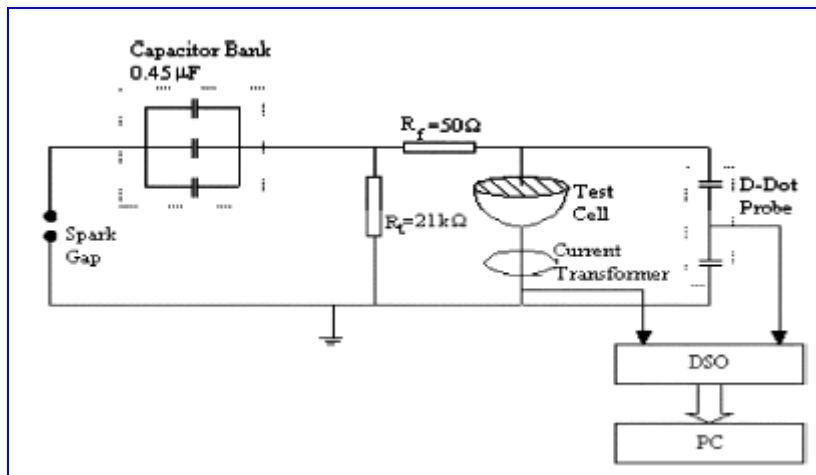
Το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζεται από πολλούς αστάθμητους παράγοντες και αυτό καθιστά δύσκολη τη μελέτη του. Πολλοί είναι οι μελετητές που ασχολήθηκαν με το φαινόμενο αυτό, με το ποιοι είναι οι παράγοντες που το επηρεάζουν, πόσο το επηρεάζουν και με ποίο τρόπο. Πιο κάτω παρατίθενται πειραματικές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν και συμπεράσματα που εξάχθηκαν από διάφορους επιστήμονες.

1.6.1 Ανάλυση του ιονισμού του εδάφους υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων [48]

Οι *N.Mohamad Nor*, *A.Haddad* και *H.Griffits* χρησιμοποίησαν το ημισφαιρικό δοκίμιο του **Σχήματος 1.9** και τη διάταξη του **Σχήματος 1.10** για να διερευνήσουν τα μη γραμμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε άμμο με μεταβαλλόμενη υγρασία, όταν υπόκειται σε κρουστικά ρεύματα.

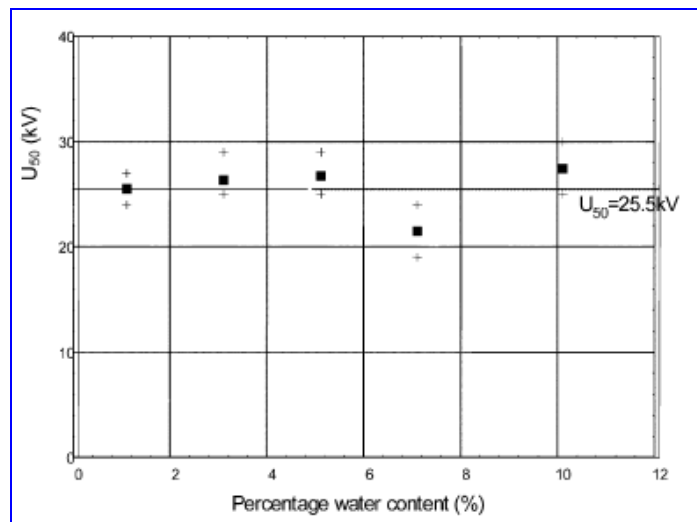


Σχήμα 1.20 Ημισφαιρικό δοκίμιο



Σχήμα 1.21 Διάταξη παραγωγής κρουστικών ρευμάτων

Εφήρμοσαν τουλάχιστον 20 κρούσεις για κάθε δείγμα δοκιμής και για τον υπολογισμό της τάσης U_{50} χρησιμοποίησαν τη μέθοδο **αυξομείωσης της τάσης**. Οι τιμές της τάσης U_{50} που μετρήθηκαν για τις διάφορες εδαφολογικές συνθήκες φαίνονται στο **Σχήμα 1.22**. Η μέση τιμή της τάσης U_{50} βρέθηκε 25,5kV και αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό πεδίο 9,4kV/cm στην ενεργή επιφάνεια του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 1.22 Τάση διάσπασης $U_{50\%}$ για διάφορα ποσοστά υγρασίας

Υπέθεσαν ότι η δεύτερη κορυφή που παρατήρησαν στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος οφειλόταν στον ιονισμό του εδάφους. Οι χρονικές καθυστερήσεις εμφάνισης της δεύτερης κορυφής στις κυματομορφές της τάσης (t_1) και στις κυματομορφές ρεύματος (t_2), βρέθηκαν χαμηλότεροι για χώματα μεγαλύτερης

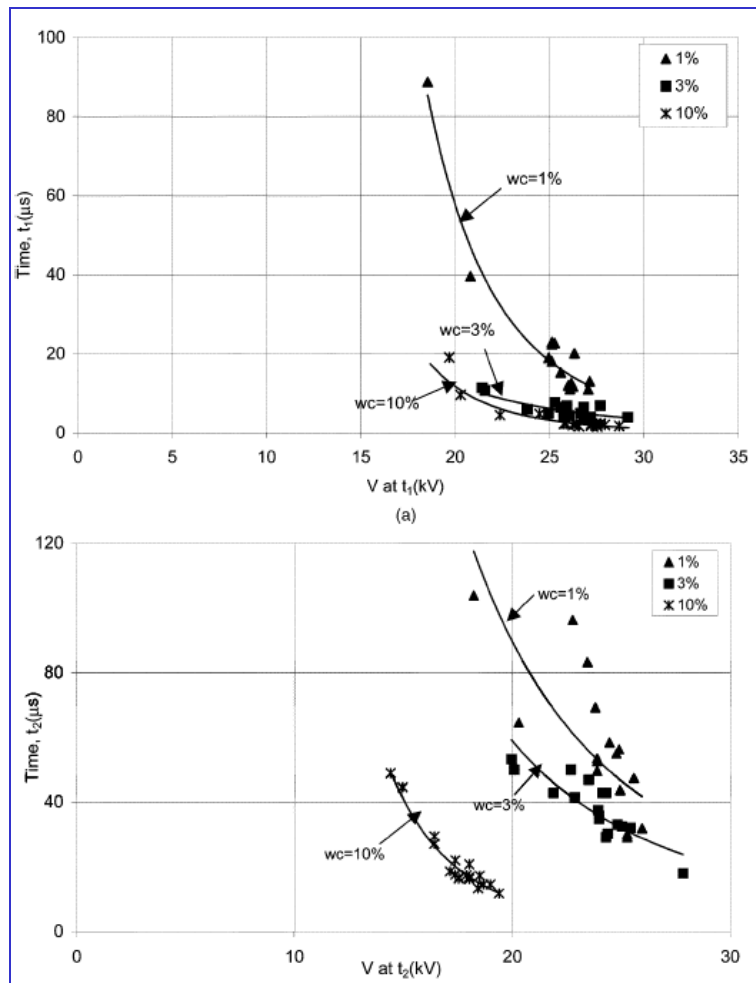
αγωγιμότητας και μειώνονταν με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης **(Σχήμα 1.23)**.

Σε ποσοστά υγρασίας πέραν του 10% δεν παρατηρήθηκαν δύο κορυφές ρεύματος. Ισχυρίστηκαν ότι αυτό πιθανόν να οφείλεται στην υψηλή αγωγιμότητα του χώματος. Το νερό έχει γεμίσει τα κενά αέρα ανάμεσα στους κόκκους του χώματος και χρειάζεται μεγάλο ποσό ενέργειας για να το εξατμίσει.

Η ύπαρξη των δύο κορυφών επιτρέπει τον καθορισμό των αντιστάσεων προ-ιονισμού και μετά-ιονισμού, οι οποίες μετρώνται χρησιμοποιώντας τις κορυφές ρεύματος και τις αντίστοιχες στιγμιαίες τάσεις μέσω των τύπων:

$$R_1 = \frac{V(I_{peak1})}{I_{peak1}} \quad (1.27)$$

$$R_1 = \frac{V(I_{peak2})}{I_{peak2}} \quad (1.28)$$

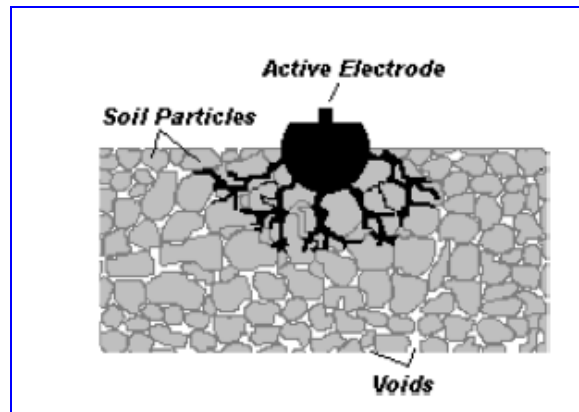


Σχήμα 1.22 Χρονικές παράμετροι ιονισμού του εδάφους συναρτήσει της στιγμιαίας τάσης για ποσοστά υγρασίας 1%, 3% και 10%

Η **αντίσταση προ-ιονισμού R_1** , η οποία αντιστοιχεί στις ιδιότητες του εδάφους χωρίς την επίδραση του ιονισμού και αντικατοπτρίζει τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους που οφείλεται στη δομή του και στο θερμικό μηχανισμό, βρήκαν να μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος κορυφής. Όταν άλλαζαν το δοκιμαστικό μέσο με τον ίδιο τύπο χώματος και την ίδια υγρασία παρατήρησαν διαφορές στις τιμές της R_1 . Αυτό το απέδωσαν στο θερμικό μηχανισμό που επηρεάζεται από τον αριθμό των κρούσεων που επιβάλλονται στο δοκίμιο και στις μη ελεγχόμενες κινήσεις του νερού στην υγρή άμμο. Σε ορισμένες μάλιστα δοκιμές βρέθηκε να αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος λόγω του αυξημένου αριθμού κρούσεων.

Η **αντίσταση μετά-ιονισμού R_2** , η οποία αντιστοιχεί στην τελική κατάσταση που φτάνει το χώμα όταν ο ιονισμός έχει διαδοθεί σε όλο τον όγκο του, είναι πάντα μικρότερη από την R_1 και επίσης μειώνεται με την αύξηση του

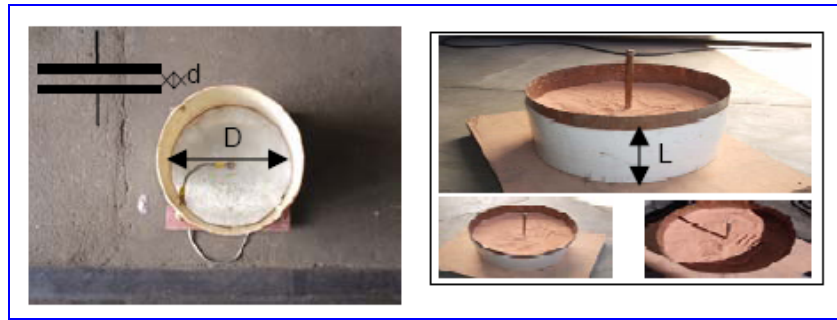
ρεύματος. Αυτή η μείωση της είναι μεγαλύτερη για μικρότερα ποσοστά υγρασίας. Με τη χρήση νέου δοκιμίου χώματος οι τιμές της αντίστασης μετά-ιονισμού ήταν πολύ κοντά η μια στην άλλη αφού η όλη διαδικασία εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του χώματος και την εφαρμοζόμενη τάση. Η χρονική στιγμή της διάσπασης βρέθηκε να εξαρτάται κυρίως από την αγωγιμότητα του εδάφους και την επιβαλλόμενη τάση.



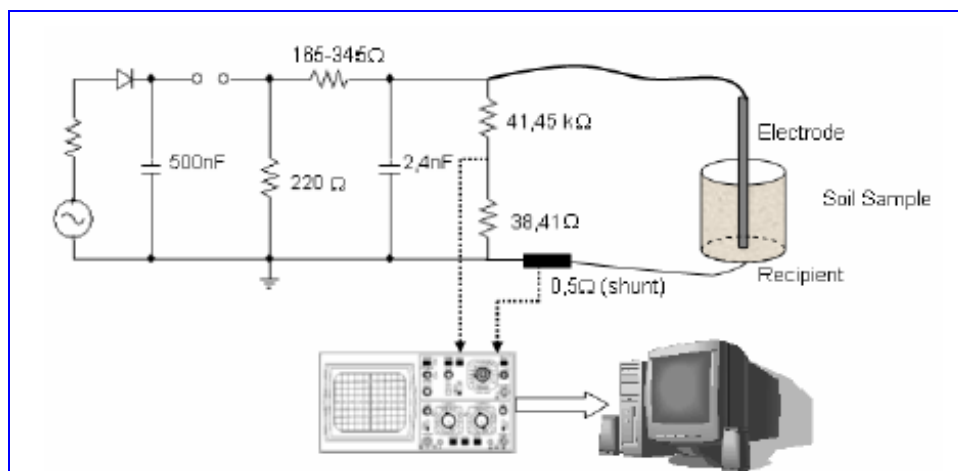
Σχήμα 1.23 Μοντέλο διάδοσης ιονισμού

1.6.2 Πειραματική μελέτη στον ιονισμό του εδάφους-νέα αποτελέσματα [49]

Οι José Luís Cerqueira Lima και Silvério Visacro εκτέλεσαν πειραματικές δοκιμές για να αξιολογήσουν την επίδραση του ιονισμού του εδάφους για τέσσερις τύπους χώματος και για διάφορα ποσοστά υγρασίας τόσο για ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο όσο και για ανομοιογενές. Εφάρμοσαν κρουστική τάση στα δοκίμια που φαίνεται στο **Σχήμα 1.24** μέσω κρουστικής γεννήτριας, την οποία αύξαναν βαθμιαία μέχρι να επιτευχθεί διάσπαση του αέρα μεταξύ των ηλεκτροδίων (ηλεκτρικό τόξο). Το κύκλωμα της διάταξης που χρησιμοποίησαν είναι αυτό του **Σχήματος 1.25** με διάμετρο ηλεκτροδίου 0,72cm και μήκος 19,5cm.



Σχήμα 1.24 Πειραματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν



Σχήμα 1.25 Πειραματική διάταξη

Τα πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που εξήγαγαν συνοψίζονται ως εξής:

- Το κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο σε ανομοιογενές πεδίο βρέθηκε πολύ μεγαλύτερο (3-4 φορές) απ' ότι σε ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο.
- Με εφαρμογή ομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου, η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους οδηγεί σε υψηλότερη τιμή κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου, γεγονός που δεν παρατηρείται σε ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι, ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου με εφαρμογή ανομοιογενούς ηλεκτρικού πεδίου είναι η αύξηση της έντασης του πεδίου στην περιοχή όπου το πεδίο είναι περισσότερο ανομοιογενές, περιοχή η οποία βρίσκεται κοντά στο εσωτερικό ηλεκτρόδιο.
- Ο χρόνος στον οποίο γίνεται η έναρξη της διαδικασίας του ιονισμού, είναι μια τυχαία μεταβλητή μικρότερη από 1μs σε αρκετές περιπτώσεις.

Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την υπόθεση ότι η χρονική στιγμή έναρξης του ιονισμού είναι μεγαλύτερη από 5μs. Αυτή η υπόθεση οφείλεται σε λανθασμένη ερμηνεία μιας πρακτικής που υιοθετείται από την Oettle, ο οποίος χρησιμοποίησε ελάχιστο χρόνο 5μs ως αναφορά για την εξέταση του ηλεκτρικού πεδίου που μπορούσε να προκαλέσει διάσπαση του εδάφους και δεν έλαβε υπ' όψιν τις περιπτώσεις που η έναρξη του ιονισμού γινόταν σε μικρότερο χρονικό διάστημα

- Συμπέραναν επίσης μια δυναμική συμπεριφορά της κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει των συνόρων της ζώνης ιονισμού καθώς αυτή επεκτείνεται λόγω της αύξησης του διαχεόμενου ρεύματος. Η κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές στην περιοχή κοντά στο ηλεκτρόδιο(περίπου 200-300kV/cm), τιμές οι οποίες αυξάνονται πολύ γρήγορα μέχρι την περιοχή που καθορίζεται από την ακτίνα(πάνω από 1,2cm) επέκτασης της διάχυσης του ρεύματος και φτάνουν τα 0,8-0,9MV/m (**Πίνακας 1.6**).
- Αυτή η δυναμική συμπεριφορά οδηγεί στο συμπέρασμα μιας ακόμα μεγαλύτερης μείωσης της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους λόγω του φαινομένου του ιονισμού, από αυτή που αναμένεται με υπόθεση σταθερής τιμής κρίσιμου ηλεκτρικού πεδίου γύρω στα 300MV/m (**Πίνακας 1,7**).

Πίνακας 1.6 Κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου

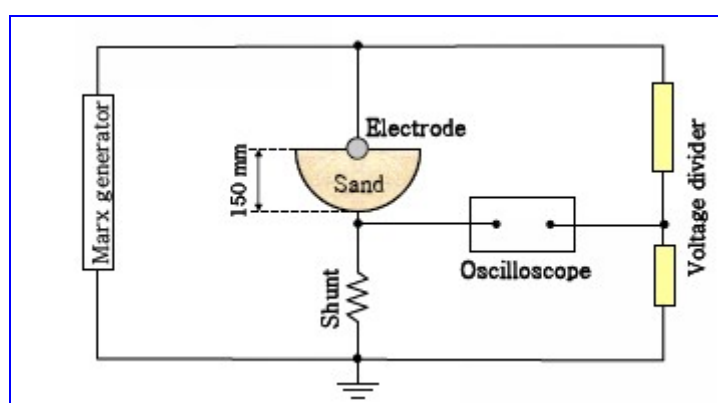
Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση (ρ) [Ωm]	Κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E_c) [kV/cm]	
		Χρόνος έναρξης	
		1 μs	3 μs
I	600	9,3	9,0
	350	6,0	6,3
	250	5,5	6,1
II	1090	9,5	6,0
	600	5,8	5,7
	240	5,2	5,3
	80	4,2	5,0
III	10000	5,3	5,5
	7000	5,0	5,0
	2000	3,7	3,7
IV	10000	14,2	14,4
	5000	12,0	11,6
	3000	10,0	9,0

Πίνακας 1.7 Κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της ακτίνας της περιοχής ιονισμού για έδαφος με ειδική αντίσταση $600\Omega m$.

$R_{exp}[cm]$	0,80	0,86	0,92	0,95	0,97	1,10	1,31	1,90	2,67
$E_c[kV/cm]$	3,12	4,22	5,38	6,63	7,87	8,66	8,82	7,80	7,23

1.6.3 Ανάλυση του ιονισμού του εδάφους υπό την επίδραση υψηλών κρουστικών ρευμάτων [50]

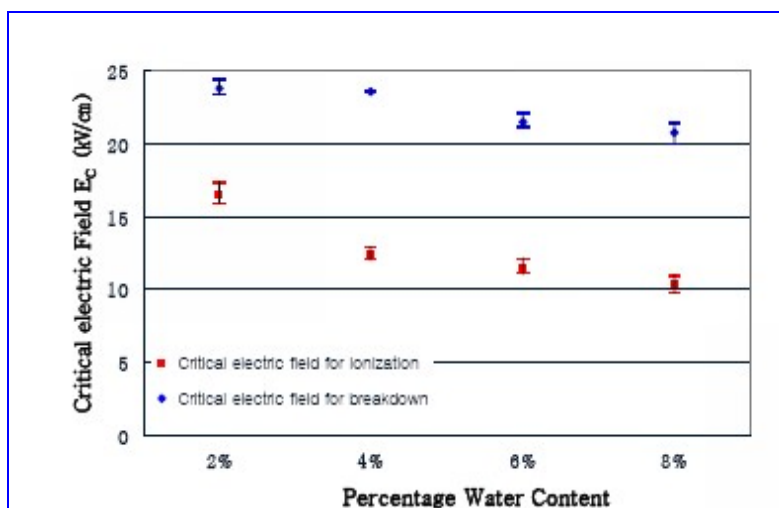
Οι **Bok-Hee Lee, Geon-Hun Park, Hoe-Gu Kim** και **Kyu-Sun Lee** διερεύνησαν πειραματικά τον ιονισμό του εδάφους που εμφανίζεται στη άμμο υπό την επίδραση κρουστικής τάσης για διάφορα ποσοστά υγρασίας. Χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη του **Σχήματος 1.26**. Αυτή αποτελείται από το δοκίμιο, την κρουστική γεννήτρια και το μετρητικό σύστημα τάσης και ρεύματος. Το δοκίμιο αποτέλεσε ένα ημισφαιρικό δοχείο εσωτερικής διαμέτρου 200 mm και ένα σφαιρικό ηλεκτρόδιο διαμέτρου 25,4mm θαμμένο κατά το ήμισυ στο κέντρο του ημισφαιρικού δοχείου. Η απόσταση μεταξύ του πάτου του δοχείου και του κάτω μέρους του ηλεκτροδίου ήταν 137mm.



Σχήμα 1.26 Διάγραμμα πειραματικής διάταξης

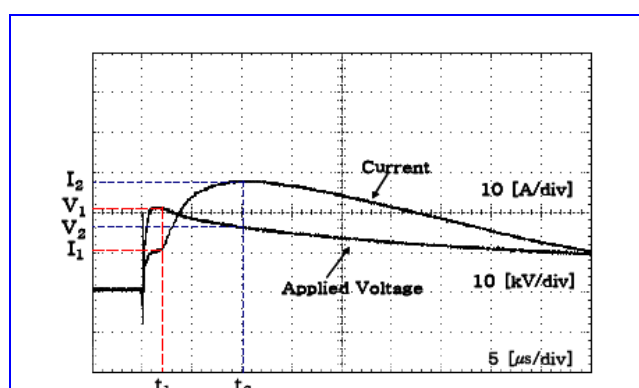
Πραγματοποίησαν δοκιμές κρουστικών τάσεων από 15-30kV και για τον καθορισμό της κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου εφάρμοσαν τη μέθοδο **αυξομείωσης τάσης**, πραγματοποιώντας τουλάχιστον 10 κρούσεις για κάθε δοκίμιο (έτσι ώστε να βρεθεί η τάση διάσπασης). Βρήκαν ότι η τάση των

19,1kV αντιστοιχεί στο κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο E_c 16,5kV/cm για υγρασία 2% και η τάση των 11,9kV σε κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο 10,2kV/cm για υγρασία 8% (Σχήμα 1.27). Το κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο για τον ιονισμό μειωνόταν με την αύξηση της περιεκτικότητας της άμμου σε νερό. Αυτό συνέβηκε επειδή ο ιονισμός του εδάφους εμφανίζεται σε υψηλό βαθμό σε εδάφη με μεγαλύτερη υγρασία.



Σχήμα 1.27 Διάγραμμα πειραματικής διάταξης

Για τις αντιστάσεις προ-ιονισμού και μετά-ιονισμού αναφέρουν ότι διακρίνονται με την ύπαρξη της δεύτερης αιχμής στην κυματομορφή ρεύματος, η οποία οφείλεται στον ιονισμό του εδάφους. Η αντίσταση προ-ιονισμού R_1 σχετίζεται με την πρώτη αιχμή ρεύματος και η αντίσταση μετά-ιονισμού R_2 με τη δεύτερη (Σχήμα 1.30).

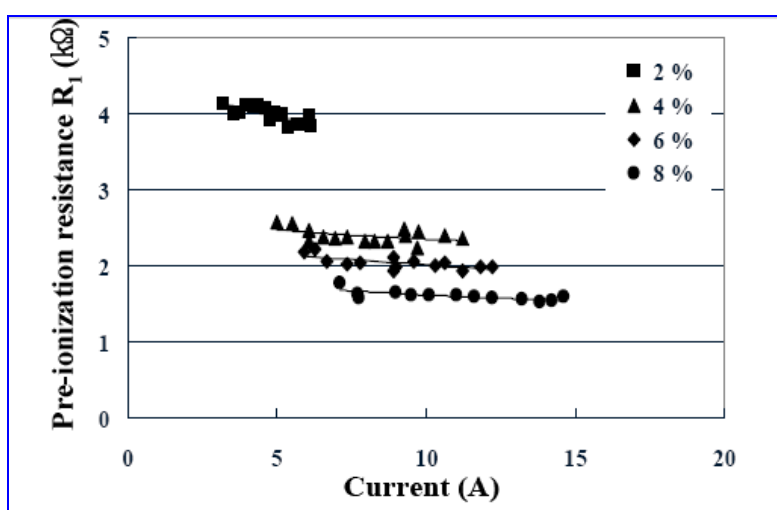


Σχήμα 1.28 Τυπικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος

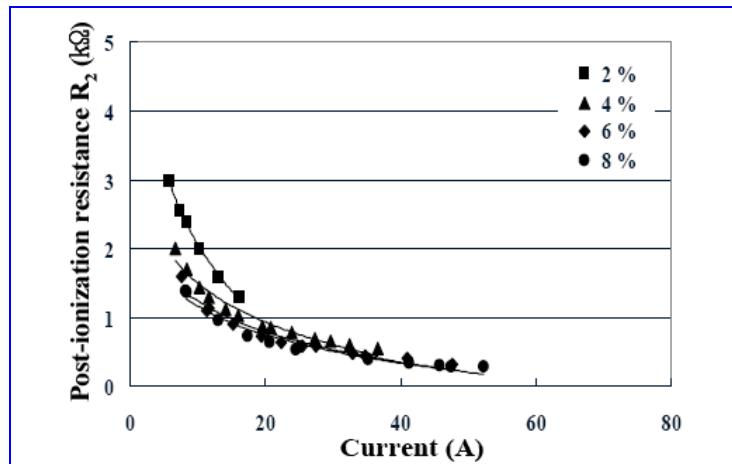
Υπολόγισαν την αντίσταση προ-ιονισμού και την αντίσταση μετά-ιονισμού συναρτήσει των κορυφών ρεύματος που παρατήρησαν για διαφορετικές υγρασίες της άμμου. Από τους υπολογισμούς βρήκαν ότι η αντίσταση προ-ιονισμού εξαρτάται λιγότερο από το μέγεθος του ρεύματος και ότι οι αντιστάσεις μετά-ιονισμού μειώνονταν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό και την αύξηση του ρεύματος. Ειδικά στην περιοχή ρευμάτων κάτω των 20A η αντίσταση μετά-ιονισμού μεταβάλλεται πολύ έντονα και η μη γραμμικότητα είναι πολύ έντονη (**Σχήματα 1.29-1.30**).

Σε άρθρο τους αναφέρουν επίσης: Η αντίσταση μετά-ιονισμού είναι στενά συνδεδεμένη με την επέκταση της περιοχής ιονισμού και τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης της περιοχής ιονισμού. Η μεγάλη τιμή της δεύτερης αιχμής της κυματομορφής του ρεύματος οφείλεται στο φαινόμενο Corona στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου γείωσης. Η ειδική αντίσταση του εδάφους στην περιοχή που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο Corona παίρνει σχεδόν μηδενική τιμή. Αυτό οδηγεί σε επέκταση της ενεργής περιοχής του ηλεκτροδίου γείωσης."

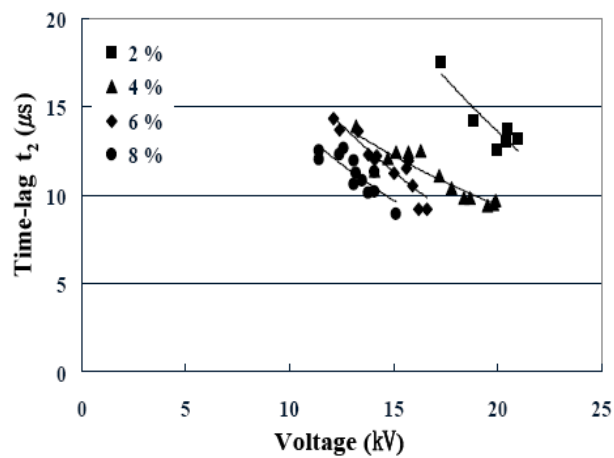
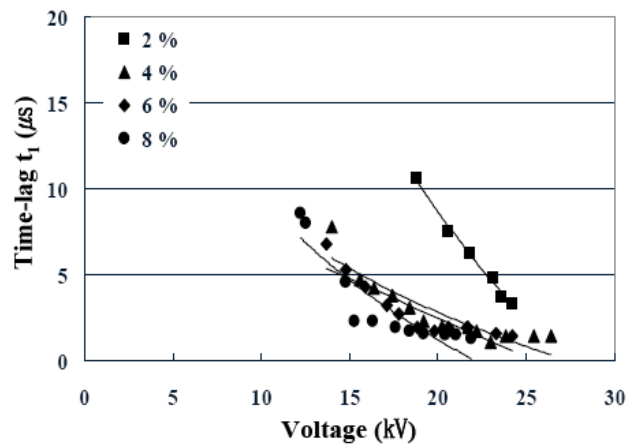
Παρατήρησαν ακόμα πως η αντίσταση μετά-ιονισμού είναι πάντα χαμηλότερη από το αντίσταση προ-ιονισμού ανεξάρτητα από την περιεκτικότητα σε νερό και πως όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα σε νερό τόσο μικρότερη είναι η καθυστέρηση έναρξης του ιονισμού (t_1) και η καθυστέρηση εμφάνισης της δεύτερης αιχμής (t_2) (**Σχήμα 1.31**).



Σχήμα 1.29 Αντίσταση προ-ιονισμού (R_1) συναρτήσει του ρεύματος και της υγρασίας

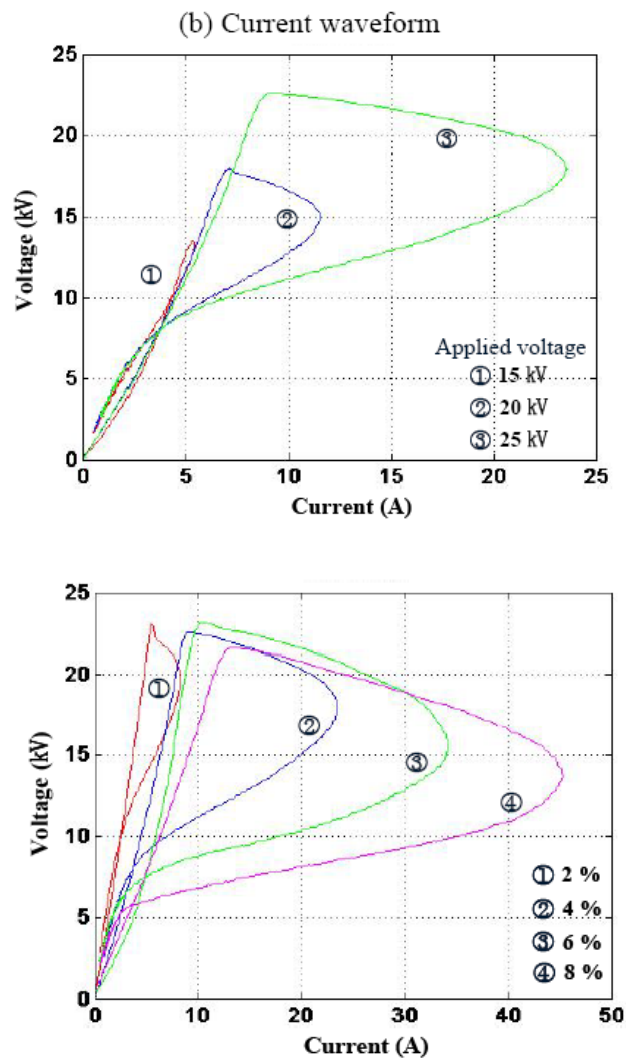


Σχήμα 1.30 Αντίσταση μετά-ιονισμού (R_2) συναρτήσει του ρεύματος και της υγρασίας



Σχήμα 1.31 Χρονική καθυστέρηση πρώτης και δεύτερης αιχμής ρεύματος συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης και της υγρασίας της άμμου

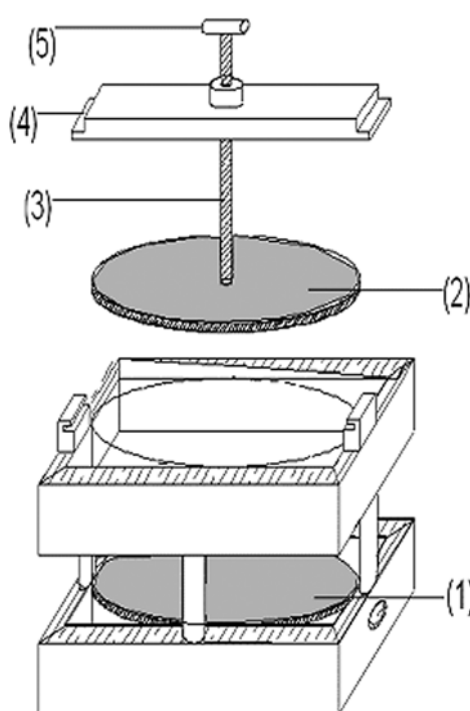
Από τις καμπύλες τάσης-ρεύματος, (**Σχήμα 1.32**), παρατήρησαν γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος για εφαρμογή χαμηλής τάσης και μη γραμμικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους για τάσεις πέρα από την κρίσιμη τιμή. Οι καμπύλες τάσης- ρεύματος σχηματίζουν ένα βρόχο λόγω της διαφοράς στο χρόνο μετώπου και το χρόνο ουράς μεταξύ των κυματομορφών τάσης και ρεύματος για εφαρμοζόμενη τάση 20 kV. Το μεγάλο μέγεθος των βρόχων φανερώνει την εκφόρτιση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας στο χώμα.



Σχήμα 1.32 Καμπύλες V-I

1.6.4 Συμπεριφορά συστημάτων γείωσης σε εδάφη χαμηλής ειδικής αντίστασης [51]

Οι **N.Mohamad Nor**, **A.Haddad** και **H.Griffits** ανάμιξαν βρεγμένο άργιλο (γνωστό για τη χαμηλή ειδική του αντίσταση-μερικά Ωm- σε σχέση με την άμμο και τα πετρώδη εδάφη και για την εξαιρετικά υψηλή του διηλεκτρική σταθερά) με καθορισμένη ποσότητα νερού ελεγχόμενης περιεκτικότητας σε χλωριούχο νάτριο και το τοποθέτησαν στην κατασκευή παράλληλων πλακών που φαίνεται στο **Σχήμα 1.33**.



Σχήμα 1.33 Δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για μελέτη εδαφών χαμηλής ειδικής αντίστασης

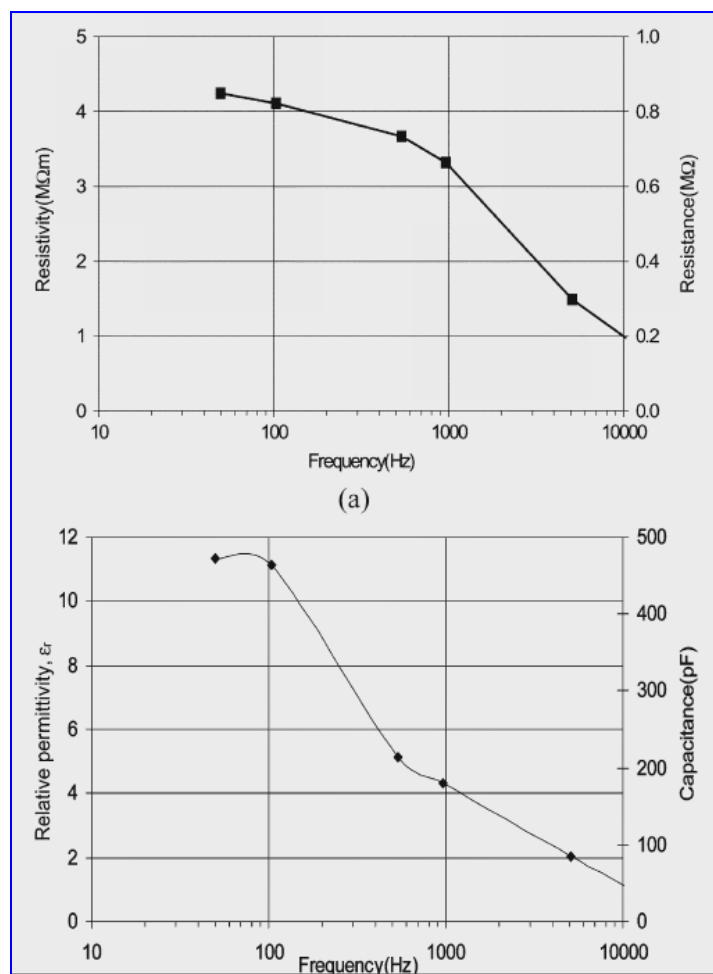
Μέσω αυτού του δοκιμίου και μέσω της μεθόδου αυξομείωσης τάσης βρήκαν τιμή $U_{50\%}=25\text{kV}$, η οποία αντιστοιχεί σε μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο $9,2\text{kV/cm}$. Η τάση διάσπασης και οι κυματομορφές ρεύματος βρέθηκαν παρόμοιες με αυτές της υγρής άμμου όμως η χρονική στιγμή της τάσης διάσπασης βρέθηκε μικρότερη στον άργιλο γεγονός που τους οδήγησε στο συμπέρασμα ότι σε εδάφη χαμηλότερης ειδικής αντίστασης η διαδικασία του ιονισμού εξελίσσεται με πιο γρήγορους ρυθμούς.

Χρησιμοποιώντας σταθεροποιημένη παροχή ηλεκτρικής ισχύος με μεταβλητό επίπεδο τάσης από 5 μέχρι τα 30V για ξηρό μίγμα NaCl και από 2 μέχρι 8V για υγρό(μικρότερο λόγω των υψηλών ρευμάτων που διαπερνούν το δοκίμιο στην περίπτωση αυτή) παρατήρησαν ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειωνόταν σημαντικά με την αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 1.8**.

Πίνακας 1.8 Ειδική αντίσταση NaCl για διάφορα ποσοστά υγρασίας που προέκυψε με επιβολή συνεχούς τάσης στο δοκίμιο.

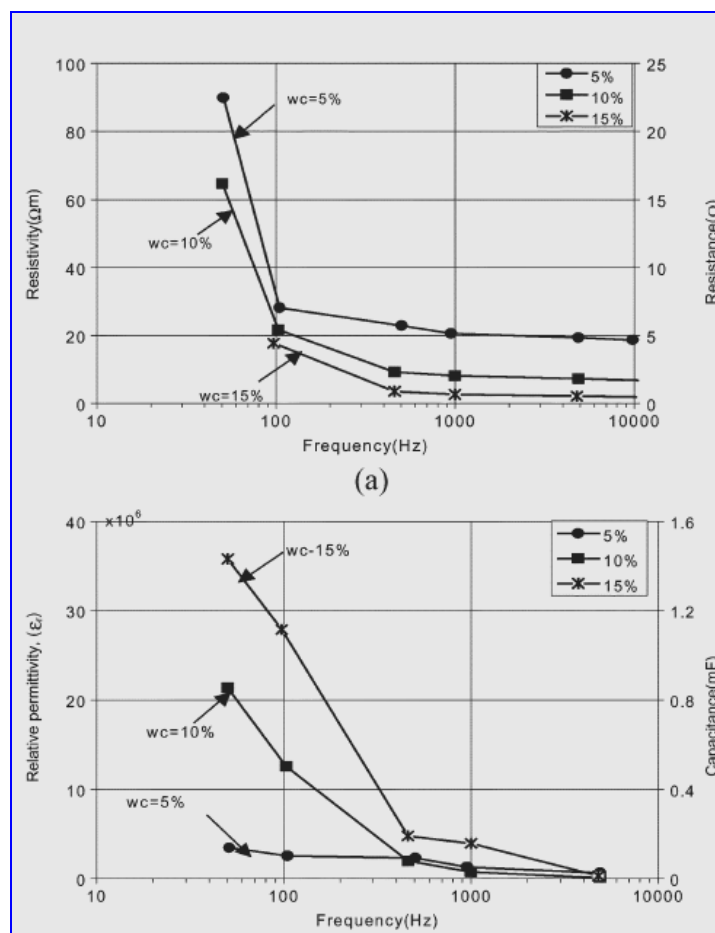
Ποσοστό υγρασίας (%)	0	5	10	15
Ειδική αντίσταση NaCl ($\Omega.m$)	4.8M	88	64	26,5

Στη συνέχεια εφαρμόζοντας AC τάση, η ειδική αντίσταση του ξηρού NaCl και η διηλεκτρική του σταθερά αντίστοιχα μειωνόταν από 4,2M Ωm , 11 σε συχνότητα 50Hz σε 0,8 M Ωm , 1 στα 10kHz όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.36**.



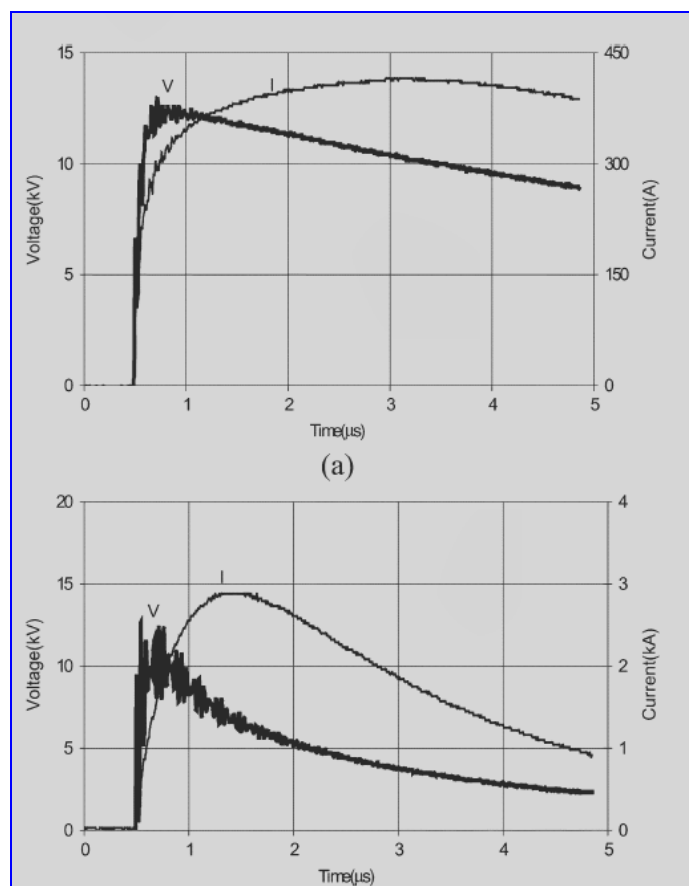
Σχήμα 1.36 Επίδραση της συχνότητας σε ξηρό NaCl στην ειδική αντίσταση και τη διηλεκτρική σταθερά.

Στις δοκιμές υγρού NaCl παρατηρήθηκε και πάλι μείωση της ειδικής αντίστασης, της χωρητικότητας και της αντίστοιχης διηλεκτρικής σταθεράς με την αύξηση της συχνότητας της επιβαλλόμενης τάσης. Στο υγρό NaCl όμως οι ειδικές αντιστάσεις που μετρήθηκαν ήταν κάτω από 100Ωm και η διηλεκτρική σταθερά ήταν της τάξης των 1000. Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης και της διηλεκτρικής σταθεράς διαφαίνεται στο **Σχήμα 1.37**.

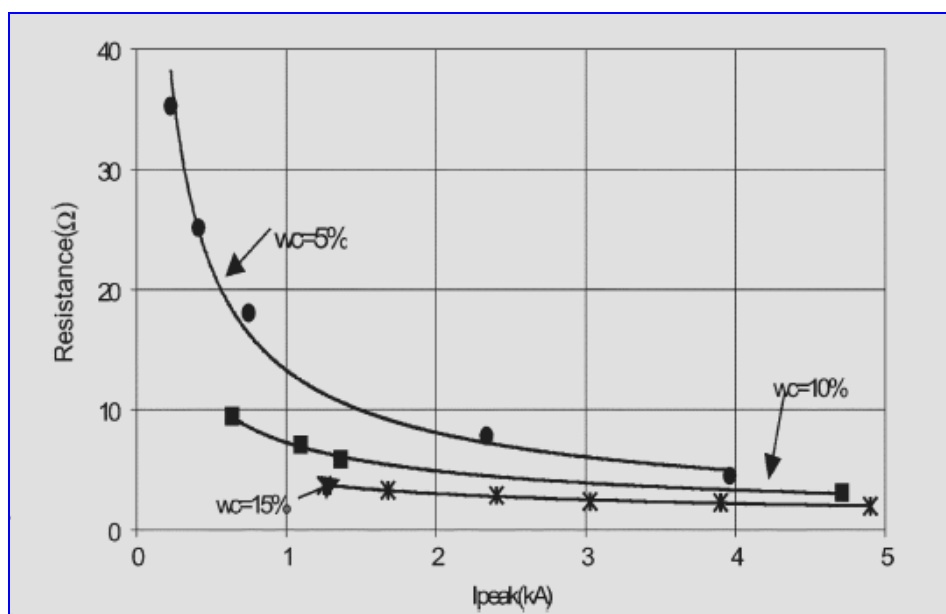


Σχήμα 1.37 Επίδραση της συχνότητας σε υγρό NaCl στην ειδική αντίσταση-αντίσταση και τη διηλεκτρική σταθερά-χωρητικότητα.

Για να μελετήσουν την επίδραση των κρουστικών χαρακτηριστικών των μιγμάτων NaCl χρησιμοποίησαν ημισφαιρικό δοκίμιο εξωτερικής και εσωτερικής διαμέτρου 45,7cm και 6,25cm αντίστοιχα για ξηρό NaCl και 25cm και 1,8 cm για υγρό NaCl. Στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος (**Σχήμα 1.38**) που λήφθηκαν στο υγρό NaCl σε συνθήκες χαμηλής και σε συνθήκες υψηλής αγωγιμότητας δεν παρατηρήθηκαν διασπάσεις λόγω της υψηλής ειδικής αντίστασης του άλατος. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η μη γραμμική ηλεκτρική συμπεριφορά του NaCl είναι πιο έντονη για ρεύματα κάτω του 1kA περιοχή στην οποία η αντίσταση του δοκιμίου μειώνεται απότομα με την αύξηση του ρεύματος (**Σχήμα 1.39**).

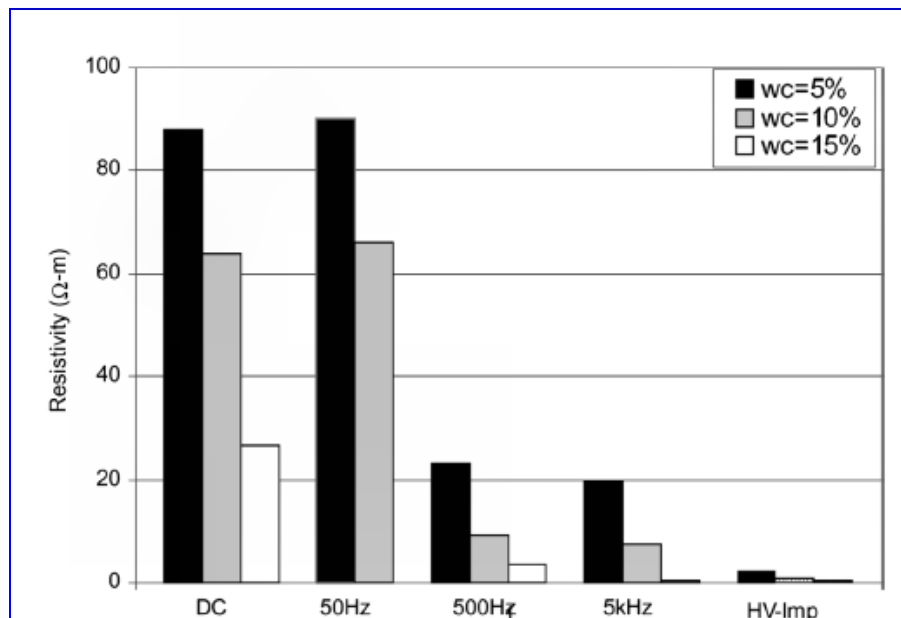


Σχήμα 1.38 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος για υγρό NaCl με υγρασία 5%(πάνω) και με υγρασία 10%(κάτω)



Σχήμα 1.39 Αντιστάσεις συναρτήσει της κορυφής του ρεύματος για υγρό NaCl.

Προέκυψε ότι η υψηλότερη ειδική αντίσταση του εδάφους παρατηρείται σε συνεχή τάση και σε εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 50Hz και ότι υπό την επίδραση κρουστικών τάσεων η ειδική αντίσταση λαμβάνει εξαιρετικά χαμηλές τιμές σε σχέση με αυτές της συνεχούς τάσης. (**Σχήμα 1.40**)



Σχήμα 1.40 Ειδική αντίσταση για διάφορους τύπους εφαρμοζόμενης τάσης.

1.6.5 Προσδιορισμός κρίσιμης έντασης ηλεκτρικού πεδίου για εδάφη χαμηλής ειδικής αντίστασης [52]

Οι *N. Mohamad Nor*, *A. Haddad* και *H. Griffiths*, χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη του **Σχήματος** και σαν δοκίμια ημισφαιρικό δοχείο διαμέτρου 47,5cm με ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο διαμέτρου 6,25cm στο εσωτερικό του θαμμένο κατά το ήμισυ σε άμμο και ηλεκτρόδιο παράλληλων πλακών. Από τη διερεύνηση τους προέκυψαν τα ακόλουθα:

- Χρησιμοποιώντας χώματα με διαφορετικά μεγέθη κόκκων βρήκαν ότι για ίδια περιεκτικότητα χώματος σε νερό η ειδική αντίσταση για χώματα με κόκκους μικρού μεγέθους (0,04-0,2mm) είναι μεγαλύτερη από αυτά με κόκκους μεσαίου μεγέθους(διαμέτρου

0,06-0,6mm). Επιπλέον παρατήρησαν ότι η κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου είναι ανεξάρτητη του μεγέθους των κόκκων του χώματος όταν αυτό έχει χαμηλή ειδική αντίσταση (κάτω από 10kΩm).

- Εφάρμοσαν κρουστική τάση σε χώμα με κόκκους μεσαίου μεγέθους με διάφορα ποσοστά NaCl και νερού, (στο ημισφαιρικό δοκίμιο) τα οποία καταγράφονται στον **Πίνακα 1.9** μαζί με τις ειδικές αντιστάσεις που υπολογίστηκαν. Οι ειδικές αντιστάσεις βρέθηκαν πολύ μικρότερες από αυτές που βρέθηκαν σε χώμα με διάφορα ποσοστά υγρασίας και χωρίς NaCl (της τάξης των KΩm).

Πίνακας 1.9

Δείγμα χώματος	A	B	Γ	Δ	Ε	Ζ
NaCl(%)	5	10	10	15	20	25
Water Content(%)	5	5	10	10	10	10
Μέση τιμή ειδικής αντίστασης(Ωm)	5,5	5,5	2,3	2,5	2,5	2,7

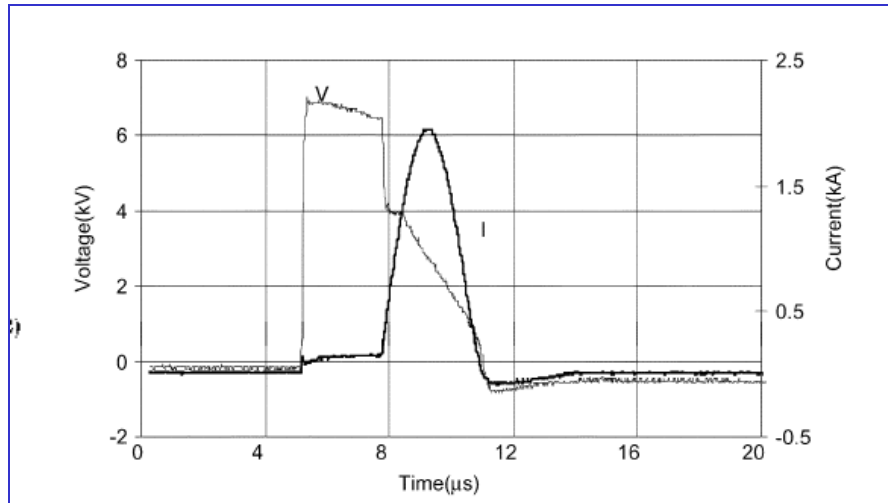
- Εφαρμόζοντας κρουστική τάση στο δείγμα χώματος Β παρατήρησαν ότι οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος ήταν παρόμοιες με αυτές της άμμου με ποσοστό υγρασίας 15%, δεν παρατήρησαν δεύτερη κορυφή ούτε και ιονισμό.
- Μελέτησαν επίσης την επίδραση της πολικότητας της κρουστικής τάσης για διάφορα ποσοστά υγρασίας, τόσο για ομοιογενές όσο και για ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο χρησιμοποιώντας το δοκίμιο παράλληλων πλακών και το ημισφαιρικό αντίστοιχα.

Με το ημισφαιρικό δοκίμιο οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος με αρνητική και θετική πολικότητα ήταν παρόμοιες. Όμως προσεκτική ανάλυση τους, φανερώνει πως στην αρνητική πολικότητα η δεύτερη κορυφή ρεύματος εμφανίζεται για εφαρμοζόμενη τάση γύρω στα 18kV που αντιστοιχεί σε E_c τιμής 6,6kV ψηλότερη από αυτήν που βρήκαν στη θετική πολικότητα

(5,5kV). Αυτό ήταν αναμενόμενο από τη στιγμή που είναι γνωστό πως οι εκφορτίσεις στον αέρα συμβαίνουν σε χαμηλότερα επίπεδα εφαρμοζόμενης κρουστικής τάσης όταν αυτή είναι θετική και πως ο ιονισμός του εδάφους συμβαίνει στα κενά αέρα ανάμεσα στους κόκκους χώματος.

Με το δοκίμιο παράλληλων πλακών και εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυξομείωσης τάσης με τουλάχιστον 20 κρούσεις για κάθε πολικότητα, μέτρησαν $U_{50\%}$ 26kV για θετική πολικότητα και 28kV για αρνητική τιμές που αντιστοιχούν σε κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου 26kV/cm και 28kV/cm αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι πολύ κοντά στις τιμές που βρήκαν για διάσπαση αέρα σε ομοιογενές πεδίο γεγονός που υποδηλώνει πως το πεδίο ανάμεσα στις παράλληλες πλάκες μπορεί να θεωρηθεί ομοιογενές.

- Στο δοκίμιο παράλληλων πλακών στις κρουστικές δοκιμές για διάφορα ποσοστά υγρασίας, δεν παρατήρησαν δεύτερη κορυφή στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος μέχρι το σημείο διάσπασης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.40** για θετική πολικότητα. Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος και για τις δύο πολικότητες ήταν παρόμοιες. Στην αρνητική πολικότητα δεν παρατηρήθηκε δεύτερη κορυφή και αυτό οφείλεται στη μικρή απόσταση μεταξύ των παράλληλων πλακών, για την οποία οι χρόνοι διάδοσης είναι τόσο μικροί που δεν μπορούν να μετρηθούν με μετατροπείς. Το ηλεκτρικό πεδίο που αντιστοιχεί στην τάση διάσπασης βρέθηκε κατά μέσο όρο 7,9kV/cm υπό θετικής πολικότητας κρουστική τάση και 9kV/cm υπό αρνητικής πολικότητας.



Σχήμα 1.40 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάσπαση της άμμου για ποσοστό υγρασίας 10% και τάση φόρτισης 7kV.

- Παρατηρήθηκε επίσης ότι η κρίσιμη ένταση ηλεκτρικού πεδίου για χώμα ίδιας ειδικής αντίστασης είναι υψηλότερη στο δοκίμιο παράλληλων πλακών παρά στο ημισφαιρικό δοκίμιο.

Βιβλιογραφία

- [1] Προκόπης Χριστοδούλου, «Συστήματα γείωσης. Θεωρητική προσέγγιση», Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2000.
- [2] Φανή Η. Ασημακοπούλου, «Συμβολή στη μελέτη του φαινομένου του ιονισμού του εδάφους», Ενδιάμεση κρίση, Αθήνα 2009.
- [3] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Αθήνα 1997.
- [4] «Κανονισμοί εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων» (Κ.Ε.Η.Ε.), Πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384..
- [5] VDE-100
- [6] Περής Χάλαρης, «Γειώσεις – Νομοθεσία και κανονισμοί», Σεμινάριο: 'Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων'.
- [7] Ν. Παναγιωτόπουλος, «Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων», Σεμινάριο: 'Γειώσεις και αντικεραυνική προστασία δικτύων και εγκαταστάσεων'.
- [8] Δημήτρης Χατζηπαντελής, «Επίδραση της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην κατανομή του δυναμικού εδάφους για διάφορα συστήματα γείωσης», Αθήνα 2001.
- [9] <http://us.fluke.com/usen/solutions/earthground/GroundingBasics.htm>
- [10] www.nachi.org
- [11] www.techteam.gr
- [12] www.pontins.co.za
- [13] <http://diocles.civil.duth.gr>
- [14] ΕΛΕΜΚΟ, «Θεμελιακή γείωση», Εκδόσεις Α.Παπασωτηρίου.'
- [15] Tagg G.F., «Earth Resistances», George Newnes Limited, London, 1964.
- [16] Megger, «Getting down to earth», A practical guide to earth resistance.
- [17] ANSI/IEEE Std 80-1986, «IEEE guide for safety in AC substation grounding», 1986.

- [18] J.H. Scott, «*Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soils*», Note 18, *Electromagnetic Pulse Theoretical Notes*, AFWL EMP 2-1, April, 1971.
- [19] C.L. Longmire and K.S. Smith, «*A Universal Impedance for Soils*», DNA report 3788T, October 1975.
- [20] J.W. Erler and D.P. Snowden, «*High Resolution Studies of the Electrical Breakdown of Soil*», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4564- 4567.
- [21] D.P. Snowden and J.W. Erler, «*Initiation of Electrical Breakdown of Soil by Water Vaporization*», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4568- 4571.
- [22] R.E. Leadon, T.M. Flanagan, T.M. Mallon, R. Denson, «*Effect of Ambient Gas on Arc Initiation Characteristics in Soil*», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-30, No.6, December 1983, pp.4572- 4576.
- [23] A.M. Mousa, «*The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes*», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. , July 1994, pp.1669-1677.
- [24] T.M. Flanagan, C.E. Mellon, R. Denson, R.E. Leadon, «*Electrical Breakdown Properties of Soil*», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-28, No.6, December 1981, pp.4432- 4439.
- [25] T.M. Flanagan, C.E. Mallon, R. Denson, «*Electrical Breakdown Characteristics of Soil*», *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. NS-29, No.6, December 1982, pp.1887-1890.
- [26] E.E. Oettle, «*The Characteristics of Electrical Breakdown and Ionization Processes in Soil*», *Transactions on the South African IEE*, December 1983, pp.63-70.
- [27] E.E. Oettle, «*A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes*», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, October 1988, pp.2020-2029.
- [28] G.M. Petropoulos, «*The High-Voltage Characteristics of Earth Resistances*», *Journal IEE*, Vol. 95, Part II, 1948, pp.59-70.

- [29] A.C. Liew, M. Darveniza, «Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths», *Proc. IEE*, Vol. 121, No 2, pp. 123-135, February 1974
- [30] N.M. Nor, A. Ramli, «Electrical Properties of Dry Soil under High Impulse Currents», *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, 2007, pp. 500-505.
- [31] P.L. Bellaschi, «Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds», *transaction of American Institute of Electrical Engineer*, Vol. 60, March 1941, pp. 123-128.
- [32] P.L. Bellaschi, R.E. Armington, A.E Snowden, «Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, Part II», *Transaction of American Institute of Electrical Engineer*, Vol. 61, 1942, pp. 349-363.
- [33] K.J. Nixon. «The lightning transient behavior of a driven rod earth electrode in multi-layer soil», *Διδακτορική Διατριβή*, Ιούλιος 2006
- [34] M. Loboda, Z. Pochanke, «Experimental Study of Electric Properties of Soil with Impulse Current Injections», *18th International Conference on Lightning Protection*, 1985, Munich, pp. 191-198.
- [35] A.C. Liew, «Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines», *Ph.D.*, University of Queensland, Australia, 1972.
- [36] V. A. Rakov, M.A. Uman, K.J. Rambo, M.I. Fernandez, R.J. Fisher, G.H.Schnetzer, R. Thottappillil, A. Eybert-Berard, J.P. Berlandis, P. Lalande, A.Bonamy, P. Laroche, and A. Bondiou-Clergerie, «New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama», *Journal of Geophysics. Res.*, Vol. 103, No. D12, pp.14.117–14.130, 1998.
- [37] Z. Song, M. R. Raghuveer, J. He, «Influence of the nature of impulse current propagation in soils on transient impedance characteristics», *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 739–742, 2000.
- [38] Z. Song, H. Jingliang, and M. R. Raghuveer, «Experimental study on lightning breakdown channels in the soils», presented at the *IEEE High Voltage Engineering Symposium*, 1999, No. 467, pp. 2.426–2.429.

- [39] J. Wang, A.C.Liew, M. Darveniza, «Extension of Dynamic model of Impulse Behavior of concentrated Grounds at High Currents», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20,no. 3, July 2005, pp.2160-2165.
- [40] S. Sekioka, M.I. Lorentzou, M.P. Philippakou, J.M. Prousalidis, «Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, no. 1, January 2006, pp. 194-201.
- [41] M. Hayashi, «Observation of streamer in the soil by surge current», *JIEE*, Vol 87-14, pp 133-141,1967
- [42] O. Mayr, «Beitrage zur Theorie des statschen und des dynamischen Lichtbogens», *Arch. für Elektrotechnik*, Vol. 37, pp. 588–608, 1943.
- [43] A. M. Cassie, «Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory», *CIGRE*, Paris, France, Report No. 102, 1939.
- [44] V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu, «Physical model of surge-current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization», *Journal of Electrostatics*, 60, 2004, pp.193-202.
- [45] A.M. Mousa, «The Soil Ionization Gradient Associated With Discharges of High Currents Into Concentrated Electrodes», *I.E.E.E. Trans. on Power Delivery*, Vol.9, No.3, 1994.
- [46] M. Loboda, V. Scuka, «On the Transient Characteristics of Electrical Discharges and Ionization Processes In Soil», *23th International Conference on Lightning Protection*, 1996, pp.539-544.
- [47] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, « Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses», *IEEE transactions on power delivery* ,vol. 21, no. 1, January 2006.
- [48] José Luís Cerqueira Lima, Silvério Visacro, «experimental developments on soil ionization: new findings», *International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects*, Florianopolis – Brazil, November, 2008

- [49] Bok-Hee Lee†, Geon-Hun Park*, Hoe-Gu Kim* and Kyu-Sun Lee*, « Analysis of Soil Ionization Behaviors under Impulse Currents», *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 4, No.1, pp. 98~105, 2009
- [50] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, « Performance of Earthing Systems of Low Resistivity Soils», *IEEE transactions on power delivery*, vol. 21, no. 4, October 2006.
- [51] N. Mohamad Nor, A. Haddad, H. Griffiths, « Determination of Threshold Electric Field EC of Soil Under High Impulse Currents», *IEEE transactions on power delivery*, vol. 20, no. 3, July 2005.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Πειραματική διάταξη

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και ο διαθέσιμος εργαστηριακός εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων, που αφορούν στη διάσπαση του εδάφους καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

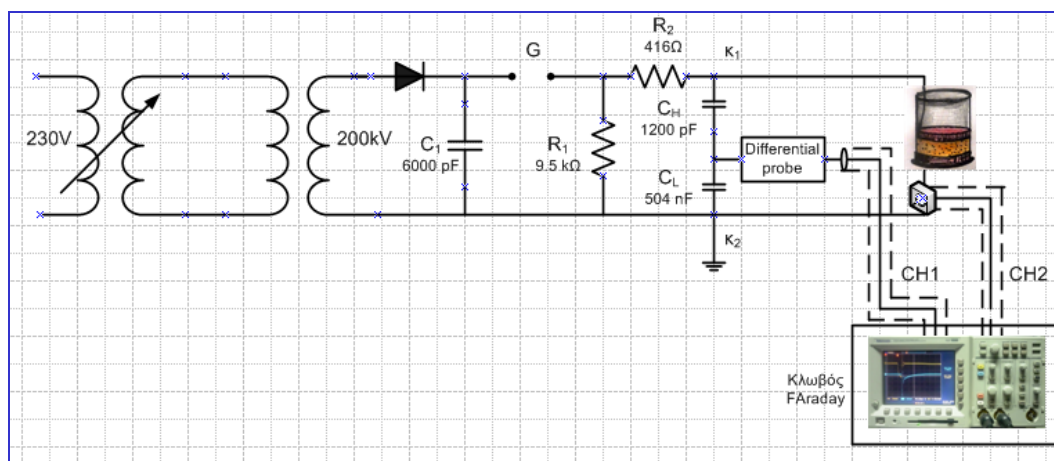
2.2 Εξοπλισμός

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός:

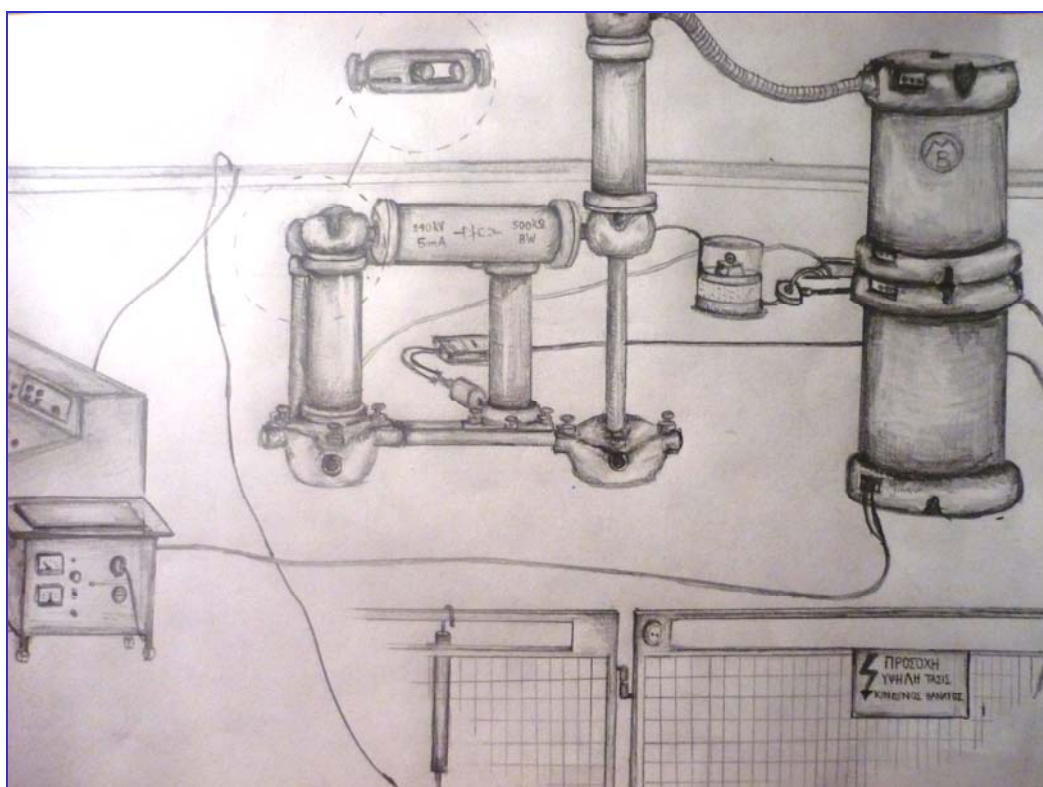
- λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας Messwandler-Bau GmbH Bamberg
- τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616
- σταθεροποιητής τάσης Wechelspannungs-stabilisator 3kW
- διαφορικός καταμεριστής MD 200 Schaffner WS-30
- αμπεροσιμπίδα Current Monitor Pearson Model 8260
- παλμογράφος Tektronix TDS 3052
- ομοαξονικά καλώδια
- κλωβός Faraday
- υγρόμετρο – θερμόμετρο TESTO 625

2.3 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στα **Σχήματα 2.1α** και **2.1β** παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης.



Σχήμα 2.1α Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης για τη διεξαγωγή των πειραμάτων



Σχήμα 2.1β Πειραματική διάταξη

2.3.1 Λυόμενη διάταξη μονοβάθμιας κρουστικής γεννήτριας

Η λυόμενη κρουστική γεννήτρια της Messwandler-Bau GmbH Bamberg [1], μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή των στοιχείων της σαν γεννήτρια παραγωγής υψηλής εναλλασσόμενης, συνεχούς και κρουστικής τάσης με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον **Πίνακα 2.1**.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά της λυόμενης κρουστικής γεννήτριας της Messwandler-Bau GmbH Bamberg

	Εναλλασσόμενη τάση χωρίς φορτίο	Συνεχής τάση χωρίς φορτίο	Κρουστική τάση χωρίς φορτίο
Μονοβάθμια	100kV/5kVA	140kV/20mA	140kV/245J
Διβάθμια	200kV/5kVA	280kV/15mA	280kV/490J
Τριβάθμια	300kV/5kVA	420kV/10mA	420kV/735J

Η λυόμενη γεννήτρια είναι μια συσκευή εύκολα συναρμολογήσιμη, αποτελείται από στοιχεία που περιέχουν μονωτικό λάδι ερμητικά κλεισμένο σε αυτά και έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια μορφή. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν κατάλληλα αναγνωριστικά σύμβολα που διευκολύνουν στη λειτουργία της γεννήτριας από το χειριστή. Το εύρος της θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργήσει η γεννήτρια είναι από -10°C έως και $+40^{\circ}\text{C}$.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος η γεννήτρια διαμορφώθηκε, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**, σε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, που παρήγαγε κρουστική τάση θετικής και αρνητικής πολικότητας. Η τάση του δικτύου πόλεως (230V) φθάνει στο πρωτεύον του αυτομετασχηματιστή M_1 , μέσω του οποίου μπορούμε να ρυθμίζουμε τη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή M_2 με σχέση μεταφοράς 220V/200kV, μεταθέτοντας τη λήψη του δευτερεύοντος του M_1 .



Σχήμα 2.2 Λυόμενη μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια

Στη συνέχεια, η υψηλή εναλλασσόμενη τάση που παίρνουμε ανορθώνεται μέσω του ανορθωτικού στοιχείου, το οποίο περιέχει αντίσταση προστασίας, και μετατρέπεται σε συνεχή τάση U_- , η οποία φορτίζει τον πυκνωτή C_1 . Μετά τη φόρτιση του πυκνωτή C_1 ο σπινθηριστής Σπ, τίθεται σε κοινή τάση με τον πυκνωτή. Όπως είναι προφανές, το διάκενο του σπινθηριστή πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην προκαλείται διάσπαση προτού ο πυκνωτής C_1 αποκτήσει την επιθυμητή τάση στα άκρα του. Η κρουστική τάση εμφανίζεται μεταξύ των άκρων κ_1 και κ_2 (Σχήμα 2.1α).

Μόλις επέλθει η διάσπαση του σπινθηριστή αρχίζει το στάδιο της εκφόρτισης της γεννήτριας. Την ώρα που ξεκινάει η διάσπαση του σπινθηριστή, ο πυκνωτής φορτίου C_H είναι εντελώς αφόρτιστος και γι αυτό αρχικά δεν εμφανίζει σημαντική αντίδραση στη διέλευση του ρεύματος φορτίσεως που περνά μέσα του, δηλαδή αρχικά συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα. Για τον λόγο αυτό, αρχικά αγνοείται η αντίδραση της R_1 , αφού το ρεύμα επιλέγει να διέλθει από τον κλάδο με την μικρότερη αντίσταση.

Το πώς θα μεταβληθεί η τάση φόρτισης της γεννήτριας εξαρτάται από τον λόγο C_1/C_H . Βασική επιδίωξη είναι ο πυκνωτής κρούσης C_1 να έχει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από τον πυκνωτή φορτίου C_H , ώστε ένα μικρό μόνο μέρος του φορτίου του πυκνωτή C_1 να είναι σε θέση να φορτίσει τον C_H . Με

άλλα λόγια επιτυγχάνεται με δεδομένη τάση φόρτισης, η παραγόμενη κρουστική τάση να είναι υψηλή και όσο το δυνατό πλησιέστερα στην τάση C_1 .

Σημειώνεται, ότι η παραγόμενη κρουστική τάση δεν μπορεί να φτάσει το πλάτος της ανορθωμένης τάσης U_- που χρησιμοποιείται στη φόρτιση της γεννήτριας. Το μέγεθος, που καθορίζει πόσο κοντά στην τιμή U_- μπορεί να φτάσει η κρουστική τάση λέγεται συντελεστής χρησιμοποίησεως και ορίζεται:

$$\eta = \frac{U_{k(max)}}{U_-} \quad (2.1)$$

Δηλαδή ο συντελεστής χρησιμοποίησης είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της κρουστικής τάσης, $U_{k(max)}$, προς τη μέγιστη τιμή της ανορθωμένης τάσης με την οποία φορτίζεται η γεννήτρια, U_- . Όσο υψηλότερος ο συντελεστής χρησιμοποίησης τόσο καλύτερα αξιοποιείται η γεννήτρια.

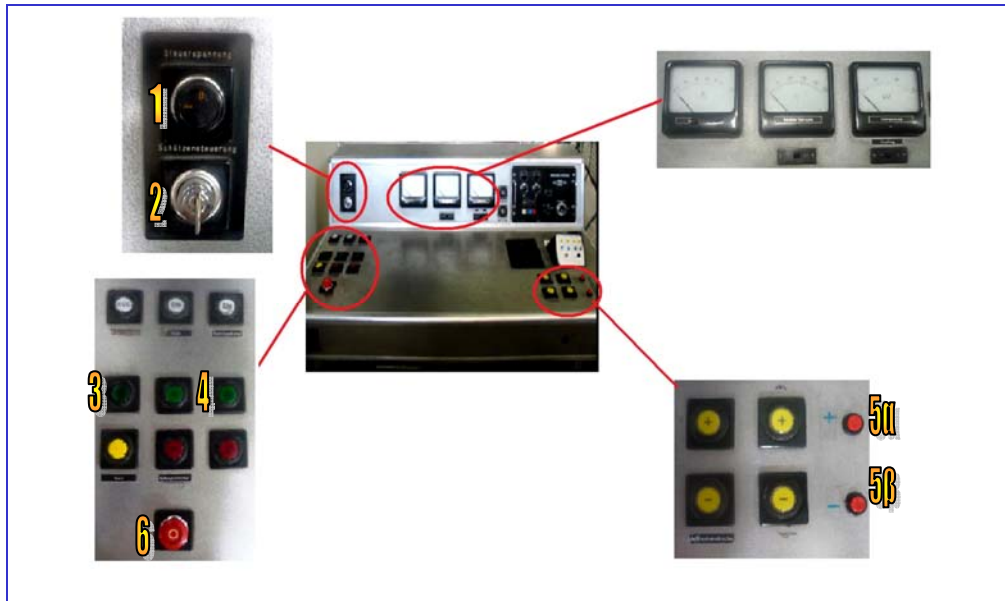
Μεγάλη σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο γειώνεται η γεννήτρια. Η γείωση αυτή πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατό πλησιέστερα στο δοκίμιο και στα στοιχεία R_1 και C_1 . Χρησιμοποιείται ειδικό ηλεκτρόδιο γείωσης, το οποίο δε συνδέεται με τη γείωση του δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος. Η ξεχωριστή αυτή προσγείωση λέγεται κρουστική γη και συνδέεται με το δίκτυο E.P. μέσω αντίστασης προστασίας (της τάξης των MΩ) και κατάλληλης ονομαστικής τάσης. Ο λόγος για τον οποίο γίνονται τα παραπάνω είναι ότι αν η γεννήτρια γειωνόταν πάνω στη γείωση του δικτύου, τότε λόγω των παράσιτων χωρητικοτήτων της γεννήτριας θα δημιουργούνταν βρόχοι μικρής αντίστασης στους οποίους θα επάγονταν υψηλές τάσεις μεγάλης συχνότητας, οι οποίες θα υπερτίθονταν στην κρουστική τάση και θα την παραμόρφωναν σημαντικά.

2.3.2 Τράπεζα χειρισμών StAG MWB 616

Οι χειρισμοί της όλης διάταξης, καθώς και η παρακολούθηση της λειτουργίας, είναι δυνατοί από την τράπεζα ελέγχου και χειρισμών, **Σχήμα 2.3**. Η τράπεζα περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

- Μεταγωγικό διακόπτη δύο θέσεων (1).
- Κλειδί (2)
- Buttons για να τίθεται υπό τάση και εκτός τάσης η γεννήτρια (3,4).
- Buttons μέσω των οποίων ρυθμίζεται η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή M_1 (5α, 5β).

- Αμπερόμετρο, βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης στο δευτερεύον του M_1 και βολτόμετρο για τη μέτρηση της υψηλής συνεχούς τάσης υπό την οποία φορτίζεται ο πυκνωτής κρούσης.
- Διακόπτη ταχείας θέσεως εκτός τάσης σε περίπτωση κινδύνου (6) και ηλεκτρονόμος υπερεντάσεως.



Σχήμα 2.3 Τράπεζα ελέγχου και χειρισμών

2.3.3 Σταθεροποιητής τάσης *Wechselspannungs-stabilisator 3kW*

Ο χρησιμοποιούμενος σταθεροποιητής 3kW, εξασφαλίζει ότι για τη μεταβολή της τάσης του δικτύου εντός των ορίων $230V \pm 10\%V$, η τάση στην έξοδο του θα έχει μικρή διακύμανση $230V \pm 0,5\%V$ (μεταξύ 228,9 και 231,1V).



Σχήμα 2.4 Σταθεροποιητής τάσης

2.3.4 Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner WS-30 [2]

Τα διαφορικά probe είναι συσκευές με τις οποίες οι παλμογράφοι μπορούν να καταγράψουν αρκετά υψηλές τιμές τάσεων, που μπορεί να εμφανιστούν στα κυκλώματα. Έτσι λοιπόν, εκτείνεται η περιοχή μέτρησης των παλμογράφων στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, στους αναστροφείς, στους ελέγχους ταχύτητας των μηχανών και σε αρκετές άλλες εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή φαίνονται στο παρακάτω **Πίνακα 2.2**, ενώ στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζεται το όργανο.

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά του διαφορικού καταμεριστή

Εξασθένιση	1:100/1000
Εύρος ζώνης	DC - 50MHz (-3db)
Ακρίβεια	$\pm 2\%$
Σύνθετη αντίσταση εισόδου	10M Ω /7pF ως προς γη
Τάση εισόδου	
Διαφορικό εύρος	$\pm 700V(DC+ Peak AC)$ ή 500Vrms για 1/100 $\pm 7000V(DC+ Peak AC)$ ή 5000Vrms για 1/1000
Μέγιστη τάση	$\pm 7000V(DC+ Peak AC)$ ή 2500Vrms για 1/100 και 1/1000 $\pm 7000V(DC+ Peak AC)$ ή 5000Vrms για 1/100 και 1/1000
Τάση εξόδου	
Μέγιστο πλάτος	$\pm 7V$ (μέσα σε 50k Ω ή περισσότερο)



Σχήμα 2.5 Διαφορικός καταμεριστής MD200 Schaffner

2.3.5 Αμπεροτσιμπίδα Pearson

Η αμπεροτσιμπίδα (Current Monitor) που χρησιμοποιήσαμε στη πειραματική μας διάταξη για να μετρήσουμε το ρεύμα που διέρρεε το κύκλωμά μας είναι η Current Monitor Pearson Model 8260, με λόγο μετασχηματισμού 0,002V/A και φαίνεται στο **Σχήμα 2.6**.



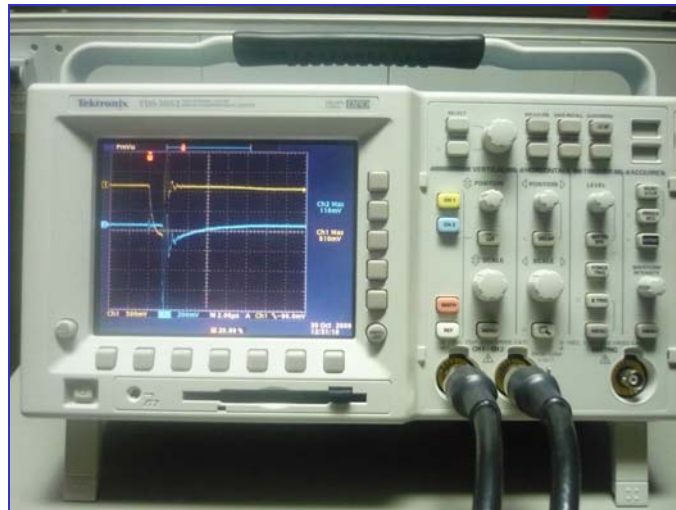
Σχήμα 2.6 Αμπεροτσιμπίδα

2.3.6 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

Ο παλμογράφος [3] αυτός, που είναι ένα από τα μοντέλα της Tektronix, λειτουργεί με εύρος ζώνης στα 500MHz, διαθέτει 2 κανάλια, οθόνη διαστάσεως 6 in (165mm) και ανάλυσης 640 × 480 και διαθέτει οδηγό δισκέτας (3,5'), για την αποθήκευση των μετρήσεων. Ο TDS 3052 παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.7**, ενώ τα χαρακτηριστικά του στον **Πίνακα 2.3** που ακολουθεί.

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά παλμογράφου

Κανάλια εισόδου	2
Εύρος ζώνης	500MHz, 5mV/div έως 1V/div
Χρόνος ανόδου	0,7ns
Ακρίβεια DC κέρδους	± 2%
Ζεύξη εισόδου	DC, AC ή GND
Αντίσταση εισόδου	1MΩ ± 1% παράλληλα με 13pF
Ευαισθησία εισόδου στα 50Ω	1mV/div έως 1V/div
Κάθετη ανάλυση	9 bit ανάλυση, ξεχωριστή για κάθε κανάλι
Μέγιστη τάση εισόδου, 50Ω	5 Vrms με κορυφές ≤ ± 30
Ταχύτητα δειγματοληψίας	100 S/s έως 5 GS/s



Σχήμα 2.7 Παλμογράφος Tektronix TDS 3052

2.3.7 Ομοαξονικά καλώδια

Για τη σύνδεση της πειραματικής διάταξης με τα κανάλια (Ch1 και Ch2), του παλμογράφου χρησιμοποιήσαμε ομοαξονικά καλώδια με χαρακτηριστικά [4], που φαίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 2.4**.

Πίνακας 2.4 Χαρακτηριστικά ομοαξονικού καλωδίου

Εσωτερικός αγωγός	Πλεγμένος χαλκός, $7 \times 1.0\text{mm}$
Διάμετρος εσωτερικού αγωγού	2.85mm
Διηλεκτρικό	Χαμηλής απώλειας μείγματος PE
Διάμετρος διηλεκτρικού	7,25mm
Εξωτερικός αγωγός 1	Χάλκινο έλασμα, με PE επικάλυψη
Θωράκιση	100%
Εξωτερικός αγωγός 2	Ανάμιξη χαλκού 72%
Περίβλημα	Μαύρο PVC, υν-αντίστασης
Εξωτερική διάμετρος	10.2 mm
Σύνθετη αντίσταση	50hm
Χωρητικότητα	78pF/m
$F_{\max}$	6GHz
DC-αντίσταση κεντρικού αγωγού	3.3Ωhm/km
DC-αντίσταση εξωτερικού αγωγού	8.4Ωhm/km
Εξασθένηση 1GHz/100m	14.2dB
Εξασθένηση 1GHz/100ft	4.33dB

2.3.8 Θερμόμετρο–Υγρόμετρο

Για τη καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών (υγρασίας και θερμοκρασίας) κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε το υγρόμετρο - θερμόμετρο TESTO 625, το οποίο φαίνεται στο **Σχήμα 2.8**.



Σχήμα 2.8 Θερμόμετρο–υγρόμετρο

2.4 Μετρήσεις

2.4.1 Προετοιμασία χώματος

Κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας επεξεργαστήκαμε δύο δείγματα χώματος (**Σχήματα 2.9-2.10**)

Αρχικά ζεστάναμε τα δείγματά μας σε φούρνο στους 100°C, έτσι ώστε να επιτύχουμε τη ξήρανση τους. Εν συνεχεία, κοσκινίσαμε τα δείγματά μας για να τα καθαρίσουμε από τις περιττές προσμίξεις και για να επιτευχθεί ομοιογένεια. Για να επιτύχουμε κάθε φορά τα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας του δείγματός μας (0%, 5% και 10%) προσδίδαμε τόση ποσότητα απιονισμένου νερού όση ήταν η αναλογία του ποσοστού υγρασίας ως προς το βάρος του ξηρού χώματος και στη συνέχεια ανακατεύαμε το μείγμα προκειμένου να επιτύχουμε την ομοιόμορφη κατανομή του νερού στο χώμα (**Σχήμα 2.11**).



Σχήμα 2.9 Δείγμα χώματος Α



Σχήμα 2.10 Δείγμα χώματος Β



Σχήμα 2.11 Προετοιμασία δοκιμίου

2.4.2 Δοκίμιο

Τα δείγματα χώματος που χρησιμοποιήσαμε τοποθετήθηκαν εντός πλαστικού κυλίνδρου (από PVC) ανάμεσα σε δύο χάλκινα ηλεκτρόδια τα οποία ήταν σε μορφή κυκλικών πλακών και τοποθετημένα πάντα σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους (7cm) έτσι ώστε να εφαρμόζεται στο χώμα ηλεκτρικό πεδίο σταθερού μέτρου (**Σχήμα 2.12**). Μετά την τοποθέτηση του δείγματος στο δοχείο, βάρος 20kgr τοποθετούμενο πάνω στο χώμα συνέβαλε στην ομοιόμορφη συμπίεση του χώματος και στην καλή επαφή του άνω ηλεκτροδίου με το χώμα έτσι ώστε να μην επηρεάζεται πολύ από τις τοπικές ανωμαλίες στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Στον **Πίνακα 2.5** δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις διαστάσεις του κυλίνδρου, καθώς και των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 2.12 Κάτοψη δοκιμίου

Πίνακας 2.5 Διαστάσεις Κυλίνδρου και Ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων

Κύλινδρος	Διάμετρος Κυλίνδρου		Διαστάσεις πλακών
	Εσωτερική $D_1(cm)$	Εξωτερική $D_1'(cm)$	Απόσταση πλακών $H_1 (cm)$
A	19.2	20.4	7

Για διαφορετικές τιμές υγρασίας του δοκιμίου έγιναν μετρήσεις τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης.

2.4.3 Διαδικασία μέτρησης

Τα βήματα που ακολουθήσαμε για να συνδέσουμε τα τμήματα της πειραματικής μας διάταξη και εν συνεχεία να τη θέσουμε σε λειτουργία για να πάρουμε τις πειραματικές μας μετρήσεις είναι τα ακόλουθα:

1. Συνδέουμε το διαφορικό καταμεριστή και την αμπεροτσιμπίδα στο Ch1 και Ch2 του παλμογράφου, αντίστοιχα.
2. Αφού συνδέσουμε στη διάταξη το διαφορικό καταμεριστή και το βάλουμε στη τροφοδοσία, ελέγχουμε ότι λόγος είναι στο 100/1 και το ανοίγουμε.
3. Ελέγχουμε ότι όλες οι γειώσεις είναι σωστά συνδεδεμένες και τυλίγουμε τα καλώδια με αλουμινόχαρτο για περιορισμό παρασίτων.
4. Τοποθετούμε δισκέτα στον παλμογράφο για την αποθήκευση των μετρήσεων.
5. Ανοίγουμε το διακόπτη ασφαλείας στο κλωβό Faraday, θέτουμε σε λειτουργία το παλμογράφο και τον ρυθμίζουμε (πολικότητα, κλίμακα, άξονες, αρχή χρόνων, 'single sequence'), έτσι ώστε να μπορεί να καταγράψει τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος του δοκιμίου.
6. Ελέγχουμε ότι ο γειωτής δεν ακουμπάει τη διάταξη.
7. Θέτουμε σε λειτουργία το σταθεροποιητή τάσης (διακόπτης **ON**).
8. Ανοίγουμε την τράπεζα χειρισμών ακολουθώντας τα εξής βήματα:
 - 8.1 Ανοίγουμε το μεταγωγικό διακόπτη δύο θέσεων (O, I).
 - 8.2 Γυρίζουμε το κλειδί.
9. Οπλίζουμε τη τράπεζα πατώντας διαδοχικά τα button (3) και (4) (**Σχήμα 2.13**).και αυξάνουμε την τάση με το Variac
10. Όταν διασπαστεί το διάκενο του σπινθηριστή (**Σχήμα 2.14**) αμέσως πατάμε το button (6) της τράπεζας χειρισμών για να αποκόψουμε τελείως την εφαρμοζόμενη τάση.
11. Πατάμε το button (3) και καταγράφουμε την τάση από το βολτόμετρο της τράπεζας χειρισμών για λόγους ταυτοποίησης και ελέγχου (**Σχήμα 2.15**).

12. Μειώνουμε την τάση με το Variac (5β) μέχρι να μηδενιστεί εντελώς (**Σχήμα 2.16**).
13. Πατάμε το button stop της τράπεζας χειρισμών (**Σχήματα 2.17, 2.18**).
14. Αποθηκεύουμε τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος που καταγράφηκαν στον παλμογράφο (**Σχήμα 2.19**) καθώς και τα σημεία που τις αποτελούν για να τα επεξεργαστούμε αργότερα στη Matlab.
15. Γειώνουμε τη διάταξη, απομακρύνουμε το γειωτή από αυτή και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 9-15 (**Σχήματα 2.20, 2.21**).

Μετά το πέρας των μετρήσεων και την καταγραφή τους αποσυνδέουμε τη πειραματική μας διάταξη πραγματοποιώντας τα εξής βήματα:

1. Γειώνουμε τη διάταξη.
2. Θέτουμε εκτός λειτουργίας τον παλμογράφο και τον αποσυνδέουμε από την τροφοδοσία.
3. Αποσυνδέουμε τη τράπεζα όπως έχουμε ακολουθώντας τα εξής βήματα:
 - 3.1 Γυρίζουμε το κλειδί (2).
 - 3.2 Στρέφουμε το μεταγωγικό διακόπτη στη θέση “Ο” (1).
4. Κλείνουμε το σταθεροποιητή τάσης (διακόπτης **OFF**).
5. Αφού θέσουμε εκτός λειτουργίας τον διαφορικό καταμεριστή, τον αποσυνδέουμε τόσο από τη τροφοδοσία όσο και από το κύκλωμα.



Σχήμα 2.13 Οπλισμός τράπεζας



Σχήμα 2.14 Διάσπαση διακένου σπινθηριστή.



Σχήμα 2.15 Βολτόμετρο τράπεζας χειρισμών.



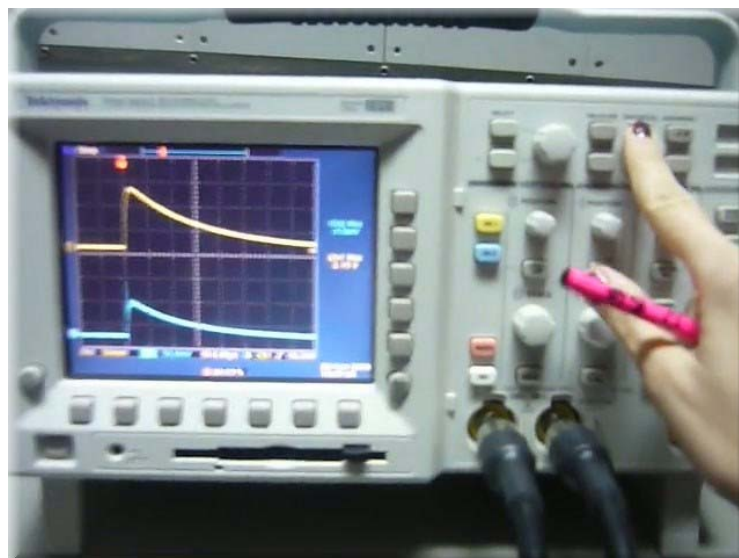
Σχήμα 2.16 Μείωση τάσης μέσω Variac



Σχήμα 2.17 Διακόπτης ταχείας θέσεως-πριν την ενεργοποίηση του.



Σχήμα 2.18 Ενεργοποίηση διακόπτη ταχείας θέσεως-αποκοπής τάσης.



Σχήμα 2.19 Αποθήκευση κυματομορφών σε δισκέτα.



Σχήμα 2.20 Γειωτής



Σχήμα 2.21 Γείωση διάταξης

Βιβλιογραφία

- [1] Δήμητρα Σαμαρά, «Πειραματική μελέτη του ιονισμού του εδάφους», Διπλωματική Εργασία.
- [2] *Differential Probe, MD 200 User Manual, Version 1.01 Apr2003.*
- [3] *Digital Phosphor Oscilloscopes, Tektronix TDS3000 Series, User Manual.*
- [4] www.ssb.de

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Αβεβαιότητα-Προσδιορισμός τάσης διάσπασης

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής απαραίτητες για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, ο ορισμός της αβεβαιότητας και η μέθοδος προσδιορισμού της, καθώς επίσης και η μεθοδολογία υπολογισμού της τάσης διάσπασης.

3.2 Ποιοτικός χαρακτηρισμός συστημάτων και μεθόδων μέτρησης

3.2.1 Εισαγωγικά

Τα σφάλματα και η ποιότητα μέτρησης σχετίζονται με τη συμπεριφορά συγκεκριμένων μετρητικών διατάξεων και διαδικασιών, σε συγκεκριμένες συνθήκες χρήσης.



Σχήμα 3.1 Σχηματική δομή μετρητικών διατάξεων

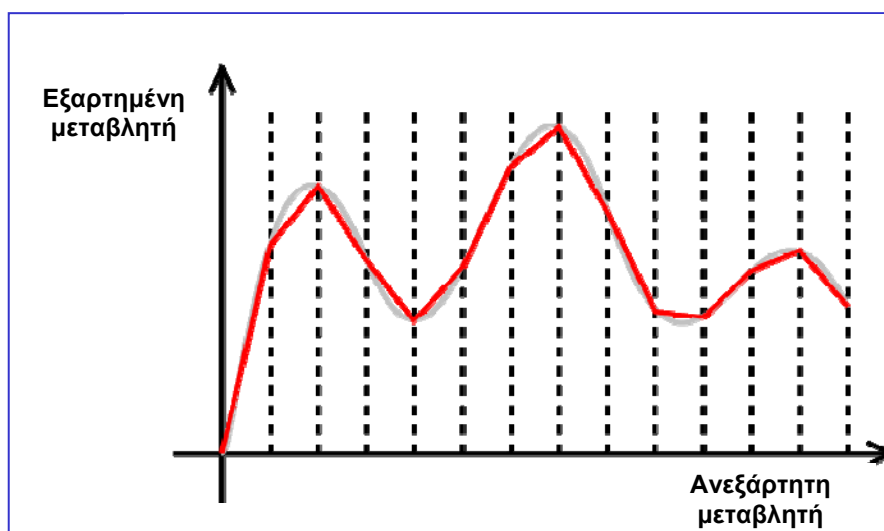
Ένα όργανο μέτρησης αποτελεί στην πράξη λειτουργικό σύνολο από ένα ή περισσότερα διακριτά στοιχεία, με σκοπό την παραγωγή μιας ένδειξης, η οποία είναι συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Βασικό στοιχείο του συστήματος είναι ο αισθητήρας που δέχεται την επίδραση του μετρούμενου μεγέθους και μεταφράζει την επίδραση αυτή σε άμεσα ή έμμεσα αναγνώσιμη πληροφορία. Άλλα συνήθη στοιχεία είναι ο μετατροπέας ή διαμορφωτής σήματος, ο οποίος μετατρέπει την πληροφορία στην έξοδο του αισθητήρα σε μια άλλη πληροφορία πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη, ένα στοιχείο αναλογικής ή ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και ένα στοιχείο απεικόνισης της μέτρησης.

Τα όργανα μέτρησης είναι ευρέως ταξινομημένα σε: [1]

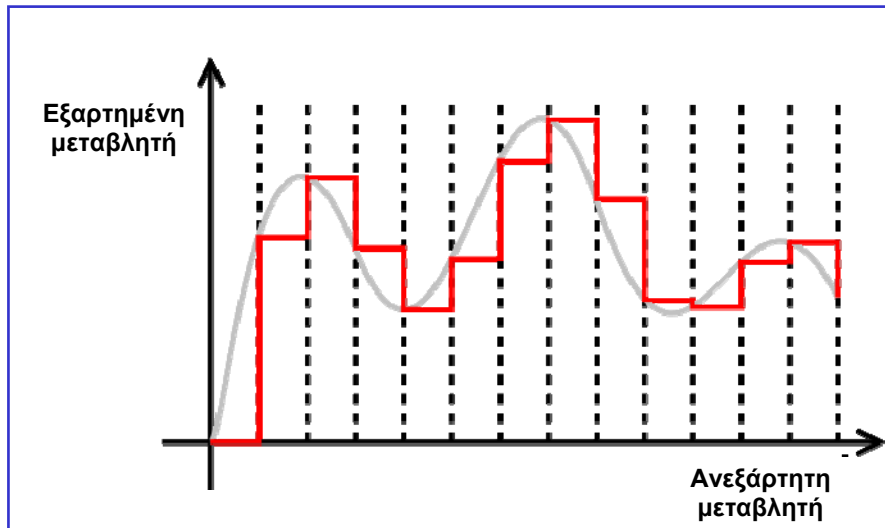
- **Αναλογικά / ψηφιακά:** Αν το όργανο δίνει έξοδο που μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο όσο η μετρούμενη ποσότητα επίσης μεταβάλλεται, λαμβάνοντας άπειρο αριθμό τιμών ονομάζεται αναλογικό, ενώ αν η έξοδος μεταβάλλεται σε διακριτά βήματα λαμβάνοντας πεπερασμένες τιμές το όργανο ονομάζεται ψηφιακό (**Σχήματα 3.2-3.3**).
- **Μηδενισμού / απόκλισης:** Τα όργανα στα οποία η μηδενική ένδειξη οδηγεί στον προσδιορισμό του μετρούμενου μεγέθους ονομάζονται όργανα μηδενισμού (π.χ. ποτενσιόμετρο). Η μηδενική κατάσταση εξαρτάται από κάποιες άλλες γνωστές καταστάσεις. Στα όργανα μηδενισμού γίνεται μια προσπάθεια διατήρησης της εκτροπής στο μηδέν από μια κατάλληλη δύναμη αντίθετη από αυτή που παράγεται από το μετρούμενο μέγεθος. Έχουν μεγάλη ευαισθησία και ακρίβεια γεγονός που τα καθιστά ακατάλληλα για δυναμικές και γρήγορες μετρήσεις. Τα όργανα στα οποία το μετρούμενο μέγεθος παράγει κάποια δύναμη εξ' αιτίας της οποίας ο δείκτης εκτρέπεται ονομάζονται όργανα απόκλισης (π.χ. αμπερόμετρο ελατηρίου). Αυτά τα όργανα ενδείκνυνται για δυναμικές μετρήσεις εξαιτίας της μικρής τους ευαισθησίας και της μικρής τους ακρίβειας (**Σχήματα 3.4-3.5**).
- **Ενεργητικά / παθητικά:** Τα όργανα των οποίων η ένδειξη παράγεται κατευθείαν από το μετρούμενο μέγεθος ονομάζονται παθητικά (π.χ. βολτόμετρο, αμπερόμετρο) ενώ τα όργανα στα οποία το μετρούμενο μέγεθος ενεργοποιεί μια εξωτερική πηγή παροχής ισχύος που παράγει

τη μέτρηση ονομάζονται ενεργητικά (π.χ: μετρητής στάθμης υγρού, μετρητής ροής). Στα ενεργητικά όργανα μέτρησης χρειάζεται εξωτερική πηγή παροχής ενέργειας ενώ στα παθητικά όχι. Τη μεγαλύτερη ακρίβεια έχουν τα ενεργητικά όργανα μέτρησης των οποίων όμως ο σχεδιασμός είναι περίπλοκος (**Σχήματα 3.6-3.7**).

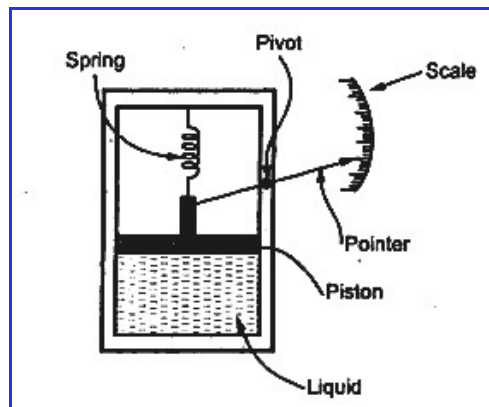
Στην προσπάθεια για εναρμόνιση σε διεθνές επίπεδο των εννοιών στον τομέα των μετρήσεων χρησιμοποιείται μια τυποποιημένη ορολογία και κωδικοποίηση του χαρακτηρισμού οργάνων, συστημάτων και υλικών μέτρησης. Οι κυριότεροι όροι είναι : **όργανο μέτρησης, σύστημα μέτρησης** (σύνολο οργάνων συνδεδεμένων μεταξύ τους σε ένα ενιαίο σύνολο), **υλικά μέτρησης και υλικά αναφοράς** (υλικά για τα οποία οι τιμές μιας ή περισσότερων ιδιοτήτων είναι ομογενείς και καλά γνωστές, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακρίβωση μιας συσκευής, για την αξιολόγηση μιας μεθόδου μέτρησης ή για να αποδοθούν τιμές σε άλλα υλικά), **πιστοποιημένο υλικό αναφοράς** (υλικό αναφοράς συνοδευόμενο από ένα πιστοποιητικό, μία ή περισσότερες ιδιότητες του οποίου είναι κατάλληλα πιστοποιημένες), **πρωτεύον πρότυπο, διεθνές πρότυπο, εθνικό πρότυπο, πρότυπα αναφοράς, πρότυπο μεταφοράς** (χρησιμοποιείται ως ενδιάμεσο για συγκρίσεις μεταξύ προτύπων), **μετακινούμενο πρότυπο** (προορίζεται για μεταφορά από μια τοποθεσία σε μια άλλη), **πρότυπο εργασίας** [2].



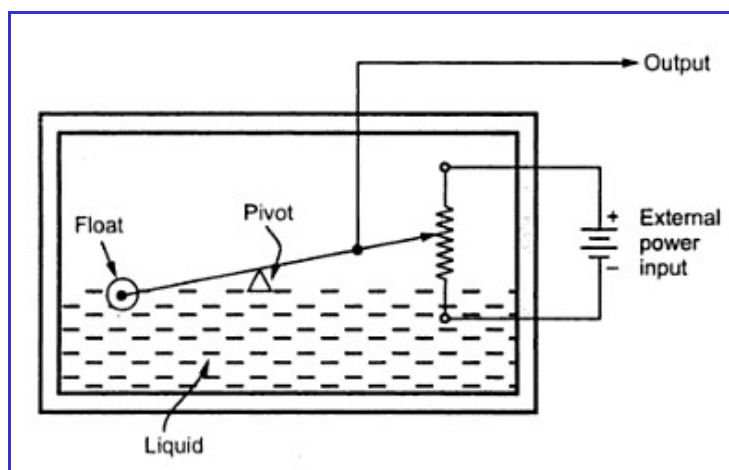
Σχήμα 3.2 Αναλογικό σήμα [3]



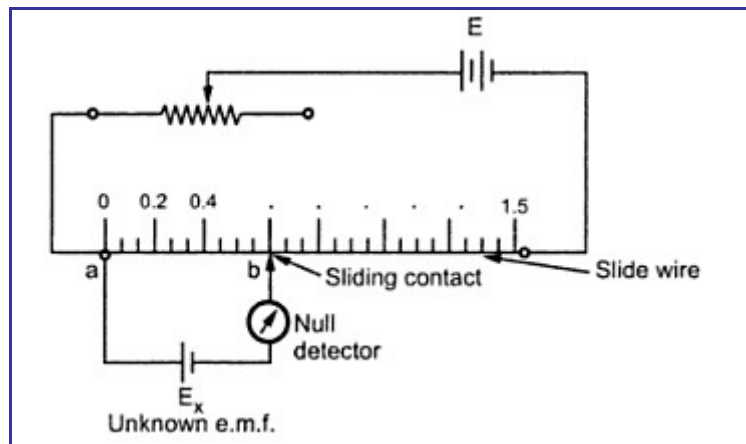
Σχήμα 3.3 Ψηφιακό σήμα [3]



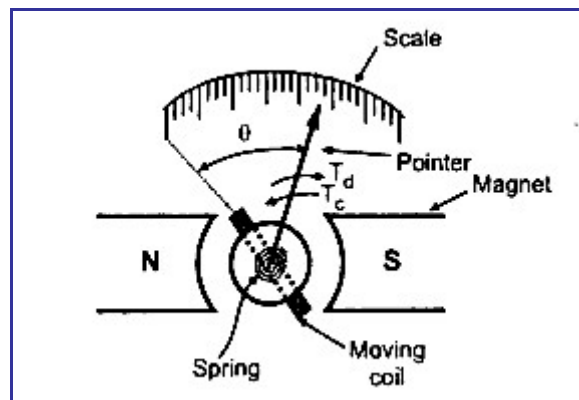
Σχήμα 3.4 Παθητικό όργανο-μετρητής πίεσης [1]



Σχήμα 3.5 Ενεργητικό όργανο-μετρητής στάθμης υγρού [1]



Σχήμα 3.6 Όργανο μηδενισμού-ποτενσιόμετρο [1]



Σχήμα 3.7 Όργανο απόκλισης-αμπερόμετρο ελατηρίου [1]

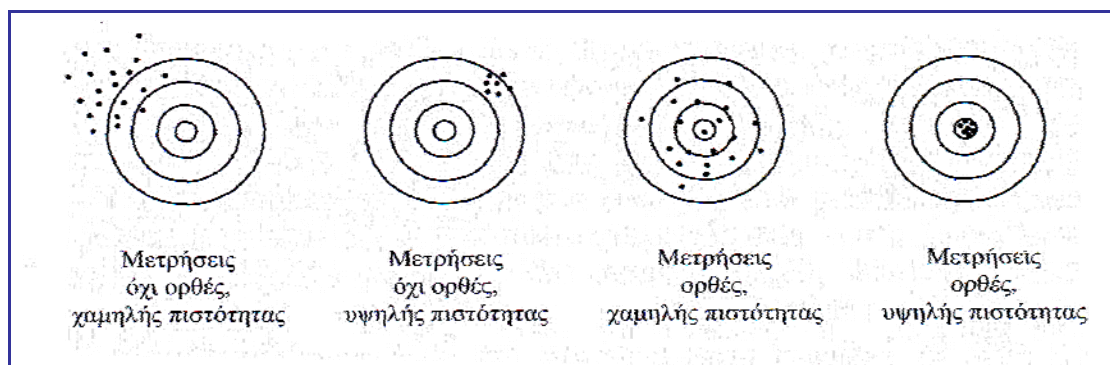
3.2.2 Στατικός χαρακτηρισμός οργάνων μέτρησης

Τα στατικά χαρακτηριστικά αναφέρονται στην τεκμηρίωση που συνοδεύει το όργανο και λαμβάνονται υπόψη όταν πρόκειται να κριθεί η καταλληλότητα του για μια συγκεκριμένη χρήση. Ο στατικός χαρακτηρισμός ισχύει μόνο όταν η συσκευή χρησιμοποιείται ικανοποιώντας τις προδιαγραφόμενες τυπικές απαιτήσεις διακρίβωσης. Τα βασικά στατικά χαρακτηριστικά [2] είναι:

- **Ορθότητα:** Αποτελεί μέτρο του «πόσο ορθά μετράει» το όργανο και ορίζεται ως το μισό του διαστήματος που περιέχει την ένδειξη του οργάνου και μέσα στο οποίο αναμένεται να περιέχεται η ορθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η ορθότητα χαρακτηρίζει τη

μετρολογική ποιότητα του οργάνου και όχι την ποιότητα μιας συγκεκριμένης μέτρησης.

- **Ανοχή:** Ορίζει το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα στην τιμή μιας μέτρησης ή ακόμα τη μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση ενός μεγέθους από μια προδιαγεγραμμένη τιμή.
- **Πιστότητα:** Αποτελεί χαρακτηριστικό ενός οργάνου ή μιας μεθόδου μέτρησης και όχι του αποτελέσματος της μέτρησης. Η πιστότητα περιγράφει ποιοτικά και όχι ποσοτικά τη διασπορά των ενδείξεων ενός οργάνου ή των αποτελεσμάτων μιας διαδικασίας μέτρησης για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η σχέση πιστότητας και ορθότητας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.8 Πιστότητα και ορθότητα [4]

- **Επαναληψιμότητα (ή πιστότητα επαναληψιμότητας):** Περιγράφει την εγγύτητα των αποτελεσμάτων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, όταν εφαρμόζεται για μια σύντομη χρονική περίοδο ή ίδια τιμή στην είσοδο του οργάνου, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερές τις συνθήκες μέτρησης.
- **Αναπαραγωγιμότητα (ή πιστότητα αναπαραγωγιμότητας):** Περιγράφει την εγγύτητα των ενδείξεων για το ίδιο μετρούμενο μέγεθος, αλλά με διαφορετικά όργανα ή με μεταβολές στις συνθήκες μέτρησης.
- **Διακριτότητα:** Ορίζεται ως η μικρότερη μεταβολή του μετρούμενου μεγέθους η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια ανιχνεύσιμη μεταβολή της ένδειξης ενός οργάνου.

- **Εύρος:** Αντιπροσωπεύει την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους.
- **Μετατόπιση (ή συστηματικό σφάλμα) :** Αντιστοιχεί σε ένα σφάλμα το οποίο υφίσταται σε όλο το εύρος μέτρησης ενός οργάνου.
- **Ολίσθηση:** Περιγράφει την επίδραση της μεταβολής των περιβαλλοντικών συνθηκών τόσο σε μια συγκεκριμένη ένδειξη όσο και στην ευαισθησία ενός οργάνου.
- **Γραμμικότητα:** Αναφέρεται στη γραμμική μεταβολή της εξόδου ενός οργάνου ως συνάρτηση του μετρούμενου μεγέθους.
- **Ευαισθησία:** Ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής των ενδείξεων λόγω μεταβολής του μετρούμενου μεγέθους προς τη μεταβολή αυτή του μετρούμενου μεγέθους.
- **Υστέρηση:** Χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά των οργάνων, η ένδειξη των οποίων για την ίδια τιμή του μετρούμενου μεγέθους είναι διαφορετική, ανάλογα με το αν η μέτρηση εντάσσεται σε μια αλληλουχία σταδιακά αυξανόμενων ή σταδιακά μειούμενων τιμών.

3.2.3 Χαρακτηρισμός και επικύρωση μεθόδων μέτρησης

Σε αντίθεση με το όργανο μέτρησης, όπου η διαδικασία μέτρησης είναι προκαθορισμένη, η μέθοδος μέτρησης υπόκειται σε περισσότερο και λιγότερο ελεγμένες παραμέτρους επιρροής που επιδρούν στο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό, σημαντική πηγή πληροφορίας για την εκτίμηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων αποτελεί η επικύρωση των χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Ο όρος **επικύρωση μεθόδου** αναφέρεται στη διαδικασία αξιολόγησης της καταλληλότητας μιας μεθόδου μέτρησης για το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιείται, και στην ποσοτική εκτίμηση των επιδόσεών της, ως συνάρτηση των παραγόντων που επιδρούν στην αβεβαιότητα του τελικού αποτελέσματος. Η επικύρωση αποσκοπεί στον προσδιορισμό ορισμένων παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον υπολογισμό αβεβαιότητων στο αποτέλεσμα. Οι κυριότερες από τις παραμέτρους αυτές είναι :

- Η **επαναληψιμότητα** της μεθόδου, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, με χρήση του ίδιου εξοπλισμού.
- Η **αναπαραγωγιμότητα** της μεθόδου, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, με χρήση του ίδιου υλικού.
- Η **ενδιάμεση πιστότητα**, εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων, όταν μεταβάλλονται μία ή περισσότερες παράμετροι επιρροής.
- Η **γραμμικότητα** και το συστηματικό **σφάλμα**
- Το **όριο ανίχνευσης**, το οποίο προσδιορίζει τα όρια αποτελεσματικότητας της μεθόδου, πέρα από τα οποία η μέθοδος θεωρείται αναποτελεσματική.
- Η **ευστάθεια**, η οποία εκφράζει τις μεταβολές στην απόκριση μιας μεθόδου όταν μεταβάλλονται μία ή περισσότερες παράμετροι επιρροής[12].

3.3 Βασικές έννοιες πιθανοτήτων και στατιστικής

3.3.1 Εισαγωγικά

Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένο, αλλά εξαρτάται από πολλές μη ελεγχόμενες επιδράσεις (ικανότητα του μετρολόγου, επίδραση περιβαλλοντικών συνθηκών, ασταθής συμπεριφορά του οργάνου ή του μετρούμενου μεγέθους κλπ.). Επομένως, το επιζητούμενο αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί **στοχαστική μεταβλητή** και το αποτέλεσμα της ως προερχόμενο από ένα πιθανοσύνολο τυχαία διαμορφούμενο από τις μη ελεγχόμενες επιδράσεις. Η **στοχαστική προσέγγιση** της μέτρησης θεωρεί ότι, μη μπορώντας να ελέγξουμε τις επιρροές που διαμορφώνουν το εκάστοτε αποτέλεσμα, τα διάφορα αποτελέσματα αποτελούν δυνητικά συμβάντα μιας τυχαίας πειραματικής διαδικασίας [3]. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση εννοιών στατιστικής και πιθανοτήτων, που θα δώσουν απάντηση στο ερώτημα: ποια είναι η πιθανότητα η αποσπασματική πληροφορία που διαθέτουμε (δηλαδή η μέτρηση-παρατήρηση) για μια πιο σύνθετη πραγματικότητα (δηλαδή την αληθή τιμή) να μην αποτελεί σύμπτωση, αλλά να δίνει πληροφορίες για την

πραγματικότητα του εξεταζόμενου φαινομένου, ή αλλιώς, με βάση το αποτέλεσμα της μέτρησης και την κατανομή την οποία ακολουθεί το αποτέλεσμα αυτό, ποια η πιθανότητα η αληθής τιμή να βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Το πραγματικό ζητούμενο μιας μέτρησης δεν είναι επομένως μια απλή τιμή, αλλά η διαμόρφωση μιας ρεαλιστικής άποψης για τη στοχαστική συμπεριφορά του ίδιου αποτελέσματος, δηλαδή για τη συνάρτηση κατανομής που περιγράφει τη διαδικασία [2].

3.3.2 Ορισμοί στατιστικών εννοιών [6]

- **Τυχαία μεταβλητή** : Ο όρος τυχαία μεταβλητή χρησιμοποιείται για να δηλώσει έναν κανόνα σύμφωνα με τον οποίο ένας πραγματικός αριθμός αντιστοιχεί σε κάθε δυνατό γεγονός ενός πειράματος. Αν ταυτοποιήσουμε τα πιθανά γεγονότα ενός πειράματος με τα σύμβολα λ_i και θεμελιώσουμε αυθαίρετα κάποιο τρόπο σύμφωνα με τον οποίο θα αντιστοιχούμε πραγματικούς αριθμούς $X(\lambda_i)$ σε κάθε δυνατό γεγονός, ο κανόνας ή η συναρτησιακή σχέση που παριστάνεται με το σύμβολο X καλείται τυχαία μεταβλητή.
- **Συνάρτηση κατανομής πιθανότητας**: Ονομάζουμε συνάρτηση κατανομής πιθανότητας (σ.κ.π) της τυχαίας μεταβλητής X την:

$$F(x) = P(X \leq x), x \in R \quad (3.1)$$

Όταν $x_1 \leq x_2$ ισχύουν:

$$0 \leq F(x) \leq 1, F(-\infty) = 0, F(\infty) = 1, F(x_1) \leq F(x_2) \quad (3.2)$$

- **Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας**: Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π) ορίζεται ως:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (3.3)$$

Ισχύουν:

$$f(x) \geq 0, \forall x \quad (\alpha)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) = 1 \quad (\beta)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) \cdot dx \quad (\gamma) \quad (3.4)$$

$$P(x_1 \leq X \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \cdot dx \quad (\delta)$$

- **Αναμενόμενη τιμή (expectation):**

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) \cdot dx \quad (3.5)$$

- **Μεταβλητότητα (variance):** Η μεταβλητότητα μιας τυχαίας μεταβλητής x ορίζεται ως

$$V(x) = E(X - E(X))^2 = E(X)^2 - E^2(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(x))^2 f(x) \cdot dx \quad (3.6)$$

- **Τυπική απόκλιση (standard deviation):** Παράμετρος που χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών και ορίζεται ως η τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας:

$$\sigma = \sqrt{V(x)} \quad (3.7)$$

- **Συνδυασμένη συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων:** Στην περίπτωση δύο μεταβλητών η πληροφορία σχετικά με τις τιμές τους διατυπώνεται με την παρακάτω σχέση : $f(x,y) = f(x/y)f(x)$, όπου $f(x/y)$ αντιπροσωπεύει την υποθετική κατανομή πιθανοτήτων του Y με δεδομένη την τιμή x του X .
- **Συμμεταβλητότητα (covariance):** Αντίστοιχα με τη μεταβλητότητα, ορίζεται η συμμεταβλητότητα μεταξύ δύο μεγεθών X και Y :

$$\text{Cov}(X,Y) = E([X - E(X)][Y - E(Y)]) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E(X)][y - E(Y)] f(x,y) dx dy \quad (3.8)$$

- **Συσχετιζόμενα και ανεξάρτητα μεγέθη:** Τα μεγέθη X, Y καλούνται συσχετιζόμενα εάν η συμμεταβλητότητά τους είναι διάφορη του μηδενός, ενώ αντίθετα θεωρούνται ανεξάρτητα εάν η συνδυασμένη συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων τους ισούται με το γινόμενο των αντιστοιχών τους κατανομών : $f(x,y) = f(x)f(y)$. [4]

3.3.3 Βασικοί τύποι συναρτήσεων κατανομών πιθανοτήτων

3.3.3.1 Κανονική κατανομή

Το εύρος των εφαρμογών της κανονικής κατανομής εξηγείται από το ότι αντιστοιχεί στο ιδεατό θεωρητικό μοντέλο συμπεριφοράς μιας πραγματικά τυχαίας μεταβλητής. Μία τυχαία μεταβλητή ακολουθεί κανονική κατανομή με παραμέτρους μ, σ ($-\infty < \mu < +\infty, \sigma > 0$) όταν έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (3.9)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ειδική περίπτωση όπου $\mu=0$ και $\sigma=1$.

Με σκοπό την τυποποίηση και τη διευκόλυνση των υπολογισμών, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός $z = (x-\mu)/\sigma$ και η κατανομή πιθανοτήτων γράφεται :

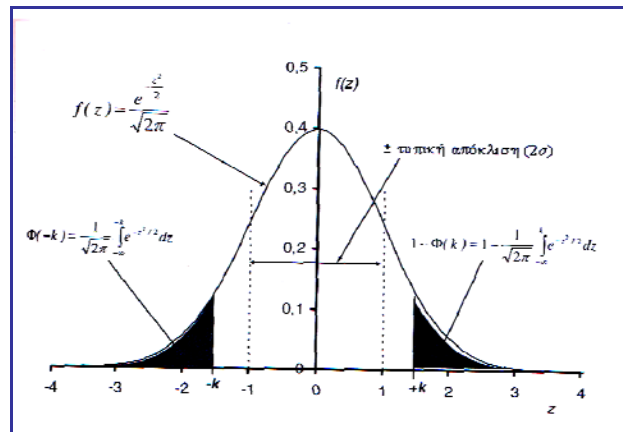
$$f(z) = \frac{e^{-\frac{z^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}} \quad (3.10)$$

Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του z είναι ίσες με 0 και 1 αντίστοιχα.

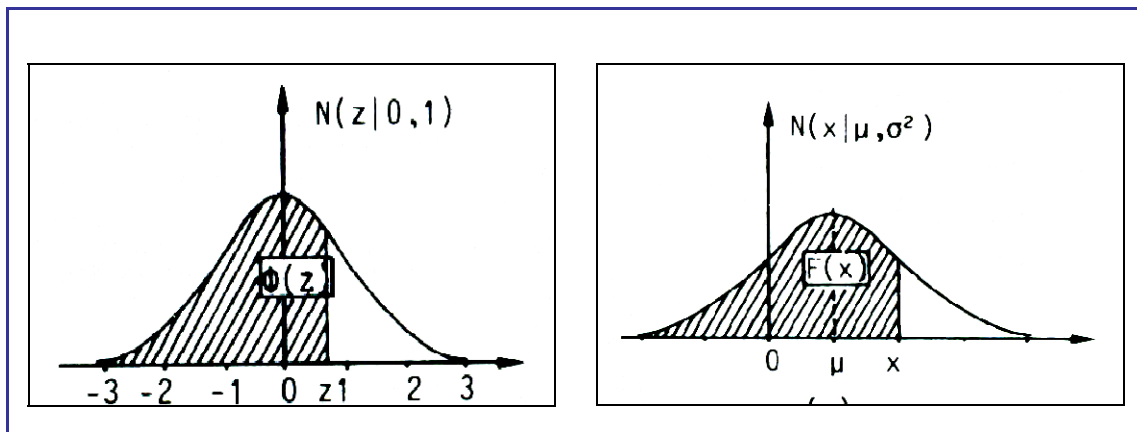
Έτσι $dx = \sigma dz$, και επομένως έχουμε :

$$F(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2\right) dx = \int_{-\infty}^{\frac{x_0-\mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \Phi\left(\frac{x_0-\mu}{\sigma}\right) \quad (3.11)$$

όπου Φ η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της τυποποιημένης κανονικής κατανομής $N(0,1)$.



Σχήμα 3.9 Τυπική κατανομή $f(z)$ με $\mu=0$ και $\sigma=1$ [4]



Σχήμα 3.10 Μετασχηματισμός κανονικής κατανομής με μέση τιμή μ και διακύμανση σ^2 σε κανονική κατανομή με $\mu=0$ και $\sigma=1$ [4]

Η πιθανότητα μια τιμή να περιέχεται σε ένα δεδομένο διάστημα $\Delta X = (x_a, x_b)$ υπολογίζεται από τη σχέση :

$$p = \int_{x_a}^{x_b} F(x)dx = \int_{z_a}^{z_b} f(z)dz = \Phi(z_b) - \Phi(z_a) \quad (3.12)$$

με $z_a=(x_a-\mu)/\sigma$ και $z_b=(x_b-\mu)/\sigma$. [6],[7].

3.3.3.2 Τραπεζοειδής κατανομή

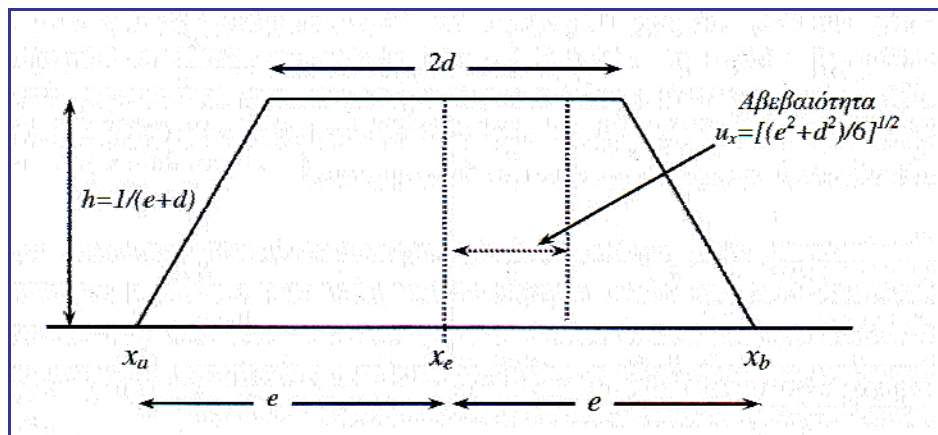
Η τραπεζοειδής κατανομή έχει ως υποπεριπτώσεις την ορθογώνια και την τριγωνική κατανομή. Οι κατανομές αυτές περιγράφουν μεγέθη για τα οποία γνωρίζουμε ότι η καλύτερη αναμενόμενη τιμή x_e περιέχεται σε ένα διάστημα της μορφής (x_a, x_b) ή $x_e \pm e$ με γραμμικά αυξανόμενη πιθανότητα, όσο απομακρυνόμαστε από τα άκρα του διαστήματος αυτού.

Δεδομένης της συμμετρίας, η αναμενόμενη τιμή είναι στο μέσο και προκύπτει από τη σχέση :

$$E(X) = x_e = (x_a + x_b) / 2 \quad (3.13)$$

Η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma = \sqrt{[V(X)]} = \sqrt{E(X)^2} = \sqrt{\frac{e^2 + d^2}{6}} \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.11 Τραπεζοειδής, ορθογώνια και τριγωνική κατανομή [4]

Η ορθογώνια κατανομή ($d=e$) περιγράφει τη στατιστική συμπεριφορά των τιμών ενός μεγέθους, για τις οποίες η μόνη διαθέσιμη πληροφορία συνίσταται

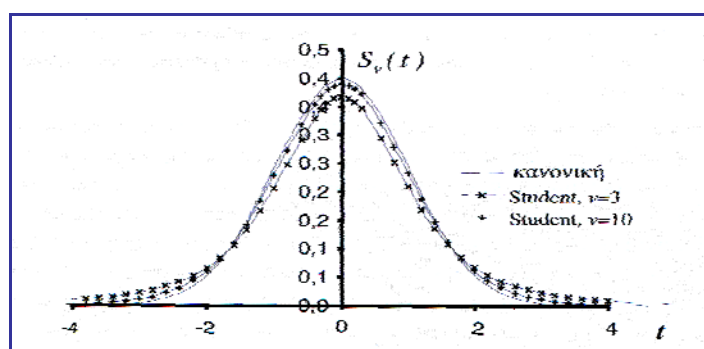
στο ότι η αληθής τιμή περιέχεται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Η τριγωνική κατανομή ($d=0$) έχει εφαρμογή, μεταξύ άλλων, σε μεγέθη εκφραζόμενα ως συνδυασμός άλλων, οι κατανομές των οποίων είναι ορθογώνιες [2].

3.3.3.3 Η κατανομή Student (t-distribution)

Η πρακτική σημασία της κατανομής Student έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, σχετικών με τη στοχαστική συμπεριφορά ενός μεγέθους, όταν είναι διαθέσιμες περιορισμένες μόνο πληροφορίες για το μέγεθος αυτό. Η συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων γράφεται :

$$S_v(t) = \frac{\Gamma((\nu+1)/2)}{\Gamma(\nu/2)\sqrt{\pi\nu}} \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2} \quad (3.15)$$

όπου Γ είναι η συνάρτηση gamma και ν ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας, ο οποίος αποτελεί μέτρο της πληρότητας της διαθέσιμης γνώσης σχετικά με την κατανομή.



Σχήμα 3.12 Κανονική κατανομή Student για διάφορους βαθμούς ελευθερίας [4]

Όταν εξετάζεται ένα δείγμα παρατηρήσεων x_i , $i=1, \dots, N$ ενός μεγέθους X , η κατανομή του οποίου θεωρείται κανονική με αναμενόμενη τιμή μ και μεταβλητότητα σ^2 , υπολογίζεται ο μέσος όρος $\bar{x}$ του δείγματος και η τυπική απόκλιση s και αποδεικνύεται ότι η μεταβλητή:

$$t = \frac{(\bar{x} - \mu)}{s/\sqrt{N}} = \frac{(\bar{x} - \mu)}{\sigma} \quad (3.16)$$

ακολουθεί κατανομή Student με $\nu = N-1$ βαθμούς ελευθερίας.

Η κατανομή Student της μεταβλητής αυτής επιτρέπει την εκτίμηση της πιθανότητας η διαφορά $\bar{x}-\mu$ να βρίσκεται σε συγκεκριμένα όρια, σχετιζόμενα με την τυπική απόκλιση σ της μέσης τιμής του δείγματος. Η εξάρτηση της κατανομής Student από τους βαθμούς ελευθερίας ν μπορεί να ερμηνευθεί ως εξάρτηση της ποιότητας της εκτίμησης του $\bar{x}$ από το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση αυτή.

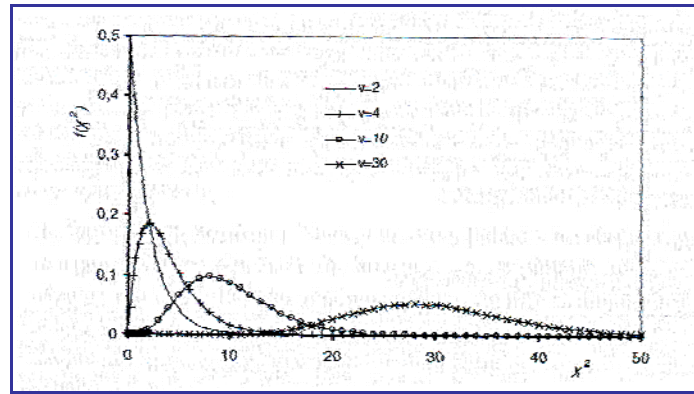
Όπως και στην περίπτωση της κανονικής κατανομής, οι τιμές $k_{p,\nu}$ (που ορίζουν ένα διάστημα $(-k_{p,\nu}, +k_{p,\nu})$ στο οποίο η πιθανότητα να περιέχεται το t είναι $p_{\nu,kt}$) για κάθε πιθανότητα $p_{\nu,kt}$ και για δεδομένο αριθμό βαθμών ελευθερίας ν δίνονται σε τυποποιημένους πίνακες της συνάρτησης Student. Η πιθανότητα να περιέχεται η μέση τιμή $\bar{x}$ ενός δείγματος τιμών στο διάστημα από $\mu - k_{p,\nu}s/\sqrt{N}$ έως $\mu + k_{p,\nu}s/\sqrt{N}$ είναι ίση με την πιθανότητα $p_{\nu,kt}$ να περιέχεται το t στο διάστημα $(-k_{p,\nu}, +k_{p,\nu})$ [2].

3.3.3.4 Η κατανομή χ^2 (Chi-square)

Σε αντίθεση με την κανονική κατανομή και την κατανομή Student που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέσης ή της πιθανότερης τιμής ενός μεγέθους, η κατανομή χ^2 χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του μεγέθους αυτού. Πρόκειται για μια μη συμμετρική κατανομή που δίνεται από τη σχέση :

$$f(x) = \frac{x^{\nu/2-1} e^{-x/2}}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)}, x > 0 \quad (3.17)$$

όπου ν είναι οι βαθμοί ελευθερίας της στοχαστικής μεταβλητής.



Σχήμα 3.13 Κατανομές Chi-square για τέσσερις βαθμούς ελευθερίας [4]

Η κατανομή περιγράφει τη συμπεριφορά του αθροίσματος χ^2 των τετραγώνων n τυπικών κανονικών κατανομών, όπου n εκφράζει τους βαθμούς ελευθερίας

του αθροίσματος αυτού : $\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^2$. Η πιθανότερη τιμή της κατανομής

είναι ίση με n και η μεταβλητότητά της ίση με $2n$. Εάν έχουμε ένα δείγμα μεγέθους N και τυπικής απόκλισης s μιας μεταβλητής, η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή τυπικής απόκλισης σ , η στοχαστική μεταβλητή

$\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$ ακολουθεί με τη σειρά της κατανομή Chi-square $v=N-1$

βαθμών ελευθερίας. Έτσι η πιθανότητα να περιέχεται η μεταβλητή

$\chi^2 = \frac{(N-1)s^2}{\sigma^2}$ σε ένα συγκεκριμένο διάστημα (l_1, l_2) είναι $p(l_1 < \chi^2 < l_2) = p_{l_1, v} - p_{l_2, v}$

και είναι ίση με την πιθανότητα $p(vs^2/l_2 < \sigma^2 < vs^2/l_1)$ να περιέχεται η

μεταβλητότητα σ^2 στο διάστημα $(vs^2/l_2, vs^2/l_1)$: $\frac{vs^2}{l_2} < \sigma^2 < \frac{vs^2}{l_1}$ [2].

3.4 Αβεβαιότητα μετρήσεων

3.4.1 Εισαγωγικά

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες έγινε επιτακτική η ανάγκη για

έναν κοινά αποδεκτό και έγκυρο **τρόπο «μέτρησης» της ποιότητας μέτρησης**, αφού έχει μεγάλη σημασία τα όργανα όχι μόνο να μετράνε σωστά, αλλά και να είναι γνωστό το πόσο σωστά μετράνε. Το ζητούμενο λοιπόν είναι η αποδοχή ενός ενιαίου μηχανισμού αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, δηλαδή της **αβεβαιότητας (uncertainty)** [2]

Κάθε μέτρηση, ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και εκτελεστεί, υπόκειται σε σφάλματα και επομένως το αποτέλεσμα μιας μέτρησης εμπεριέχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας. Με τον όρο αβεβαιότητα προσδιορίζεται το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης τιμής από το όργανο ($\pm$) μέσα στο οποίο βρίσκεται η «αληθινή» ή «πραγματική» τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Είναι φανερό ότι βασικό πρόβλημα της μετρολογίας είναι η εύρεση της «αληθινής» τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Παλαιότερα, η χρήση του όρου ακρίβεια προσδιόριζε τη μέγιστη απόκλιση της μετρούμενης τιμής από την «αληθινή», ως εάν η «αληθινή» τιμή να ήταν απολύτως γνωστή. Εάν αυτό ήταν αληθές, τα προβλήματα της μετρολογίας θα είχαν επιλυθεί. Αντί για αυτό προσπαθούμε να προσεγγίσουμε το «σύννεφο» που περιβάλλει την «αληθινή» τιμή με όρους στατιστικής [8].

Επομένως, σήμερα είναι κοινά αποδεκτό μια ποσοτική δήλωση σχετική με οποιοδήποτε μέγεθος δεν μπορεί να είναι πλήρης εάν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα της μέτρησης, μια αναφορά στην αβεβαιότητα που συνοδεύει το αποτέλεσμα αυτό. Το να συμπεριληφθεί η αβεβαιότητα στις πληροφορίες ποσοτικού προσδιορισμού ενός μεγέθους υπακούει σε μια διπλή αναγκαιότητα: αφενός επισημαίνεται στο χρήστη της μέτρησης η πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων, εφιστώντας την προσοχή του στον πεπερασμένο χαρακτήρα της γνώσης μας για μια συγκεκριμένη ποσότητα, αφετέρου δίνεται μια ποσοτική εκτίμηση του διαστήματος μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή του μετρούμενου μεγέθους, καθώς και της πιθανότητας να βρίσκεται η αληθής αυτή τιμή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος αυτού [2], [9].

3.4.2 Από το σφάλμα στην αβεβαιότητα

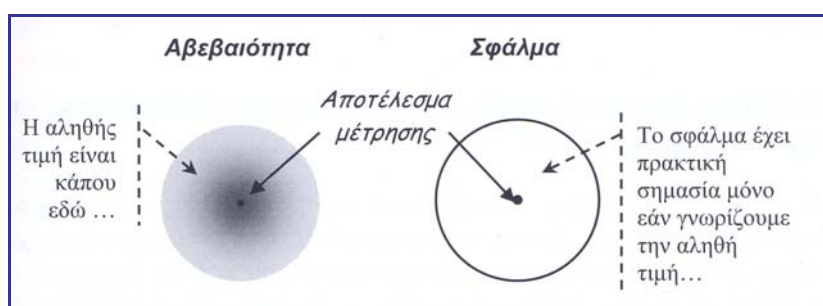
Ως **σφάλμα** ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μιας αληθούς τιμής του μετρούμενου μεγέθους. Πρέπει να σημειωθεί ότι με τη λέξη αληθής χρησιμοποιείται το αόριστο άρθρο «μια» και όχι το οριστικό «η» για να τονιστεί ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν περισσότερες από μία τιμές συμβατές με τον ορισμό του μετρούμενου μεγέθους και ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε ποια είναι η αληθής τιμή. Δηλαδή το σφάλμα είναι εξ ορισμού μια μη προσδιορίσιμη αφηρημένη έννοια, που **αντιπροσωπεύει τη διαφορά ανάμεσα στη μετρούμενη και την αληθή αλλά άγνωστη τιμή ενός μεγέθους** [2].

Τα σφάλματα διακρίνονται σε συστηματικά και τυχαία. Τα **συστηματικά σφάλματα** οφείλονται στην κακή βαθμονόμηση ή χρήση των οργάνων, στην παράβλεψη ορισμένων φαινομένων, στον μη απόλυτο έλεγχο των συνθηκών του πειράματος, στον παρατηρητή ή σε άλλα εξωτερικά αίτια. Η αιτία των συστηματικών σφαλμάτων είναι γνωστή, όχι και όμως και η τιμή τους, ενώ υπακούουν σε φυσικούς νόμους. Τα **τυχαία σφάλματα** οφείλονται στην έλλειψη ευαίσθητης απόκρισης του οργάνου ή του παρατηρητή, σε φαινόμενα όπου το ίδιο το σύστημα χαρακτηρίζεται από διακυμάνσεις, σε εξωτερικό «θόρυβο» ή σε στατιστικές διαδικασίες. Τα τυχαία σφάλματα έχουν άγνωστη αιτία και τιμή, δεν υπακούουν σε φυσικούς νόμους, ενώ μελετώνται στη θεωρία σφαλμάτων [10], [11].

Με τον όρο **σφάλμα**, λοιπόν, δεν εννοούμε την απόκλιση της μέτρησης από τη θεωρητικά αποδεκτή τιμή. Η έννοια του σφάλματος αναφέρεται στην αβεβαιότητα των μετρήσεων την οποία δεν μπορούμε να διορθώσουμε. Ακόμα και αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις δεν μπορεί να εξαλειφθεί, μπορεί όμως να οδηγήσει σε μια κατανομή των μετρούμενων μεγεθών που μπορούν να αναλυθούν στατιστικά. Πρέπει επομένως το σφάλμα να διαφοροποιείται προσεκτικά από την αβεβαιότητα, η οποία αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Τελικά το σφάλμα δεν έχει ιδιαίτερα πρακτική χρησιμότητα, αφού εκφράζει τη διαφορά της αληθούς τιμής, που δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε, από μια μέτρηση, για την αξιοπιστία της οποίας δε διαθέτουμε καμία ένδειξη. **Το**

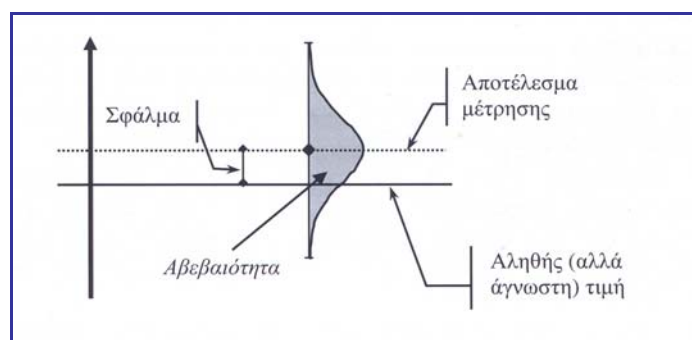
σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών [2], [8].

Σε αντιδιαστολή με τον αφηρημένο χαρακτήρα του σφάλματος, η αβεβαιότητα ορίζεται πρακτικά –σύμφωνα με τον Guide to the expression of uncertainty (GUM)- ως παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος.



Σχήμα 3.14 Η αβεβαιότητα, συγκρινόμενη με το σφάλμα, δίνει μια θολή αλλά ρεαλιστική εικόνα για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Σχηματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η τοποθέτηση του σφάλματος στο επίκεντρο της προσοχής έχει τις ρίζες της σε μια ντετερμινιστική προσέγγιση, ενώ η αβεβαιότητα συνδέεται με μια στοχαστική προσέγγιση [4].

Η πληροφορία, επομένως, που διαθέτουμε για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης αφορά όχι μόνο στην εκτιμώμενη καλύτερη προσέγγιση της τιμής του μετρούμενου μεγέθους, αλλά και στη διασπορά των πιθανών τιμών που το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να έχει, με επίγνωση της αδυναμίας να εντοπιστεί η μία και μοναδική αληθής τιμή [2].



Σχήμα 3.15 Σφάλμα και αβεβαιότητα [4]

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ένα αποτέλεσμα μέτρησης μπορεί τελικά να εμπεριέχει μικρό (αλλά άγνωστο) σφάλμα και να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αβεβαιότητα, όπως και αντίστροφα, μπορεί να χαρακτηρίζεται από μικρή αβεβαιότητα αλλά, στην πραγματικότητα, το σφάλμα να είναι μεγάλο. Αυτό που απαιτείται είναι η διατύπωση ενός διαστήματος $\Delta X = (x_a, x_b)$, μέσα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή με μια λιγότερο ή περισσότερο σημαντική πιθανότητα p , αποκαλούμενη **πιθανότητα κάλυψης** (coverage probability) ή **επίπεδο εμπιστοσύνης** (confidence level). Για τις συνήθεις κατανομές πιθανοτήτων η επιλογή ενός διαστήματος ΔX εκατέρωθεν της αναμενόμενης τιμής x_e , οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα εμπιστοσύνης. Εάν επιζητείται μεγαλύτερη πιθανότητα κάλυψης, είναι αναγκαία η αύξηση του διαστήματος, πολλαπλασιάζοντας αντίστοιχα την τυπική αβεβαιότητα με ένα **συντελεστή κάλυψης k** , η τιμή του οποίου εξαρτάται από το είδος της κατανομής $f(x)$ και από το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης. Το γινόμενο $U_x = k u_x$ ονομάζεται διευρυμένη αβεβαιότητα και το τελικό αποτέλεσμα διατυπώνεται ως $x_e \pm U_x$ [12].

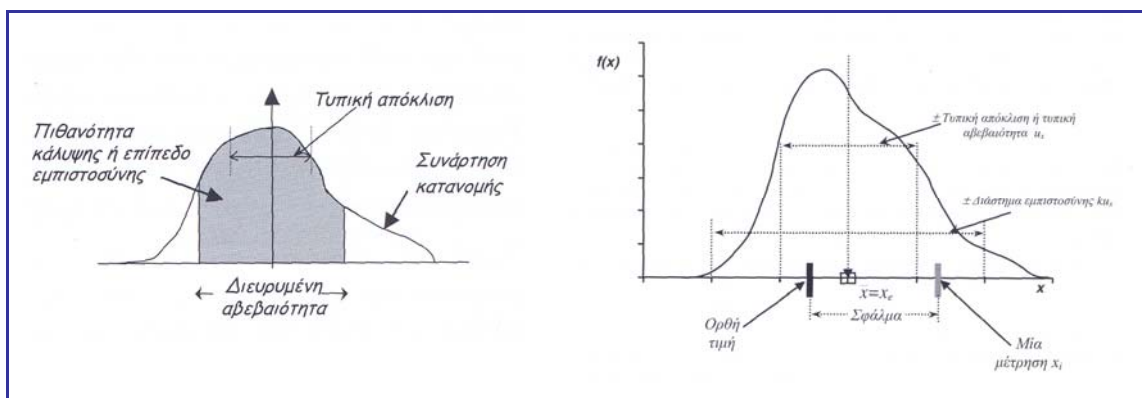
Πέρα, λοιπόν, από την πιθανότερη τιμή, απαιτείται η γνώση της τυπικής απόκλισης (σ_x) των πιθανών τιμών, αλλά και πληροφορίες για το είδος της κατανομής ($f(x)$), έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η τυπική αβεβαιότητα $u_x = \sigma_x$ και το διάστημα $(x_e - k u_x, x_e + k u_x)$, μέσα στο οποίο περιέχεται η ορθή αλλά άγνωστη τιμή για ένα δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης, το οποίο ορίζεται με τη βοήθεια του συντελεστή κάλυψης k , που εξαρτάται με τη σειρά του από την επιθυμητή πιθανότητα εμπιστοσύνης[8].

3.4.3 Κατηγοριοποίηση αβεβαιοτήτων (Τύπου A & Τύπου B)

Σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, το αποτέλεσμα μιας μέτρησης δεν περιορίζεται σε καμία περίπτωση στην τιμή του μετρούμενου μεγέθους, αφού πρόκειται για μία στοχαστική μεταβλητή και η αποδιδόμενη τιμή χαρακτηρίζεται από μία αβεβαιότητα. Η αβεβαιότητα αυτή μπορεί να εκφραστεί είτε ως τυπική απόκλιση της συνάρτησης κατανομής που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα, και αποκαλείται τότε **«τυπική αβεβαιότητα»**,

είτε ως διάστημα στο οποίο περιέχεται η αληθής τιμή, με μια ορισμένη στάθμη σιγουριάς ή εμπιστοσύνης, και αποκαλείται **«διευρυμένη αβεβαιότητα»**.

Πρέπει να τονισθεί ότι, η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει την ποιότητα μίας μέτρησης και πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμα της. Δεν αφορά άμεσα τα παρατηρούμενα μεγέθη, τα οποία είναι δεδομένα και ανεξάρτητα από τη δυνατότητα του παρατηρητή να τα προσεγγίσει. Η αβεβαιότητα αφορά πάντα μια συγκεκριμένη τιμή, όπως αυτή εκτιμήθηκε κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με συγκεκριμένη διαδικασία, και χαρακτηρίζει τη γνώση που διαθέτουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Είναι επομένως δυνατόν, κάποιος άλλος να δώσει μια άλλη εκτίμηση τόσο για την τιμή του ίδιου μεγέθους όσο και για την αβεβαιότητα που συνοδεύει την τιμή αυτή.



Σχήμα 3.16 Κατανομή πιθανοτήτων των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται γενικά από πολλές συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους: οι αβεβαιότητες **τύπου A**, που υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους, και οι αβεβαιότητες **τύπου B**, που υπολογίζονται με άλλα μέσα. Η κατηγοριοποίηση αυτή δεν αντιστοιχεί στη διάκριση μεταξύ «τυχαίων» και «συστηματικών» αβεβαιοτήτων [2], [8], [9].

Οι συνιστώσες **τύπου A** προκύπτουν από τη μεταβλητότητα (variance) ή την τυπική απόκλιση (standard deviation) και τους βαθμούς ελευθερίας του αποτελέσματος, ενώ είναι συχνά απαραίτητη και η γνώση της συμμεταβλητότητας (covariance).

Οι συνιστώσες **τύπου B**, παρά το ότι δεν προκύπτουν απευθείας από κάποια στατιστική επεξεργασία, οφείλουν να παρουσιάζονται με όρους τυπικής

αβεβαιότητας. Η τυπική αυτή αβεβαιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως προσέγγιση της αντίστοιχης μεταβλητότητας, η ύπαρξη της οποίας υφίσταται ως υπόθεση.

Η τελική συνδυασμένη αβεβαιότητα προκύπτει από το συνδυασμό όλων των επιμέρους συνιστωσών, εκφραζόμενων με τη μορφή τυπικών αποκλίσεων.

3.4.4 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A

Η **αβεβαιότητα τύπου A** (*random uncertainty*), σύμφωνα με τους κανονισμούς [10], χρησιμοποιείται όταν το αποτέλεσμα x μιας μέτρησης προκύπτει από τις τιμές x_i , $i=1,2,\dots,n$ των n ανεξάρτητων επαναλαμβανόμενων μετρήσεων μιας μη μεταβαλλόμενης ποσότητας X , κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας, χρησιμοποιώντας όργανα μέτρησης χαρακτηριζόμενα από αμελητέα απόκλιση στο χρονικό διάστημα που διαρκεί η μέτρηση.

Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται βάσει στατιστικών κανόνων. Πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων και προκύπτει η στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων μέτρησης. Η πραγματική κατανομή σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια και για λόγους πρακτικούς όσο και στατιστικούς προσεγγίζεται με την κανονική κατανομή.

Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις [9]:

- **U_r για μικρό αριθμό μετρήσεων (π.χ. 10)**

Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$U_r = \frac{ts_r}{\sqrt{n}} \quad (3.18)$$

όπου t : συντελεστής Student (Student's factor)

P : το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (confidence level)

s_r : τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων που δίνεται από τη σχέση:

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (3.19)$$

όπου

n : ο αριθμός των μετρήσεων

x_i : οι μετρηθείσες τιμές

x_m : η μέση τιμή των μετρήσεων

Πίνακας 3.1 Τιμές του συντελεστή Student 't' για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης συναρτήσει του αριθμού των μετρήσεων [6]

$P\%$ n	68,3	90	95	99,7
2	1,84	6,31	12,7	-
3	1,32	2,92	4,30	-
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
∞	1,00	1,65	1,96	3,00

- **U_r μεγάλο αριθμό μετρήσεων ($n \gg 10$)**

Για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% (που είναι και αυτό που ζητείται συνήθως) και για ένα δείγμα με περισσότερες από 10 μετρήσεις ($n \gg 10$), ο συντελεστής Student t μπορεί να αντικατασταθεί από το συντελεστή κάλυψης k . Σε αυτήν την περίπτωση η αβεβαιότητα της μέσης τιμής είναι :

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n}} \quad (3.20)$$

- Χρησιμοποίηση προϋπάρχουσας γνώσης για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να εφαρμοστεί όταν υφίσταται προηγούμενη πληροφορία για τη συμπεριφορά του οργάνου ή της μεθόδου μέτρησης. Η πληροφορία αυτή αφορά μια ήδη γνωστή τυπική απόκλιση s_r , η οποία υπολογίστηκε από μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων μετρήσεων παρόμοιου μεγέθους, σε παρόμοιες συνθήκες μέτρησης. Στην περίπτωση αυτή αντί να χρησιμοποιηθεί η τυπική απόκλιση του μικρού τρέχοντος δείγματος μετρήσεων, χρησιμοποιείται η παλαιότερα υπολογισμένη s_r και η αβεβαιότητα λαμβάνεται ίση με :

$$U_r = \frac{k s_r}{\sqrt{n_2}} \quad (3.21)$$

3.4.5 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B

Αβεβαιότητα τύπου B (systematic uncertainty) έχουμε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα υπολογίζεται αξιοποιώντας κάθε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με την πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους, έτσι ώστε να οικοδομηθεί μια εικόνα για την πιθανή κατανομή των τιμών του μεγέθους. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι δυνατόν να προέρχονται από :

- πιστοποιητικά διακρίβωσης
- δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις
- εμπειρία ή επιστημονική ανάλυση
- χαρακτηριστικά οργάνου μέτρησης
- υποκειμενικές κρίσεις του μετρολόγου [2]

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων τύπου B είναι [9]:

$$U_s = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (3.22)$$

όπου s_{sa} η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής και s_{sg} η τυπική απόκλιση στην περίπτωση κανονικής κατανομής.

Όταν η διαθέσιμη πληροφορία αφορά μόνο στα όρια $\pm a$ ανάμεσα στα οποία κυμαίνεται το αναμενόμενο σφάλμα, χωρίς να υπάρχουν ειδικότερες ενδείξεις για την κατανομή ανάμεσα στα όρια αυτά, τότε η υποτιθέμενη κατανομή είναι

ομοιόμορφη (ορθογώνια) και η τυπική απόκλιση είναι ίση με : $s_{sa} = \frac{\alpha}{\sqrt{3}}$. Στην περίπτωση που έχουμε η ανεξάρτητες κατανομές η τυπική απόκλιση δίνεται από τη σχέση :

$$s_{sa} = \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3}} \quad (3.23)$$

Όταν η αβεβαιότητα δίνεται μαζί με ένα επίπεδο εμπιστοσύνης, τότε πρέπει να υποθεθεί ότι έχουμε κανονική κατανομή. Εάν το επίπεδο εμπιστοσύνης είναι της τάξης του 95% , η τιμή του συντελεστή k είναι 2 και η τυπική απόκλιση είναι : $s_{sg} = \frac{U_{95}}{2}$. Έτσι η εξίσωση (3.22) γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_{95}}{2}\right)^2} \quad (3.24)$$

Η γενική μορφή της εξίσωσης (3.23) γίνεται :

$$U_s = k \sqrt{\frac{a_1^2}{3} + \frac{a_2^2}{3} + \frac{a_3^2}{3} + \dots + \frac{a_n^2}{3} + \left(\frac{U_1}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_m}{k_m}\right)^2} \quad (3.25)$$

όπου U_1 έως U_m είναι οι αβεβαιότητες (calibration contribution) με δεδομένο επίπεδο εμπιστοσύνης

k_1 έως k_m οι αντίστοιχοι συντελεστές κάλυψης [7]

3.4.6 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση :

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_s^2} \quad (3.26)$$

3.4.7 Συνδυασμός αβεβαιοτήτων–Νόμος διάδοσης αβεβαιοτήτων [2]

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η μέτρηση ενός φυσικού μεγέθους Y πραγματοποιείται έμμεσα, δηλαδή στη βάση απευθείας μετρήσεων μιας σειράς πρωτογενών μεγεθών $X_i, i=1,2,\dots,N$. Η μετρούμενη κάθε φορά τιμή y_i

του Y προκύπτει από το συνδυασμό των τιμών $x_1, x_2, \dots, x_N$ των πρωτογενών μεγεθών μέσω μιας συνάρτησης $Y=M(X_1, X_2, \dots, X_N)$ η οποία αντιπροσωπεύει το φυσικό μοντέλο συσχέτισης των μετρούμενων στην πράξη με το προς μέτρηση μέγεθος.

Ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων (law of error propagation) προκύπτει από την ανάπτυξη σε $1^{η}$ ς τάξης σειρά Taylor της συνάρτησης $M(Y)$ γύρω από το σημείο της μέτρησης $y_e=M(x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{Ne})$. Η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα (standard combined uncertainty) γύρω από την τιμή μέτρησης δίνεται από την παρακάτω σχέση, γνωστή και ως νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων : [2]

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial M}{\partial x_i} \frac{\partial M}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.27)$$

όπου u_{x_i} είναι η τυπική αβεβαιότητα του μεγέθους X_i και $u(x_i, x_j)$ είναι η συμμεταβλητότητα μεταξύ X_i και X_j .

Συνήθως στις δοκιμές τα μεγέθη $X_1, X_2, \dots, X_N$ θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και η παραπάνω σχέση γράφεται [2]:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial M}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \quad (3.28)$$

3.5 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης [12], [13]

3.5.1 Ορισμοί

Ο μηχανισμός της διάσπασης είναι ένας αρκετά πολύπλοκος μηχανισμός, ο οποίος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Έτσι η τάση διάσπασης είναι ένα μέγεθος στοχαστικό και για τον προσδιορισμό της είναι αναγκαία στατιστική ανάλυση.

Για τη στατιστική ανάλυση της τάσης διάσπασης χρησιμοποιούνται οι πιο κάτω ορισμοί:

- **Πιθανότητα διάσπασης** ή «**p**» ενός δοκιμίου είναι η πιθανότητα που έχει η εφαρμογή μιας τάσης δεδομένης τιμής και κυματομορφής να προκαλέσει τη διάσπαση του. Η παράμετρος p εκφράζεται είτε ως κλάσμα είτε ως επί τοις εκατό ποσοστό.

- **Πιθανότητα αντοχής** ή «**q**» ενός δοκιμίου είναι η πιθανότητα με την εφαρμογή τάσης δεδομένης τιμής και κυματομορφής να μην προκληθεί διάσπαση του δοκιμίου.

Προφανώς ισχύει:

$$p + q = 1 \quad (3.29)$$

p% τάση διάσπασης ή **U_p** ενός δοκιμίου είναι η τάση που έχει πιθανότητα p% να προκαλέσει διάσπαση. Προφανώς **U_{50}** είναι η τάση που προκαλεί διάσπαση στο 50% των περιπτώσεων. «Συμβατική απόκλιση» ή «**z**» είναι η διαφορά της τάσης διάσπασης 50% και 16% δηλαδή:

$$z = U_{50} - U_{16} \quad (3.30)$$

Η καμπύλη $p(U)$, συνδέει την τάση με την πιθανότητα διάσπασης. Συνήθως, θεωρείται ότι η $p(U)$ ακολουθεί ολοκληρωμένη Γκαουσιανή ή αλλιώς κανονική κατανομή. Μια τέτοια καμπύλη χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή U_{50} και μια τυπική απόκλιση σ που εδώ συμπίπτει με τη συμβατική απόκλιση z . Εκτός από την κατανομή Gauss έχει προταθεί και η προσομοίωση με τις κατανομές Weibull και Gumbel. Από την εμπειρία προκύπτει ότι οι περισσότερες κατανομές συμπίπτουν για την περιοχή $0.12 < p(U) < 0.85$. Οι κατανομές Gauss, Weibull και Gumbel συμπίπτουν για την ευρύτερη περιοχή μεταξύ 0.02 και 0.98.

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της $p(U)$ αρκεί η παραδοχή ότι αυτή ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη κατανομή, και ακολούθως η εύρεση των κατάλληλων παραμέτρων, συνήθως της U_{50} και της z . Αυτό μπορεί να γίνει με κάποια μέθοδο δοκιμών μετά από ένα αριθμό επιβολών της τάσης ανάλογο με τη ζητούμενη ακρίβεια.

Στην πράξη ο αριθμός των επιβολών της τάσης είναι περιορισμένος αλλά και η προσομοίωση της καμπύλης $p(U)$ με κάποια κατανομή παρουσιάζει αβεβαιότητες πράγμα που καθιστά τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων με χρήση στατιστικών μεθόδων αναγκαία.

Τα όρια εμπιστοσύνης αποτελούν μέτρο της αξιοπιστίας μιας τέτοιας μέτρησης και ορίζονται ως εξής: Αν μια παράμετρος y έχει προκύψει από n μετρήσεις τα άνω και τα κάτω όρια εμπιστοσύνης y_u και y_L μπορούν να οριστούν με την πιθανότητα C ότι η πραγματική τιμή του y βρίσκεται μέσα στα

όρια αυτά. Το C είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης και το ήμισυ του εύρους ζώνης εμπιστοσύνης ονομάζεται στατιστικό σφάλμα e_r , που δίνεται από τον τύπο:

$$e_r = \frac{y_U - y_L}{2} \quad (3.31)$$

Το στατιστικό σφάλμα εξαρτάται τόσο από τον αριθμό n όσο και από την τιμή της συμβατικής απόκλισης z .

Η Ι.Ε.Σ [12] δέχεται ότι η τάση διάσπασης μπορεί να προσδιοριστεί μέσω τριών κατηγοριών δοκιμών:

- 1^η κατηγορία δοκιμών ή «μέθοδος επιπέδων τάσης» (Multiple level test).
- 2^η κατηγορία δοκιμών ή «μέθοδος αυξομείωσης τάσης» (Up and down tests).
- 3^η κατηγορία δοκιμών ή «μέθοδος διαδοχικών διασπάσεων» (Successive discharge tests)

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν από τις δοκιμές που έγιναν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η 2^η κατηγορία δοκιμών ή «μέθοδος αυξομείωσης τάσης», η οποία αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

3.5.2 Μέθοδος αυξομείωσης τάσης

Σ' αυτή τη μέθοδο επιβάλλονται n ομάδες από m ίσες τάσεις U_i . Η τάση κάθε επόμενης ομάδας αυξάνεται ή μειώνεται κατά « ΔU » ανάλογα με το αποτέλεσμα της προηγούμενης ομάδας επιβολών της τάσης.

Συνήθως πραγματοποιούνται δύο είδη δοκιμών. Οι «δοκιμές αντοχής» για να προσδιοριστούν οι χαμηλές τιμές της $p(U)$ και οι «δοκιμές διασπάσεως» για τον προσδιορισμό των υψηλών τιμών της $p(U)$. Στις «δοκιμές αντοχής» η τάση αυξάνεται κατά ΔU εφ' όσον κατά τη διάρκεια μιας ομάδας m επιβολών της τάσης δεν συμβεί ούτε μια διάσπαση. Αν συμβεί έστω και μία διάσπαση η τάση μειώνεται κατά ΔU . Προφανώς τα δύο είδη δοκιμών συμπίπτουν για $m=1$, με αυτό το είδος δοκιμών στοχεύουμε στον προσδιορισμό της U_{50} . Τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι οι αριθμοί « k_i » των ομάδων επιβολών της

τάσεως U_i . Το πρώτο επίπεδο U_i που λαμβάνεται υπ' όψιν είναι αυτό στο οποίο υπάρχουν τουλάχιστον δύο ομάδες επιβολών της τάσης.

Αποδεικνύεται ότι η σχέση που συνδέει τον αριθμό m_i των ανά επίπεδο επιβολών της τάσης με τη ζητούμενη πιθανότητα p για δοκιμές αντοχής είναι:

$$p_w = 1 - (0.5)^{1/m_i} \quad (3.32)$$

Ενώ για δοκιμές διασπάσεως η ζητούμενη πιθανότητα είναι:

$$p_d = (0.5)^{1/m_i} \quad (3.33)$$

Ο **Πίνακας 3.2** δίνει για μερικές στρογγυλές τιμές του p , τον αναγκαίο αριθμό m_i λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι αυτός πρέπει να είναι ακέραιος.

Πίνακας 3.2

m_i	70	34	14	7	4	3	2	1
p_w	0.01	0.02	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.50
p_d	0.99	0.98	0.95	0.90	0.85	0.80	0.70	0.50

Αφού από τις πιο πάνω εξισώσεις ή τον **Πίνακα 3.2**, οριστεί για μια τιμή της πιθανότητας διάσπασης η τιμή του m_i , η U_p^* μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση:

$$U_p^* \approx \sum (k_i U_i) / n \quad (3.34)$$

Για να αποφευχθούν σημαντικά σφάλματα το ελάχιστο επίπεδο τάσης που λαμβάνεται υπ' όψιν δεν πρέπει να είναι μικρότερο του ζητούμενου U_p^* πάνω από $2\Delta U$. Η τιμή του ΔU συνήθως λαμβάνεται $2\div 4\%$ της U_i . Η συμβατική απόκλιση z μπορεί και αυτή να βρεθεί με τη μέθοδο «up and down», αλλά για να υπάρξει ακρίβεια χρειάζεται πολύ μεγάλος αριθμός επιβολών της τάσης πράγμα που την κάνει ελάχιστα πρακτική.

Όσο αφορά την εύρεση της U_{50} όπου $m=1$, αυτή η μέθοδος γίνεται μια μέθοδος γραμμικής παρεμβολής που στηρίζεται στο ότι η καμπύλη $p(U)$ στην περιοχή $U_{50} \pm \sigma$ δεν απέχει πολύ από την ευθεία και έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια, δεδομένου ότι για τον αριθμό επιβολών της τάσεως $n=20$ η U_{50} που βρίσκεται από την εξίσωση (3.34) δίνει, με μεγάλη πιθανότητα (όρια εμπιστοσύνης 95%), μια τιμή που βρίσκεται μεταξύ της πιθανότητας διάσπασης $p(U)=0.3$ και $p(U)=0.7$.

3.5.3 Αξιοπιστία των μετρήσεων

Η μέθοδος πιθανοφάνειας (Maximum likelihood method) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και των τριών κατηγοριών μετρήσεων. Αυτές οι μετρήσεις, αφού καθοριστεί μια κατανομή $p(U;U_{50},z)$, επιτρέπουν τόσο την εκτίμηση των U_{50} και z , άρα και της U_p αλλά και τον υπολογισμό των ορίων εμπιστοσύνης που αντιστοιχούν σε ένα επίπεδο εμπιστοσύνης C .

Ας θεωρηθεί ότι για δοκιμές της 1^{ης} και 2^{ης} κατηγορίας είναι γνωστός ο αριθμός των διασπάσεων d_i και αντοχών w_i ανά επίπεδο τάσης U_i . Άρα για δεδομένη κατανομή $p(U;U_{50},z)$ είναι γνωστή και η πιθανότητα διάσπασης $p=p(U_i;U_{50},z)$, αλλά και η πιθανότητα αντοχής $q=[1- p(U;U_{50},z)]$. Η συνάρτηση πιθανότητας L_i τότε ορίζεται:

$$L_i = p(U_i;U_{50},z)^{d_i} (1- p(U_i;U_{50},z))^{w_i} \quad (3.35)$$

Αυτή προφανώς είναι συνάρτηση μόνο των U_{50} και z .

Η συνάρτηση πιθανότητας μιας πλήρους σειράς μετρήσεων που περιλαμβάνει n τιμές της U_i είναι το γινόμενο των επί μέρους συναρτήσεων πιθανότητας:

$$L(U_{50},z) = L_1 L_2 \dots L_i \dots L_n \quad (3.36)$$

Μια τάση U_i που εμφανίζεται στα αποτελέσματα αντιστοιχεί σε μια διάσπαση. Εν γένει μια τάση U_i εμφανίζεται m_i φορές όπου $m_i \geq 1$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας γίνεται:

$$L = f(U_1;U_{50},z)^{m_1} f(U_2;U_{50},z)^{m_2} \dots f(U_m;U_{50},z)^{m_m} \quad (3.37)$$

όπου:

$$f = \frac{dp}{du}$$

Οι βέλτιστες εκτιμήσεις των U_{50} και z είναι οι τιμές U_{50}^* και z^* για τις οποίες η L γίνεται μέγιστη.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον υπολογισμό των ορίων εμπιστοσύνης. Για επίπεδο εμπιστοσύνης π.χ. $C=0.9$, που είναι πολύ συνηθισμένο, αυτά βρίσκονται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$L(U_{50},z)=0.1L_{max} \quad (3.38)$$

Βιβλιογραφία κειμένου

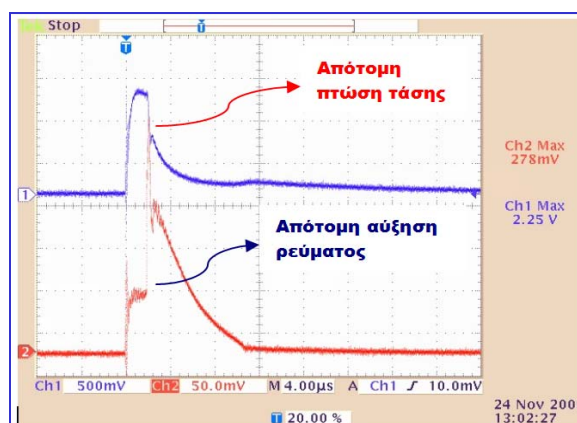
- [1] *Electrical measurements and measuring instruments*, K.A.Bakshi, A.V.Bakshi, U.A.Bakshi.
- [2] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων
- [3] <http://wapedia.mobi/>
- [4] Χρήστος Χριστοδούλου, «Ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης-Διαδικασίες επαλήθευσης και υπολογισμού αβεβαιότητας», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Μάρτιος 2006.
- [5] Mike Peschel, «Very Low Frequency AC Technology : VLF Cable Testing and Answers to Frequently Asked Questions»
- [6] Γ.Κοκολάκης, Ι.Σπηλιώτης, «Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική», Εκδόσεις Συμεών
- [7] Taub/Shilling, «Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [8] Α. Λευκόπουλου, «Αβεβαιότητα μετρήσεων»
- [9] IEC 60-2, 1994, Amendment 1 High Voltage Test Techniques, Part 2 : Measuring Systems
- [10] Νικόλαος Ι. Θεοδώρου, «Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τεύχος Ι : Κλασσικές μετρήσεις», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2000
- [11] <http://physlab.phys.uoa.gr>
- [12] IEC 60060-1, High Voltage Test techniques, Part1: General definitions and test requirments.
- [13] Κ. Α. Στασινόπουλος, «Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων», Θεσσαλονίκη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Παλμογραφήματα σειρών μετρήσεων που αντιστοιχούσαν στο $U_{50\%}$

4.1 Παλμογραφήματα

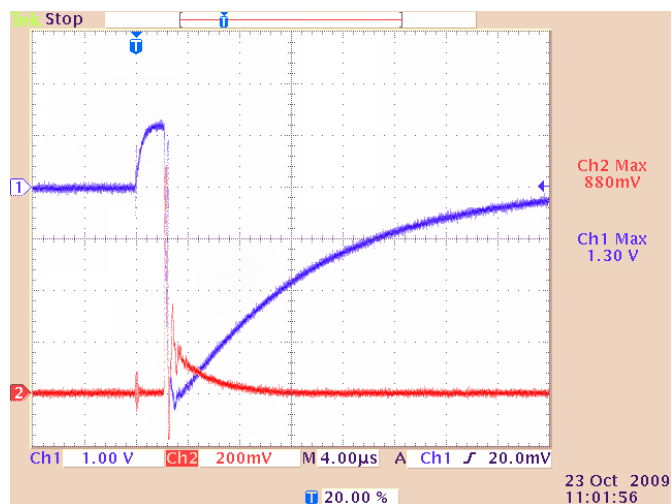
Παρακάτω παρουσιάζονται τα παλμογραφήματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, κατά τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας, προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους και να προσδιοριστεί η τάση διάσπασης $U_{50\%}$. Τα παλμογραφήματα που λήφθηκαν αλλά δεν αντιστοιχούσαν σε τάση διάσπασης $U_{50\%}$ παρατίθενται στο παράρτημα. Η διάσπαση του εδάφους εντοπίζεται όταν, στα παλμογραφήματα της τάσης και του ρεύματος, παρατηρείται απότομη κατά απόλυτη τιμή μείωση της τάσης και ταυτόχρονα απότομη, κατά απόλυτη τιμή, αύξηση του ρεύματος (**Σχήμα 4.1**). Για το λόγο αυτό, καταγράφηκε στον παλμογράφο μέσω διαφορικού καταμεριστή η κρουστική τάση (Ch1 του παλμογράφου) και με τη βοήθεια της αμπεροτσιμπίδας η κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος (Ch2 του παλμογράφου). Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται αναλυτικά η λήψη των μετρήσεων που έγινε μέσω της πειραματικής διάταξης.



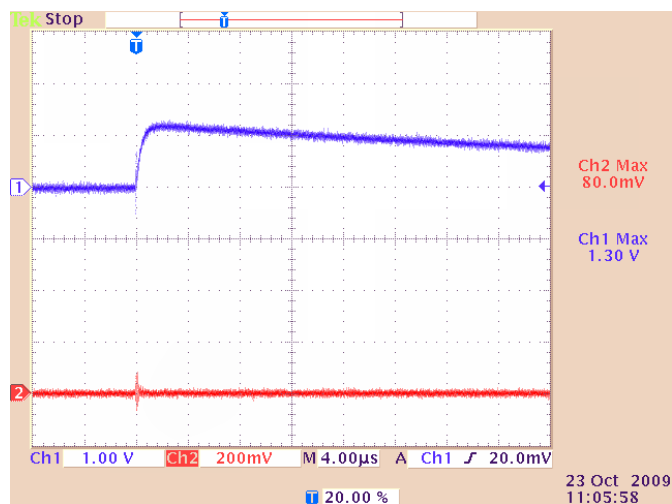
Σχήμα 4.1 Ενδεικτικό παλμογραφήματα τάσης και ρεύματος όταν συμβαίνει διάσπαση του εδάφους

4.1.1 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος A, υγρασία 0% και θετική πολικότητα.

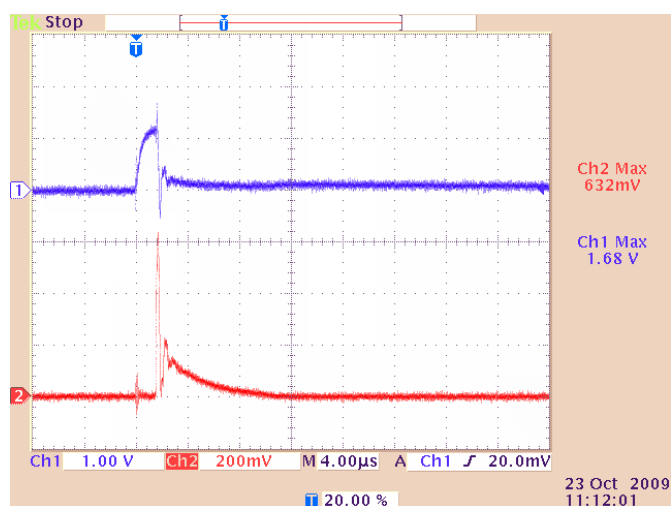
Διάκενο σπινθηριστή: 2,1cm



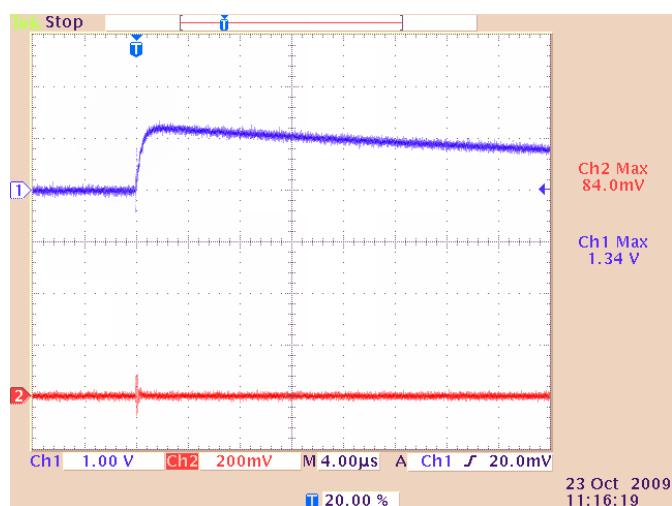
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:996mbar Υγρασία:49%



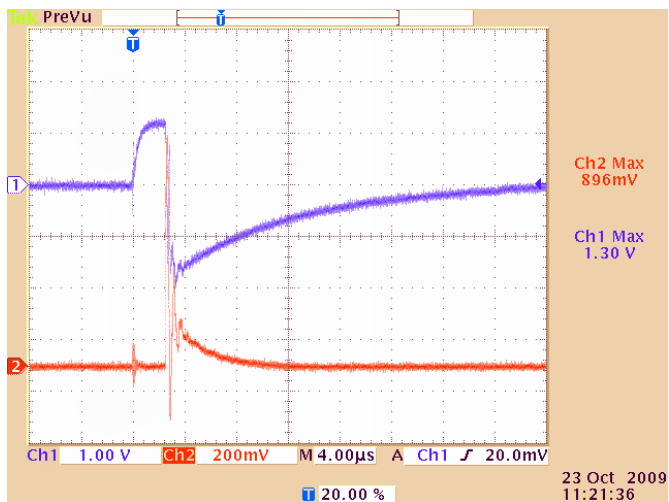
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:996mbar Υγρασία:49%



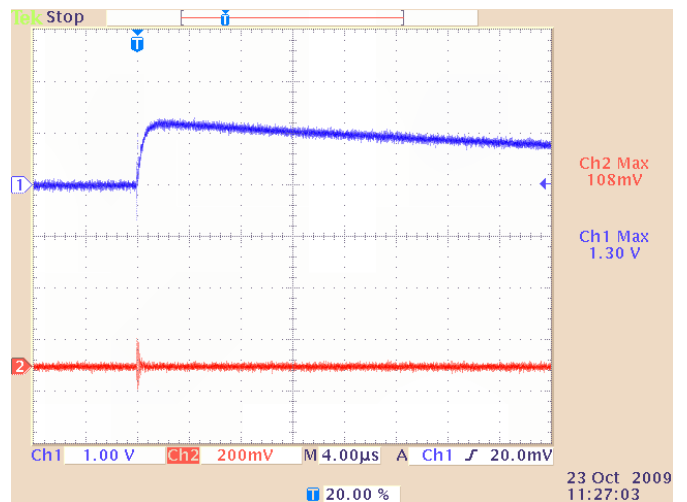
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:996mbar Υγρασία:49%



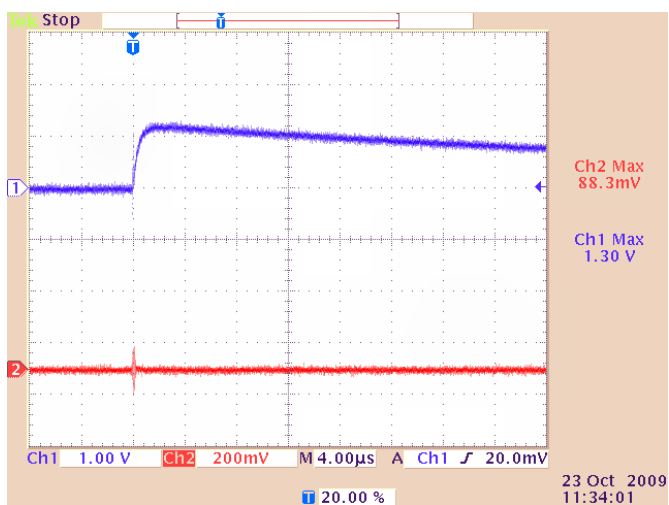
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



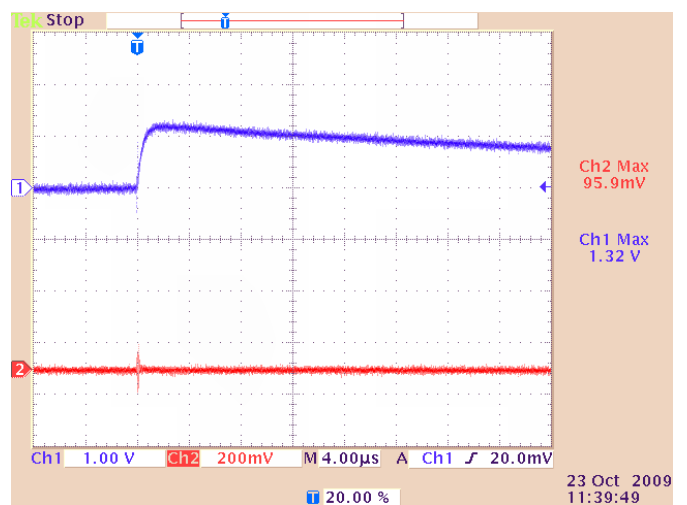
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



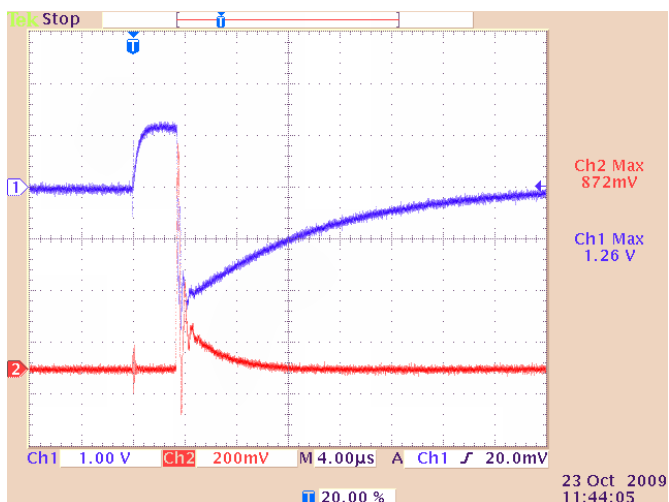
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



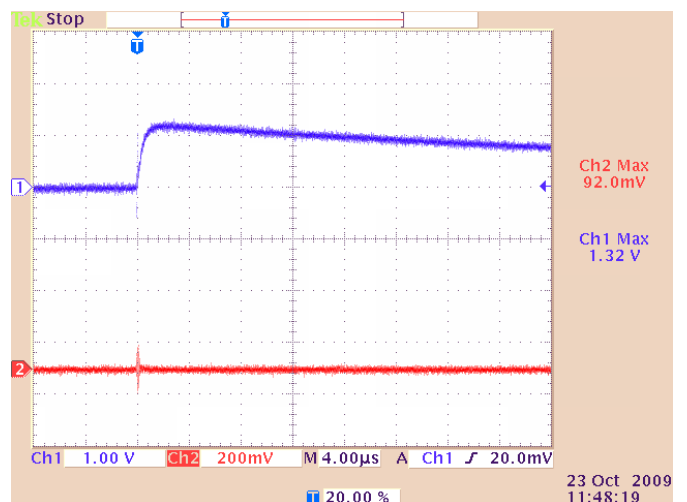
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



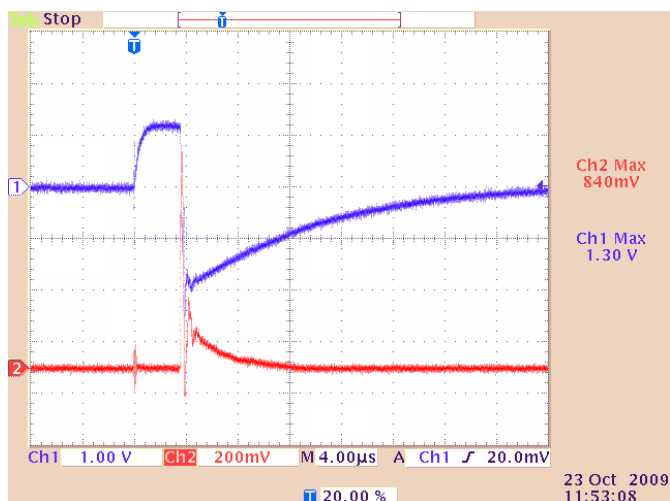
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



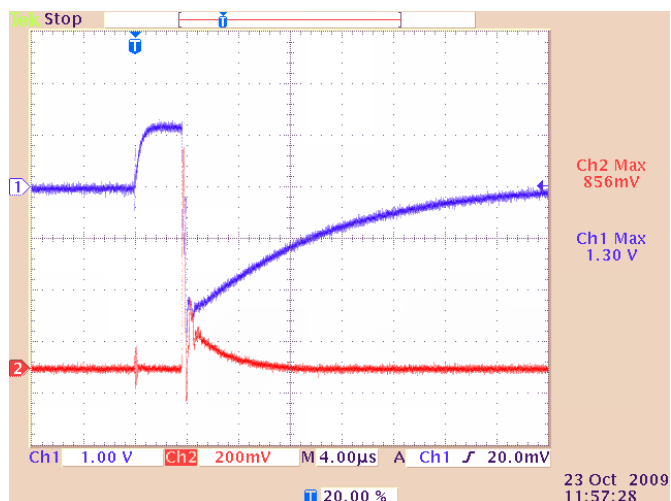
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



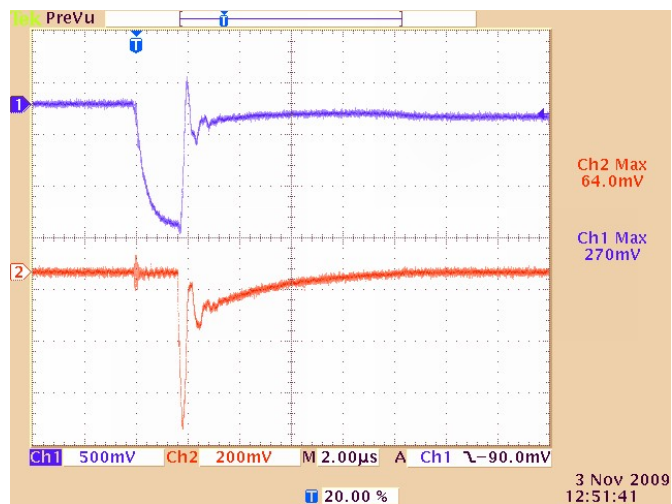
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%



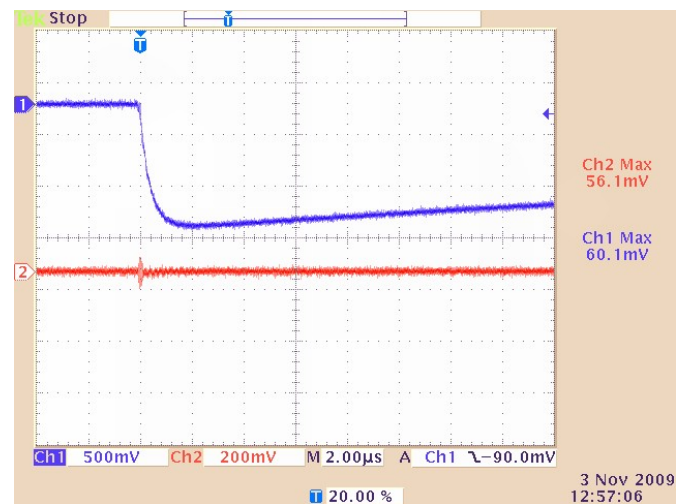
Θερμοκρασία:25°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%

4.1.2 Παλμογραφήματα για δείγμα χρώματος A, υγρασία 0% και αρνητική πολικότητα.

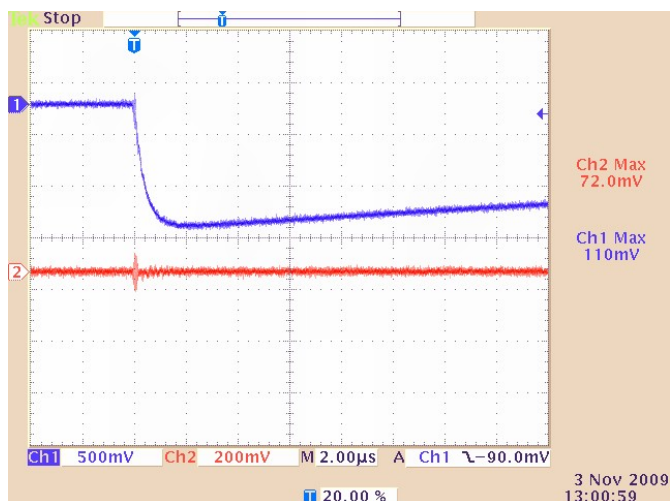
Διάκενο σπινθηριστή: 2,07cm



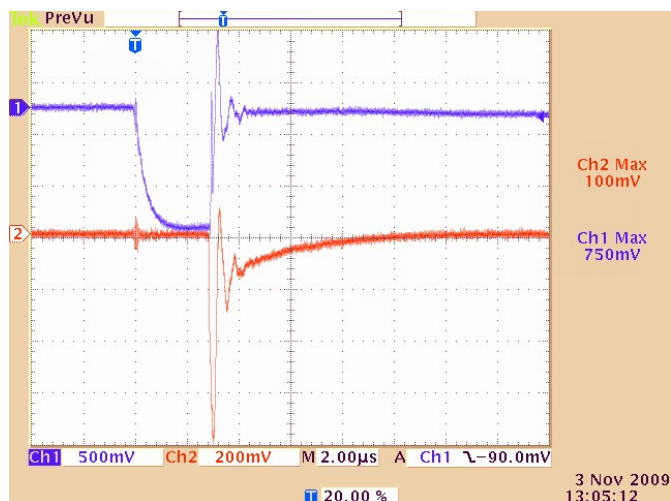
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:48%



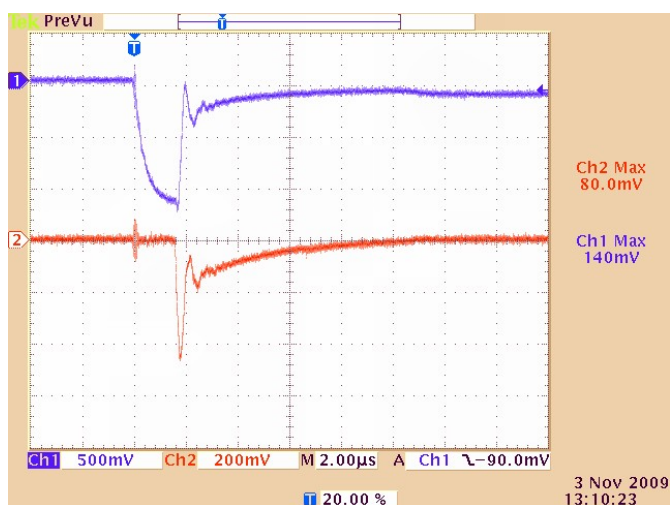
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:48%



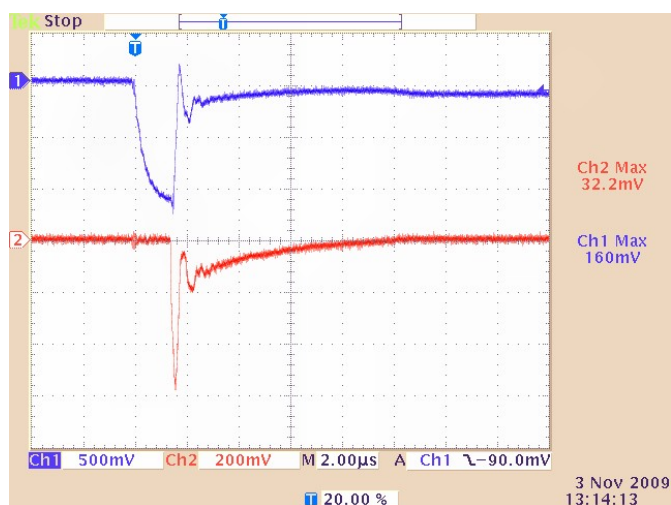
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:48%



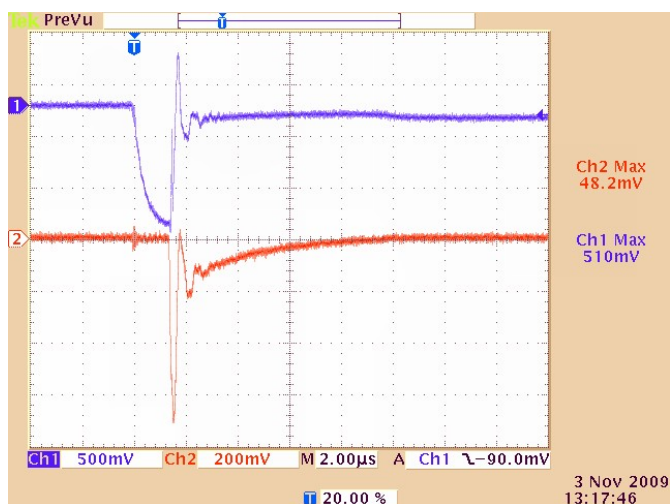
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:48%



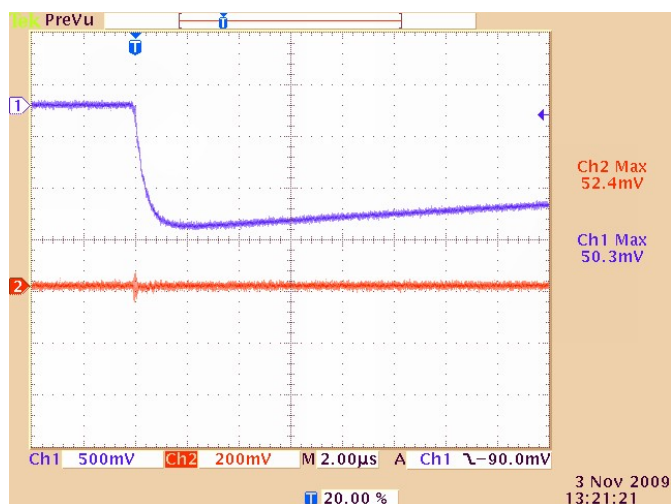
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:980mbar Υγρασία:48%



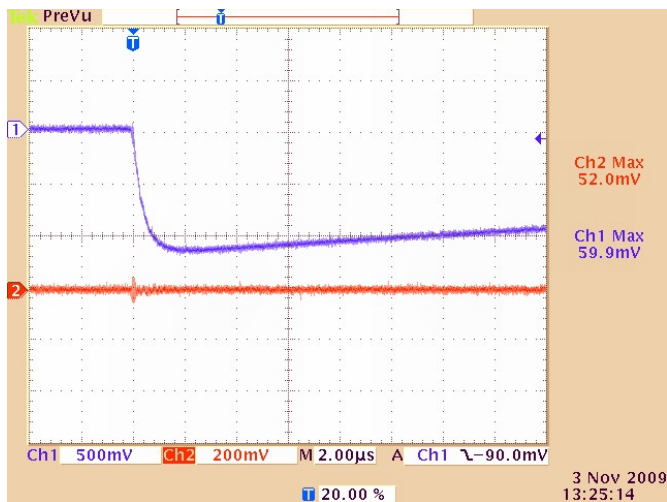
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:980mbar Υγρασία:48%



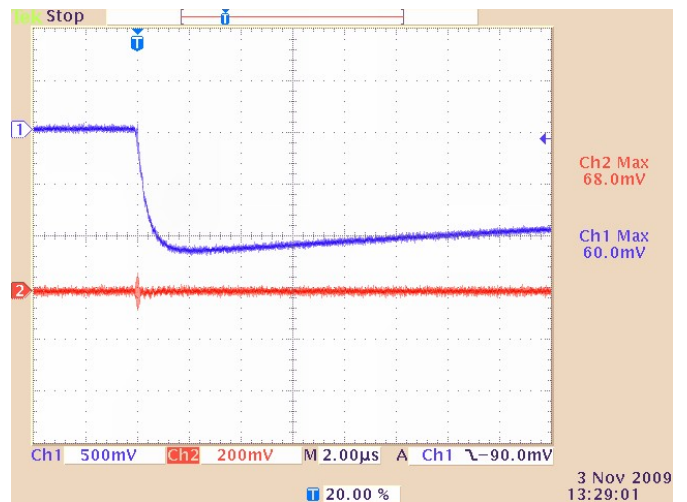
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:980mbar Υγρασία:48%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:980mbar Υγρασία:48%



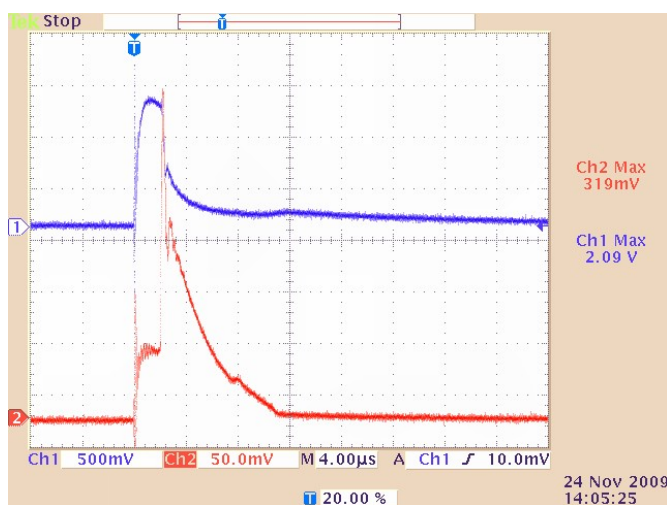
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:980mbar Υγρασία:48%



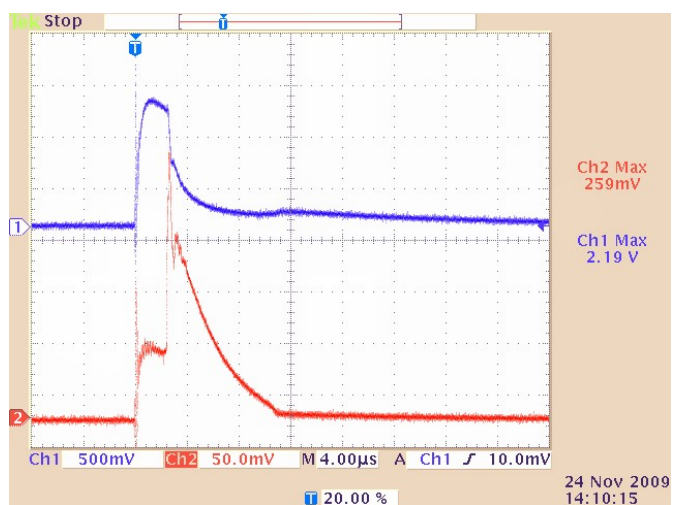
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:980mbar Υγρασία:48%

4.1.3 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος A, υγρασία 5% και θετική πολικότητα.

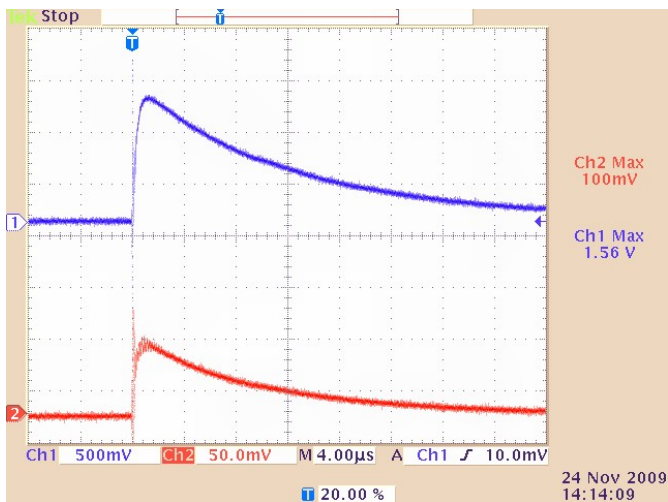
Διάκενο σπινθηριστή: 2,9cm



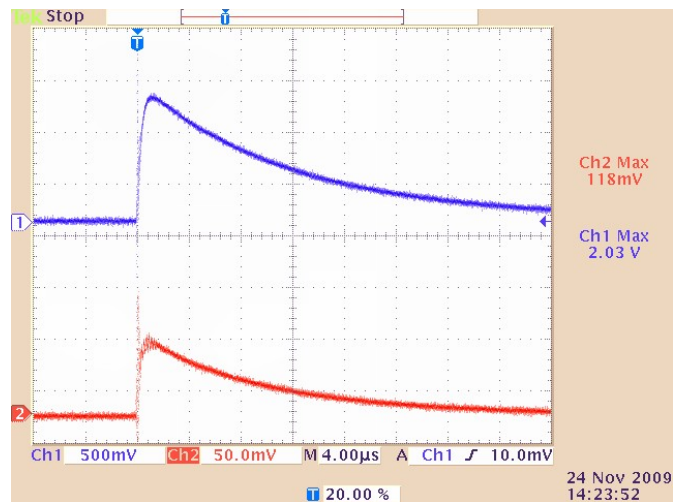
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:48%



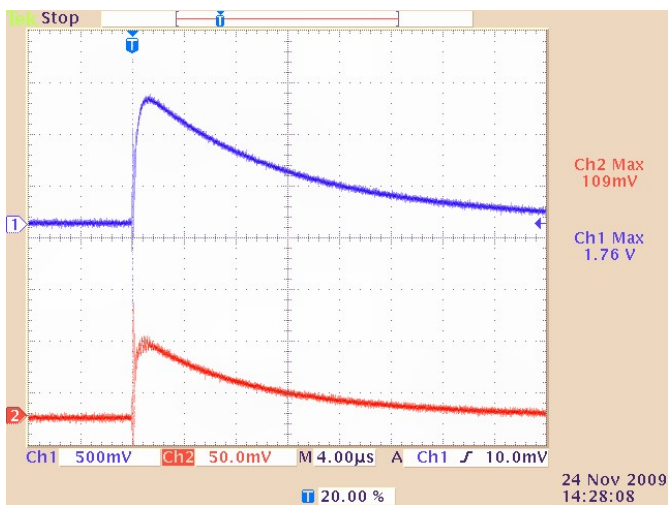
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:48%



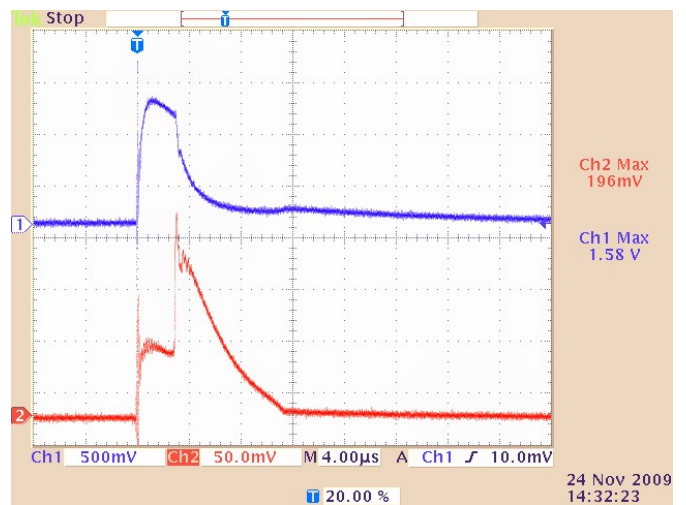
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:48%



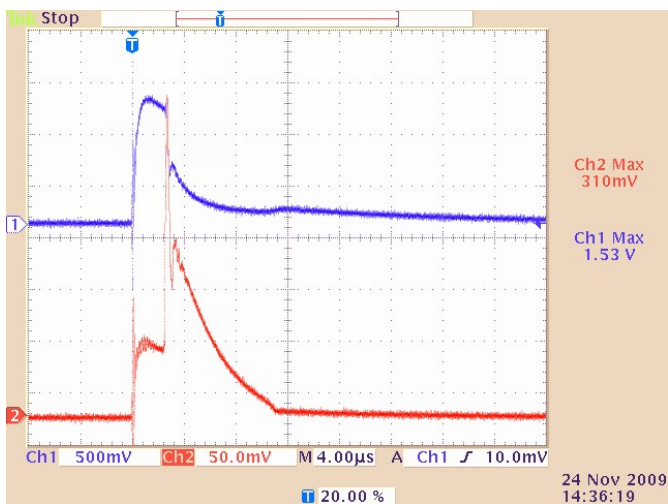
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:47%



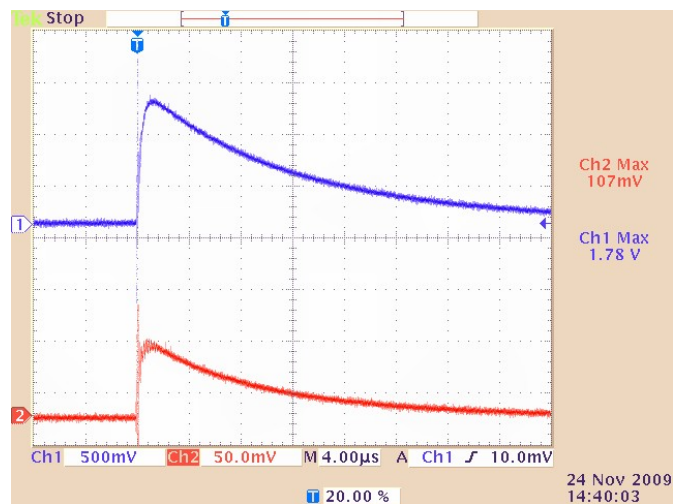
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:47%



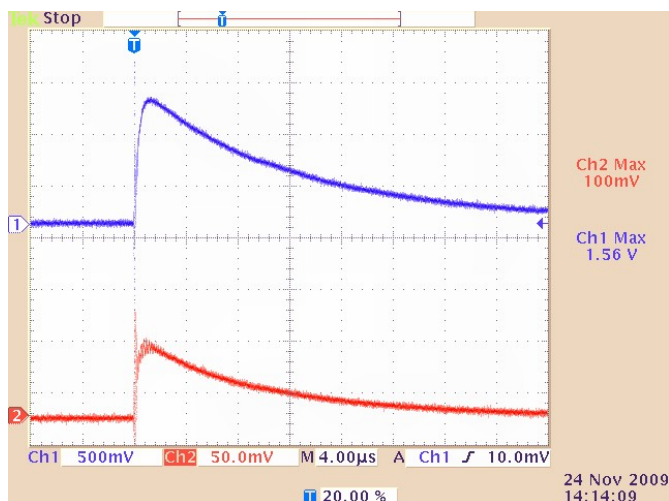
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:47%



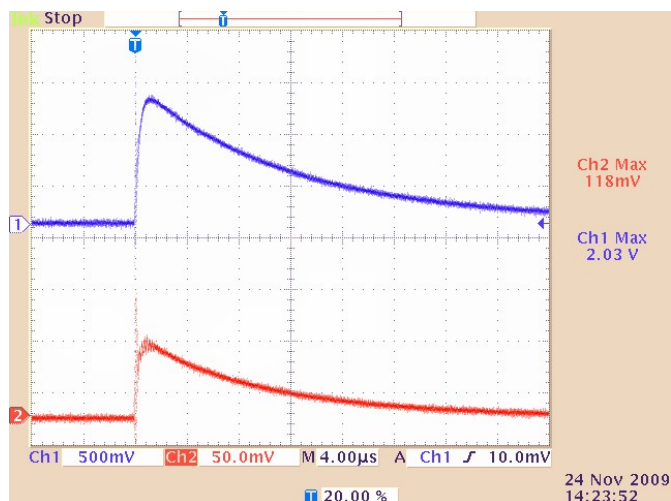
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:994mbar Υγρασία:47%



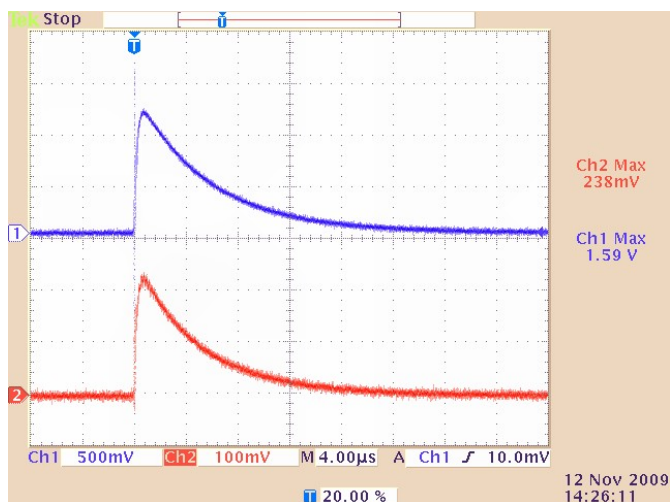
Θερμοκρασία: 22° C Πίεση: 994mbar Υγρασία: 48%



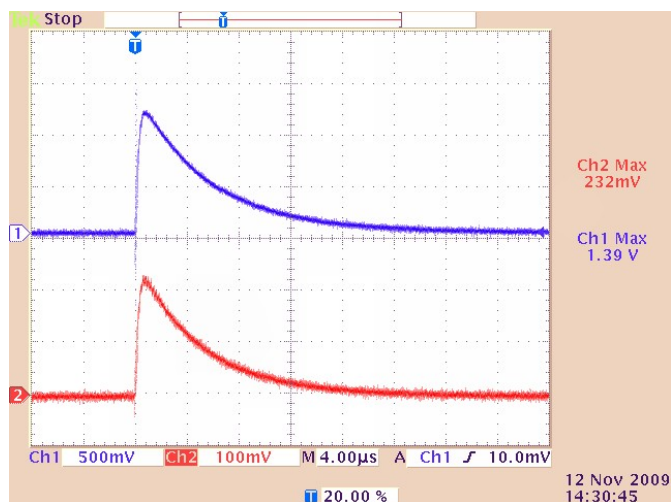
Θερμοκρασία: 22° C Πίεση: 994mbar Υγρασία: 47%

4.1.4 Παλμογραφήματα για δείγμα χρώματος A, υγρασία 10% και θετική πολικότητα.

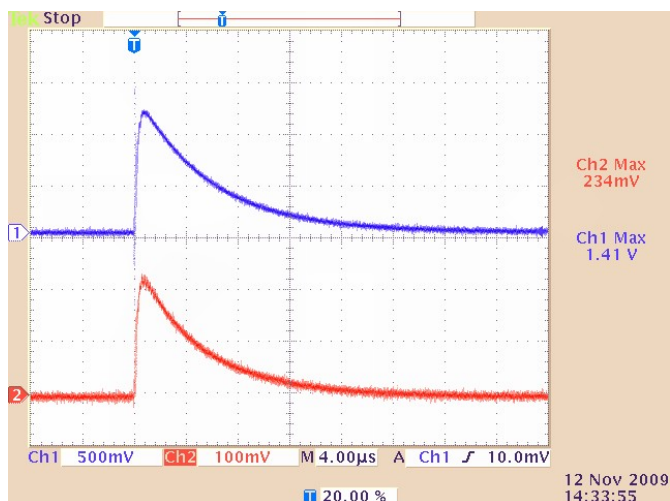
Διάκενο σπινθηριστή: 4,5cm



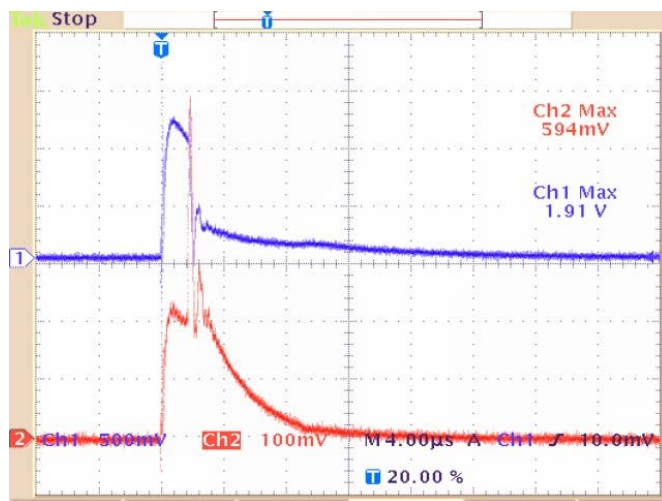
Θερμοκρασία: 23° C Πίεση: 989mbar Υγρασία: 43%



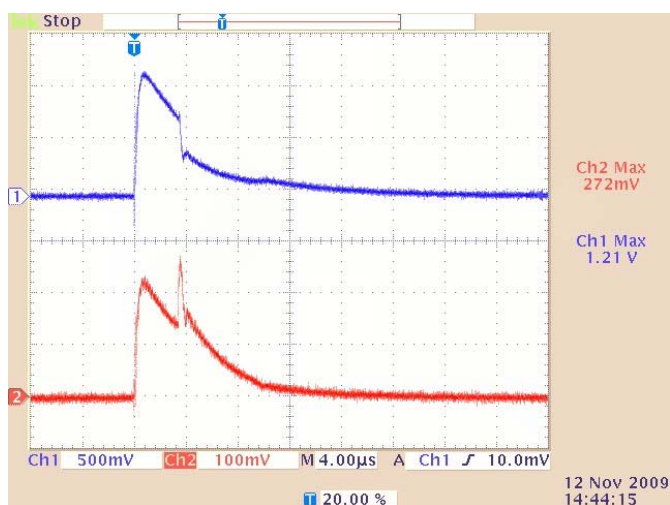
Θερμοκρασία: 23° C Πίεση: 989mbar Υγρασία: 43%



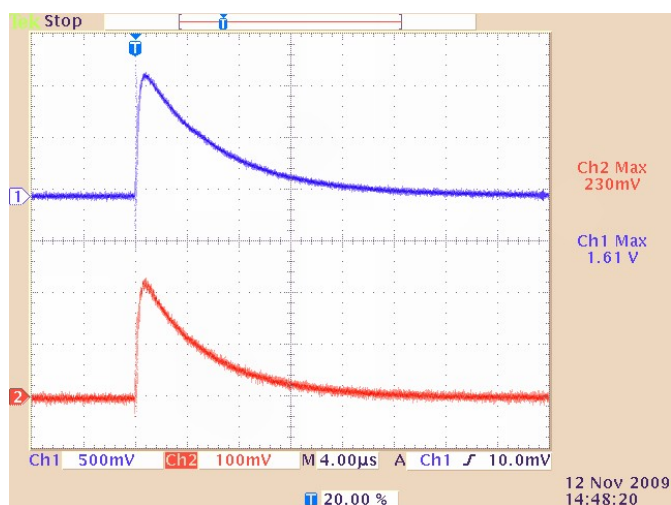
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:43%



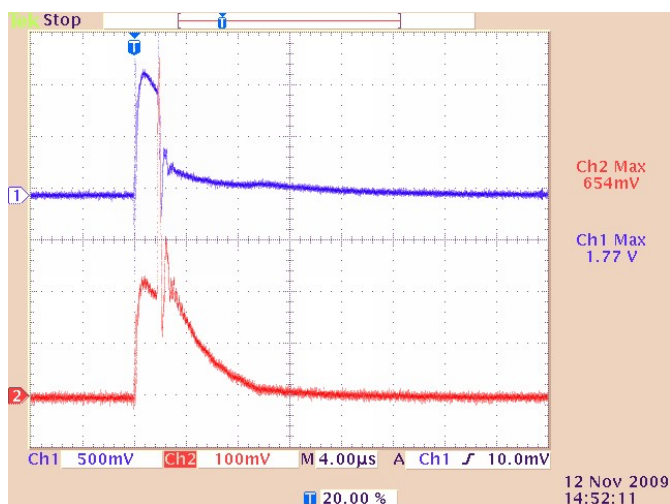
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:43%



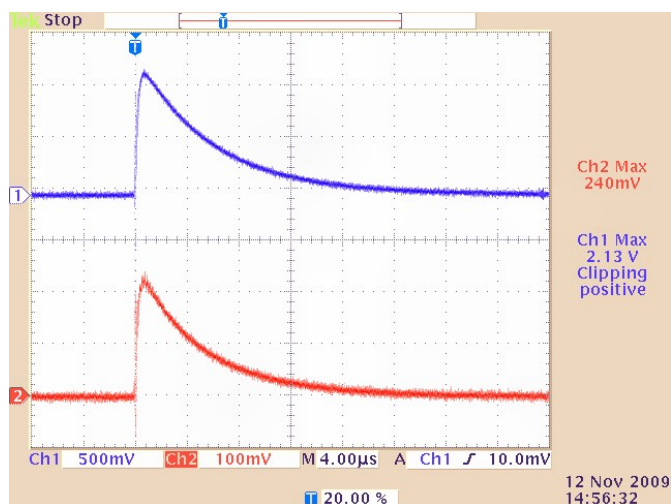
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:43%



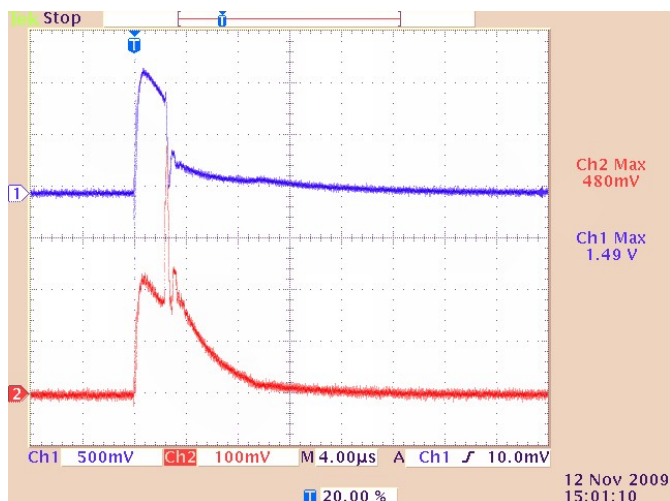
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:43%



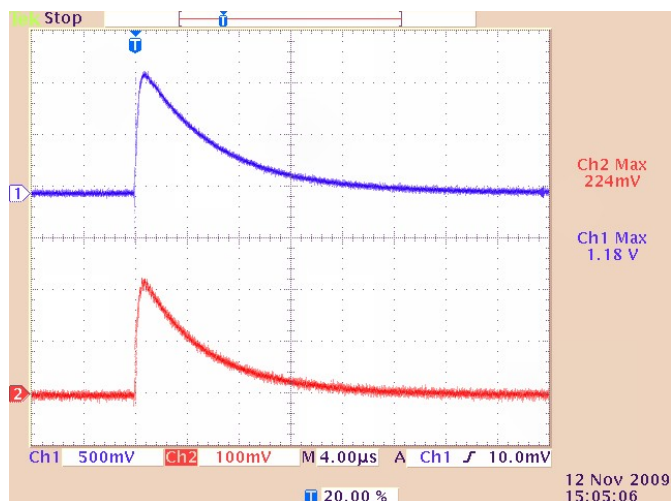
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:42%



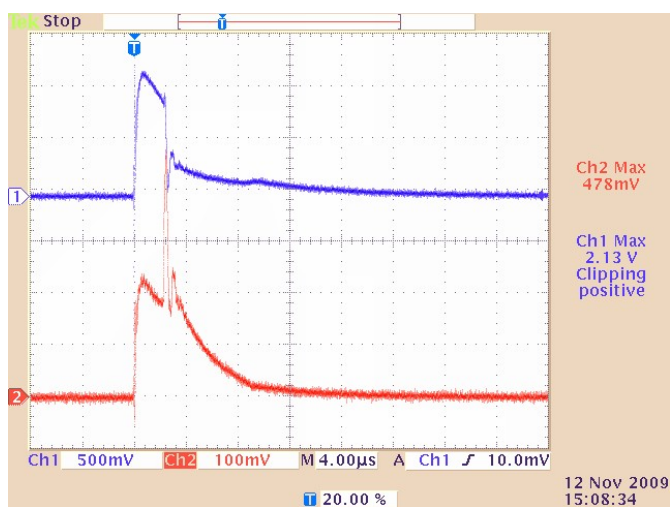
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:42%



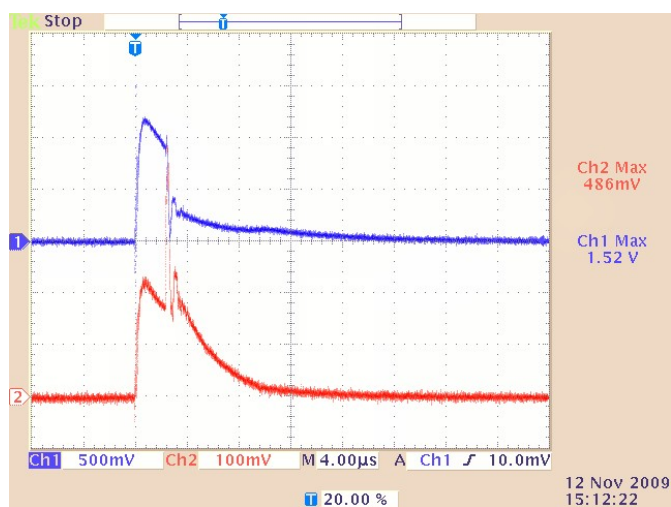
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:42%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:42%



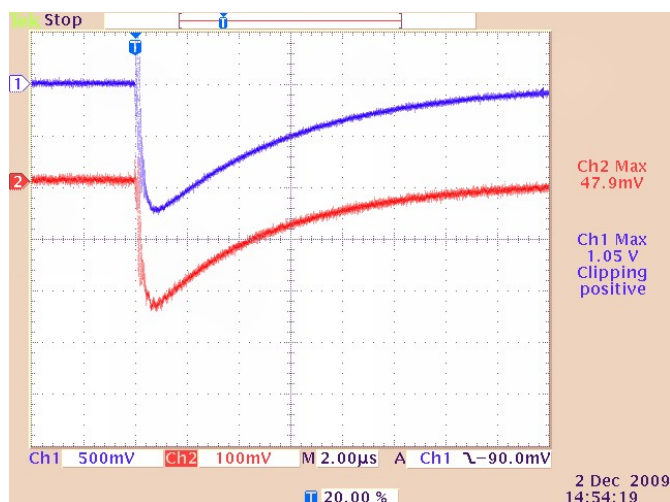
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:42%



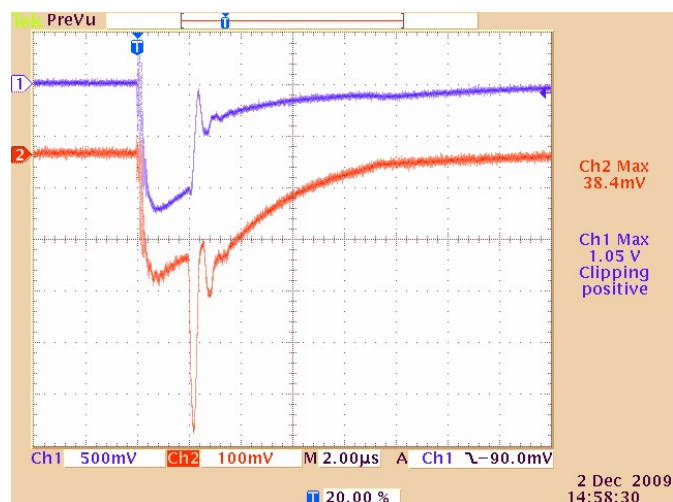
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:42%

4.1.5 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος A, υγρασία 10% και αρνητική πολικότητα.

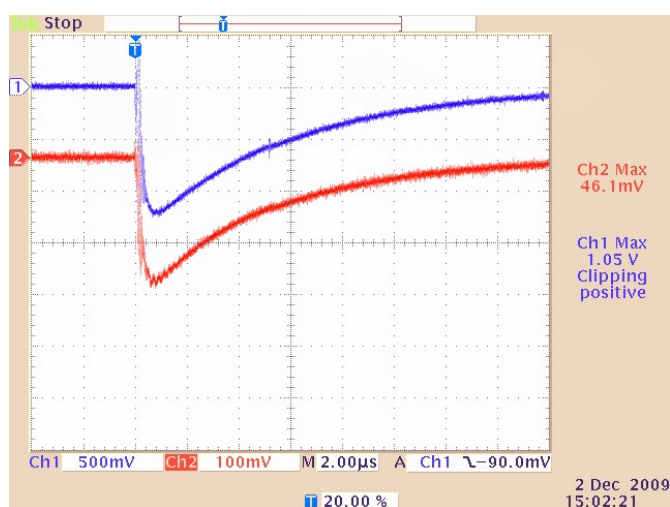
Διάκενο σπινθηριστή: 4,8cm



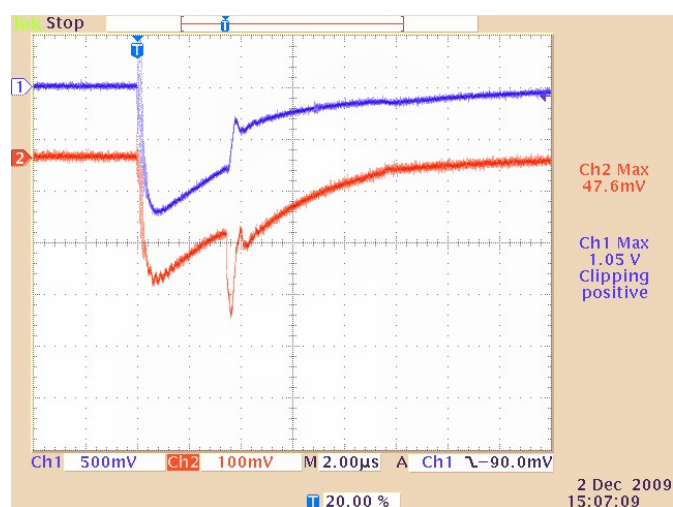
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



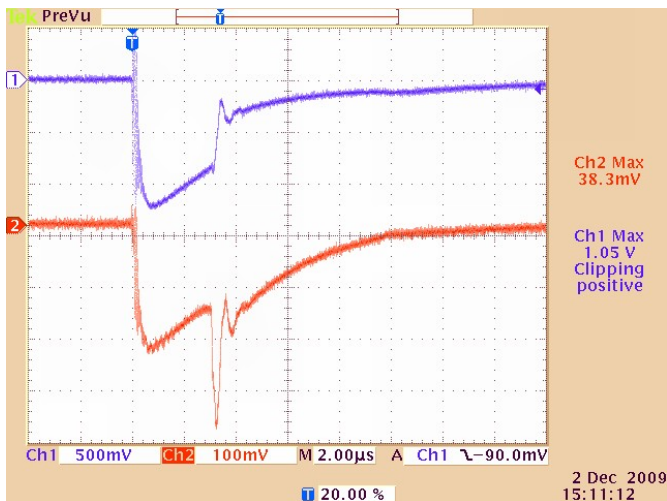
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



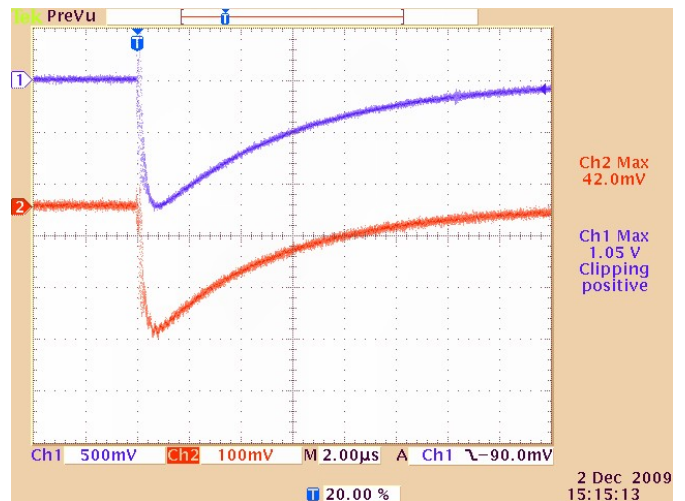
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



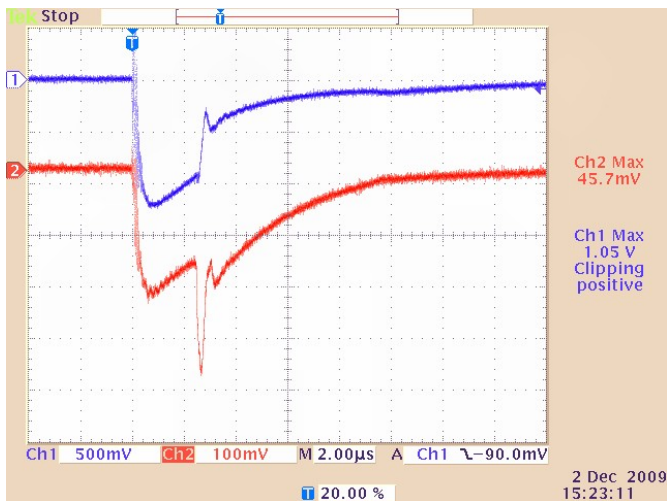
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



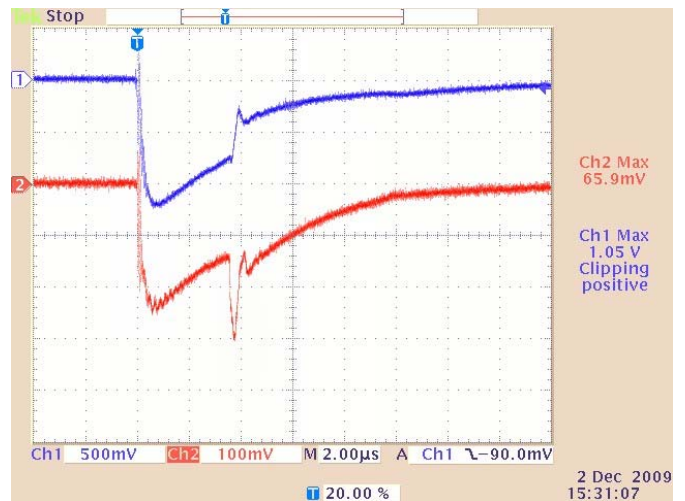
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



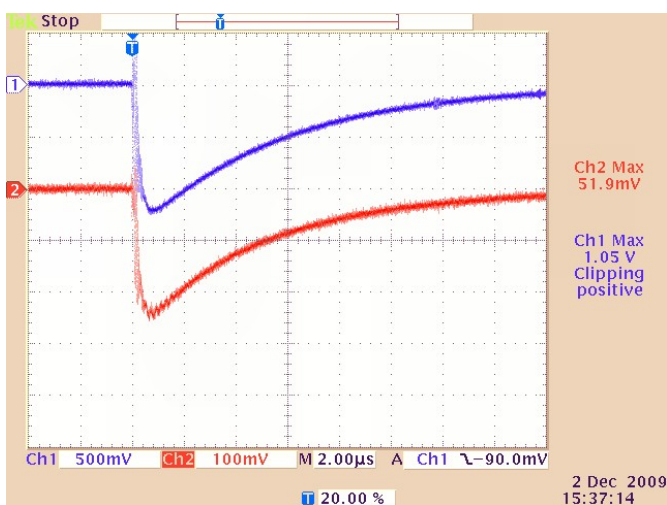
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



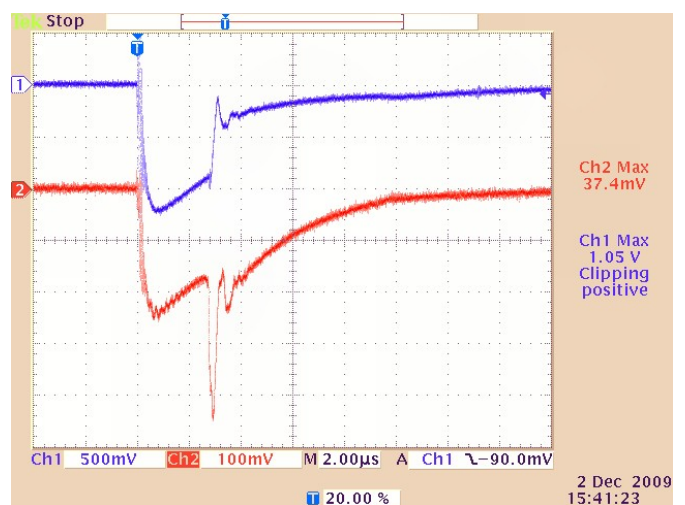
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



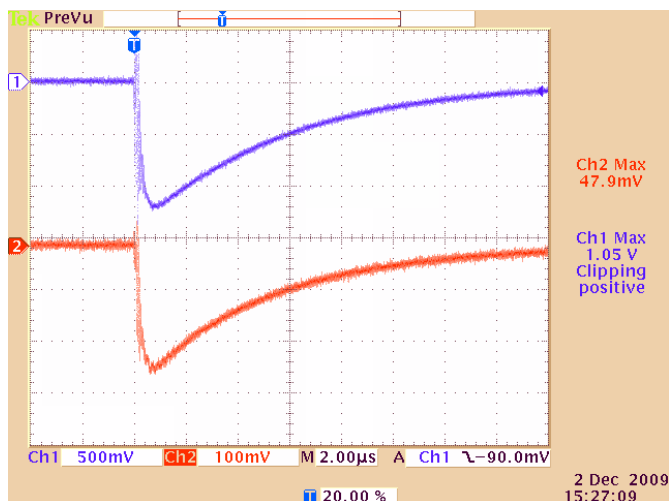
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



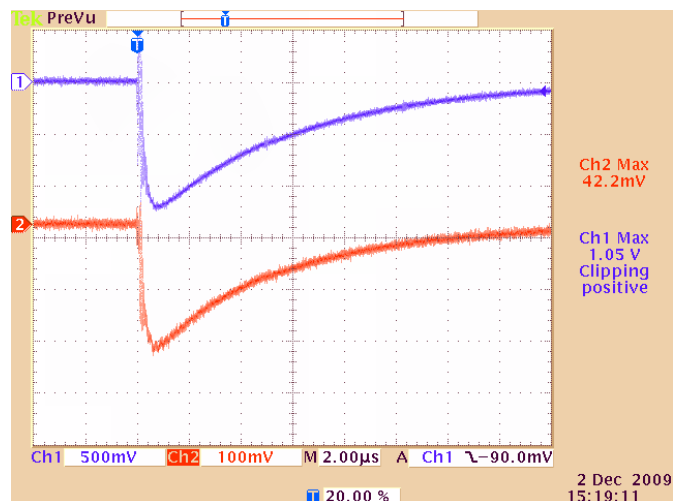
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



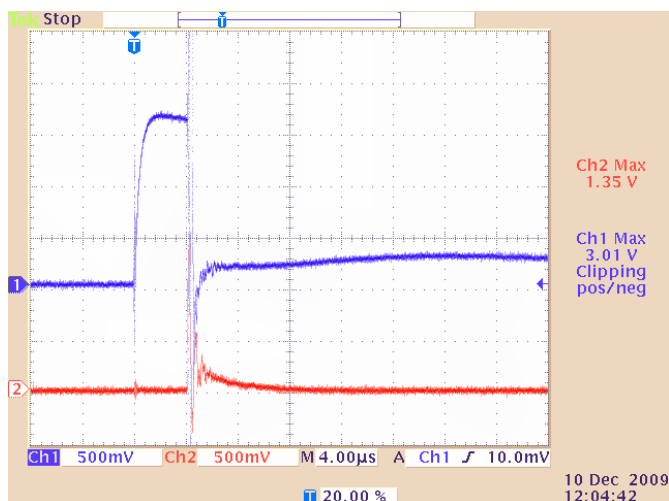
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



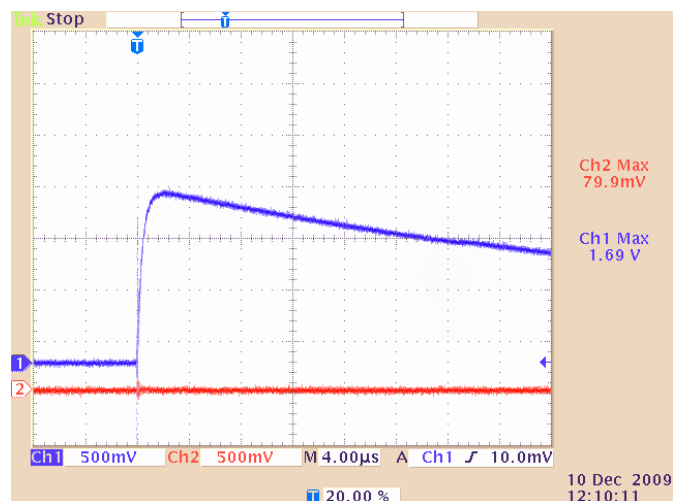
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%

4.1.6 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος B, υγρασία 0% και θετική πολικότητα.

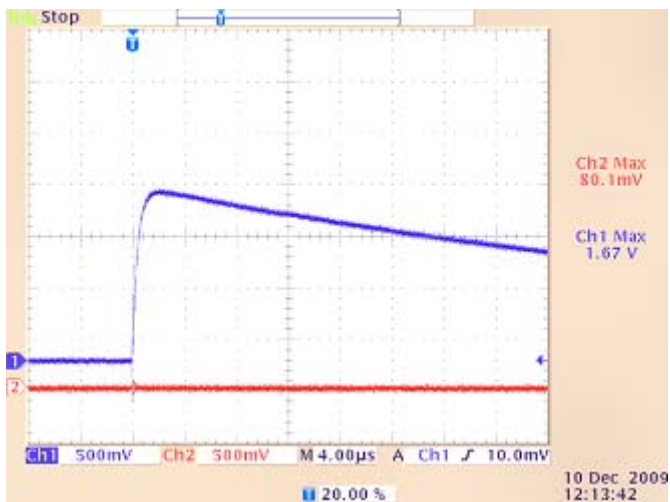
Διάκενο σπινθηριστή: 3,1cm



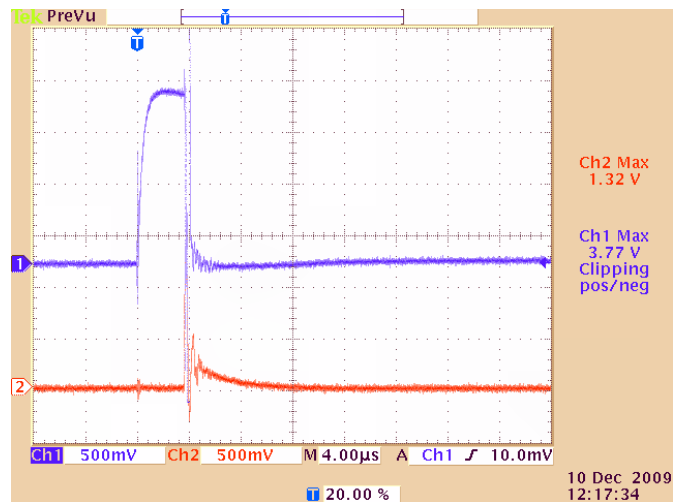
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:47%



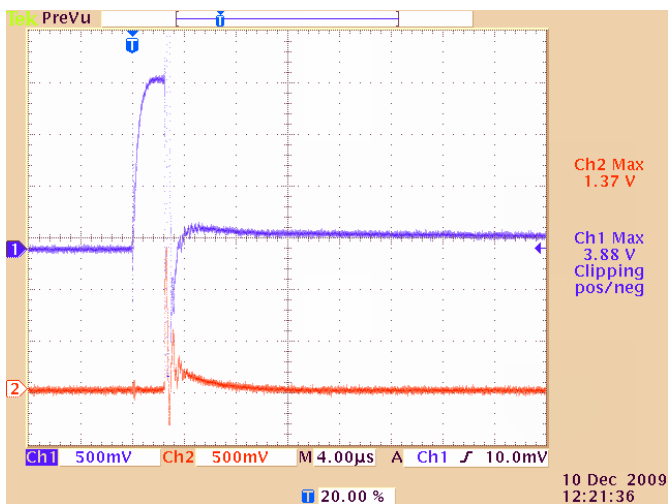
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:47%



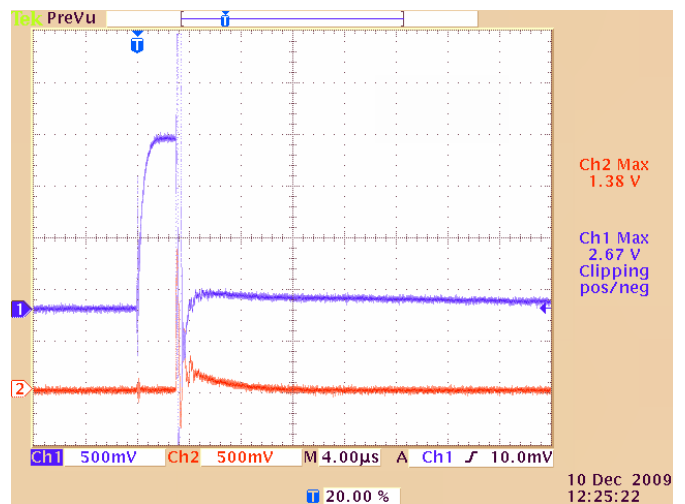
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:47%



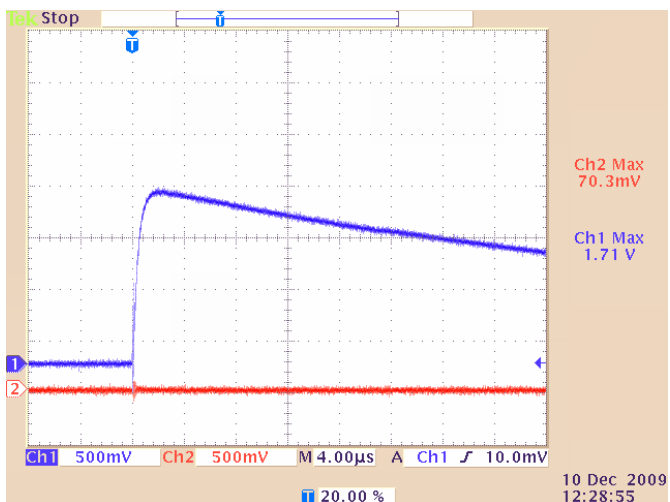
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:47%



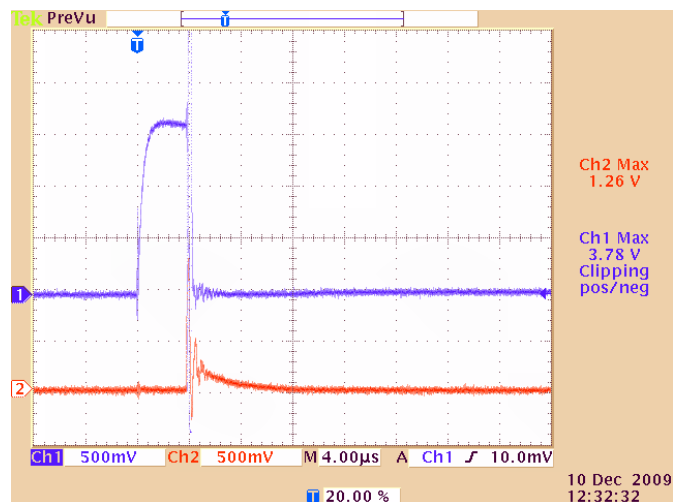
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



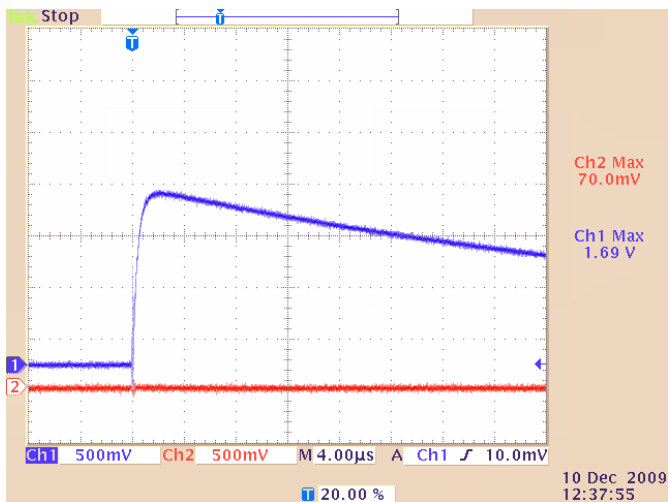
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



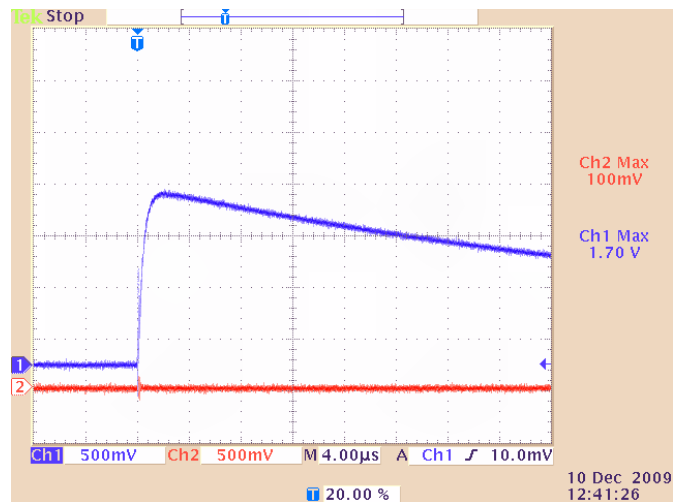
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



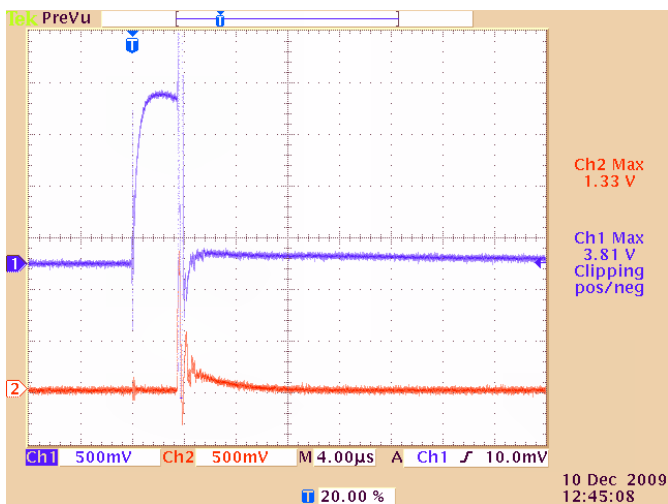
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



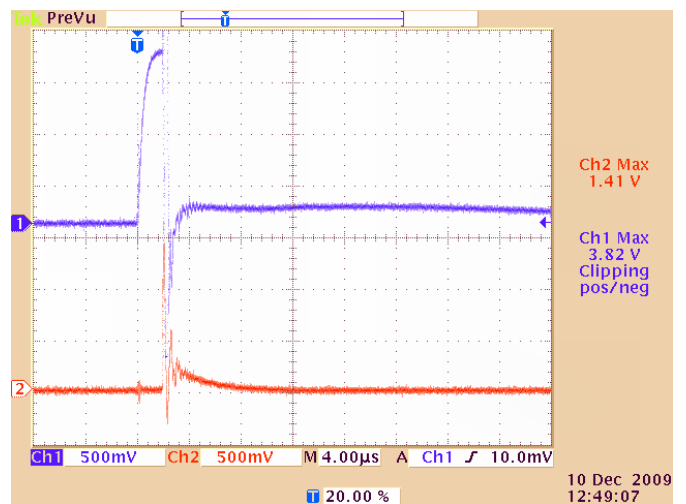
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



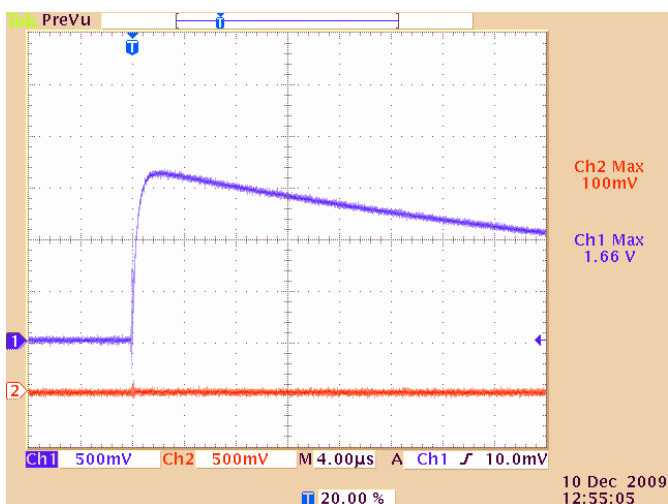
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



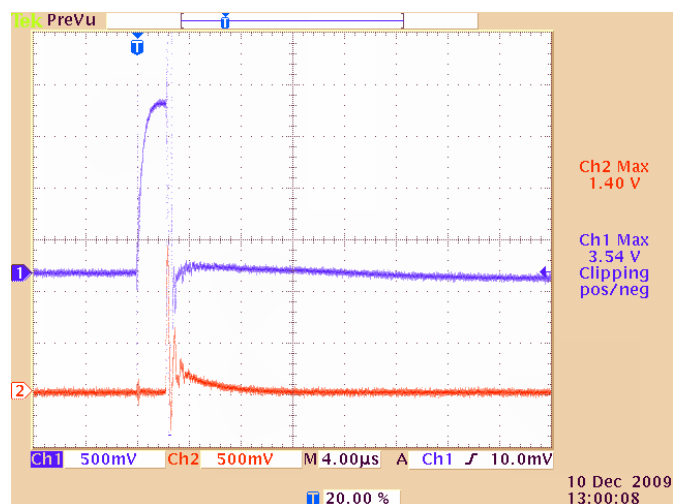
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



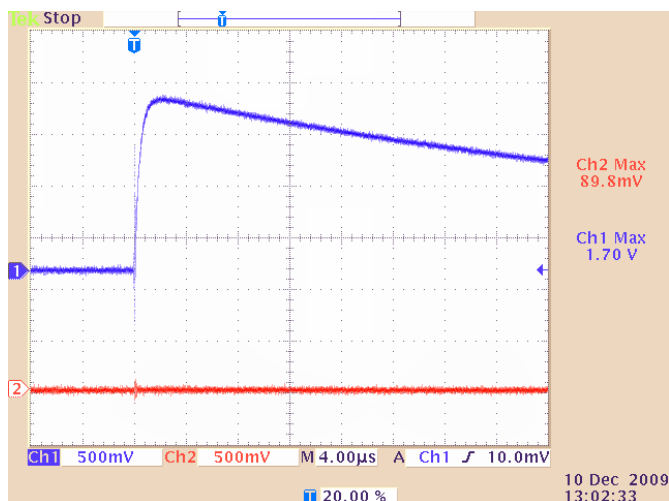
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



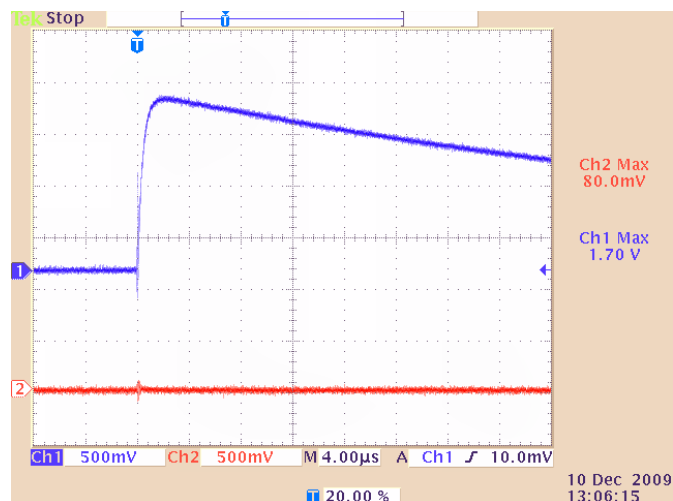
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



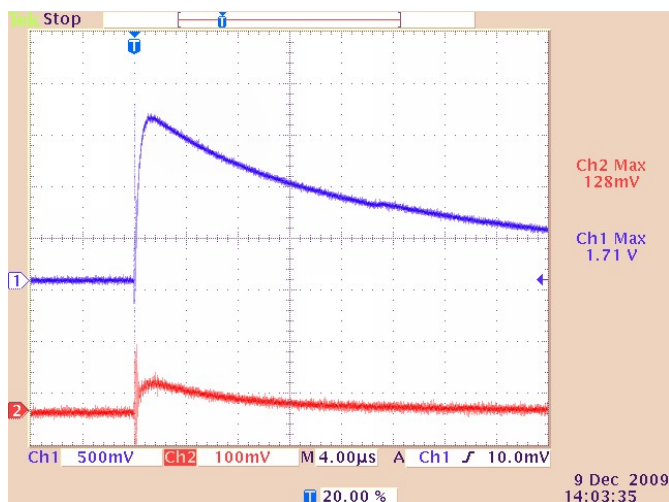
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%



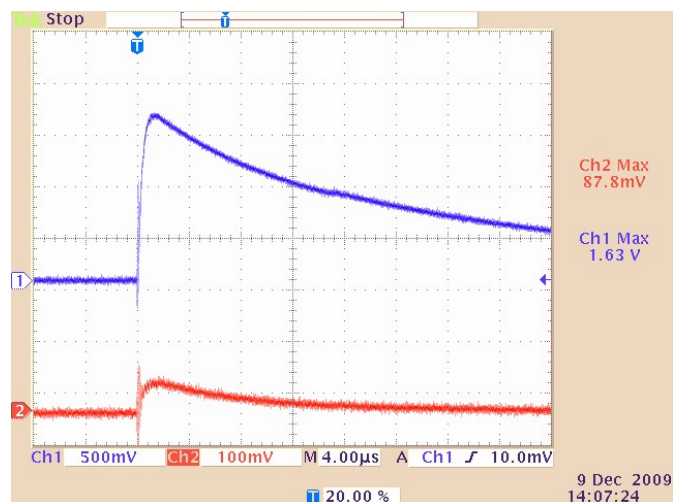
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:979mbar Υγρασία:48%

4.1.7 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος B, υγρασία 5% και θετική πολικότητα.

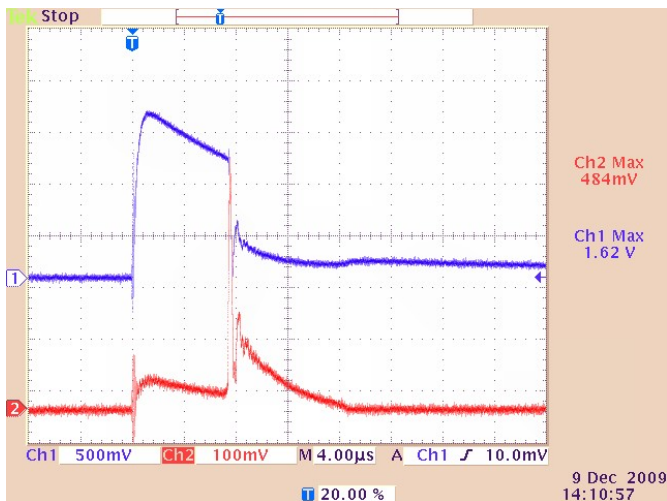
Διάκενο σπινθηριστή: 3,55cm



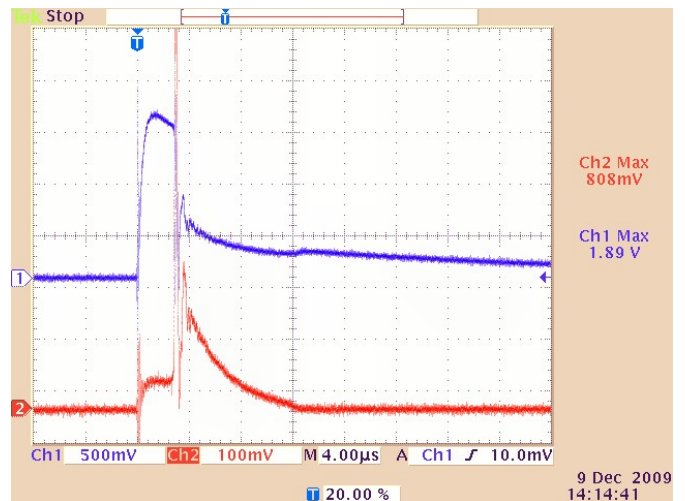
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



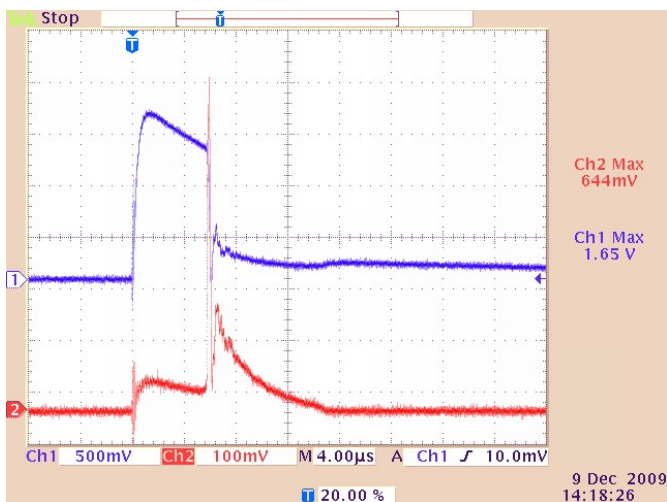
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



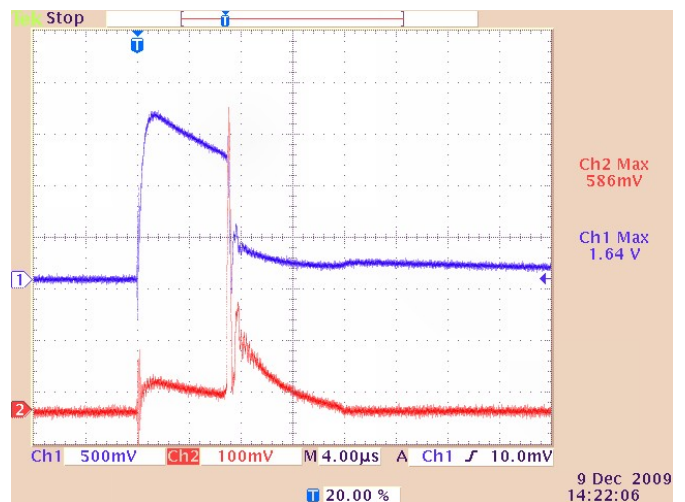
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



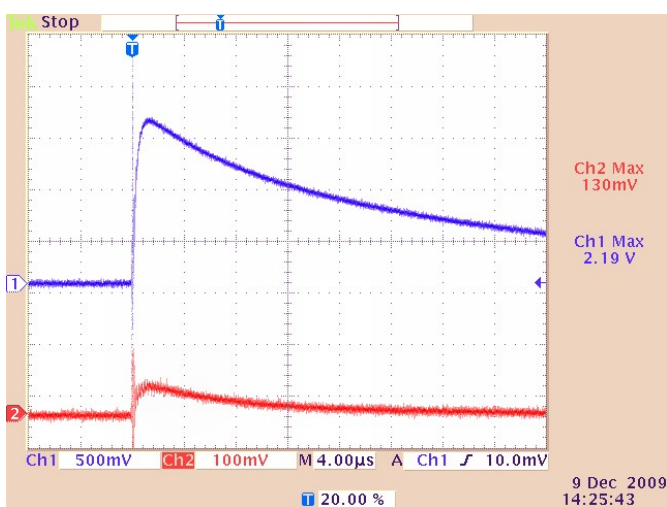
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



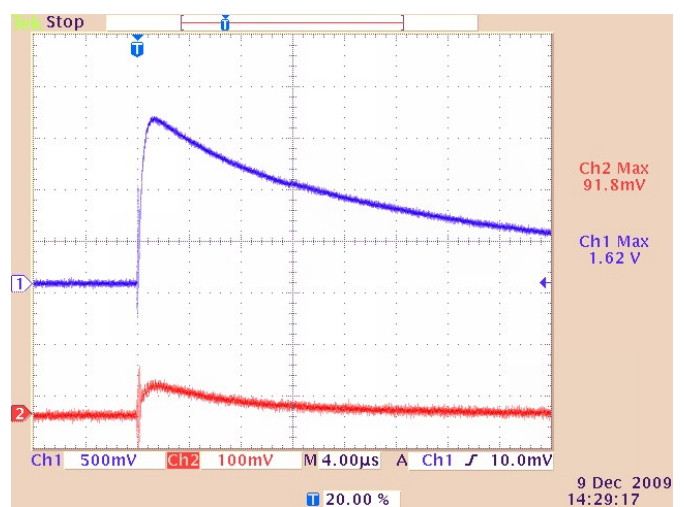
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



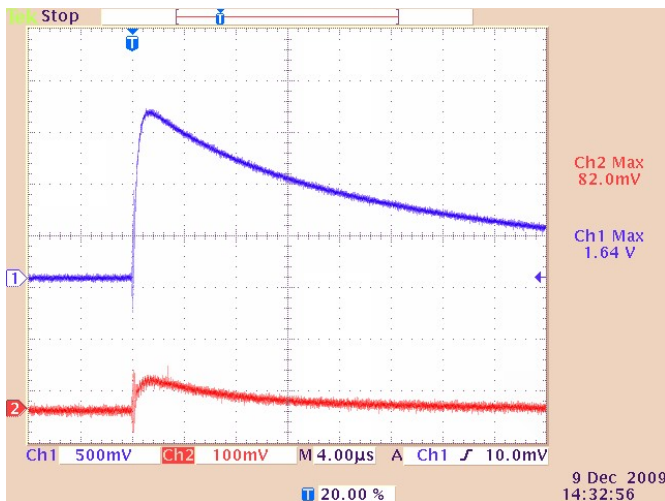
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



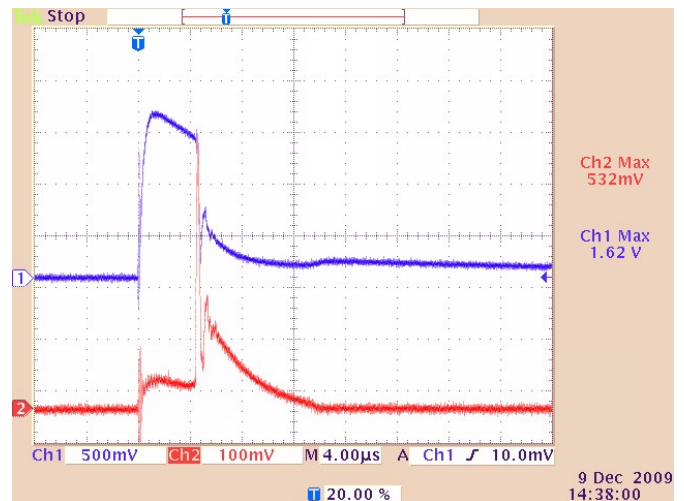
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



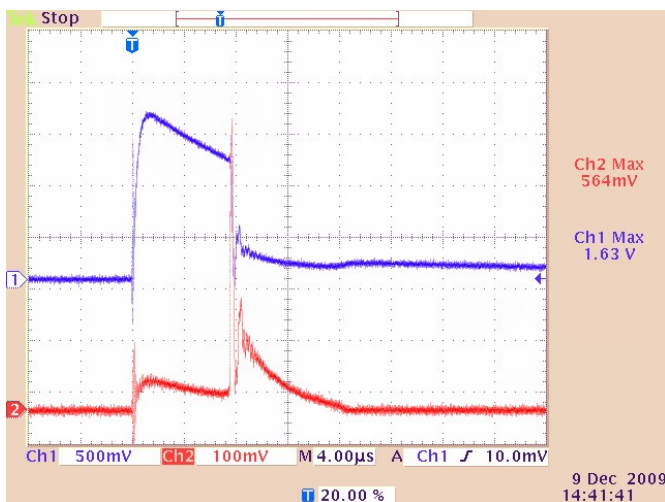
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



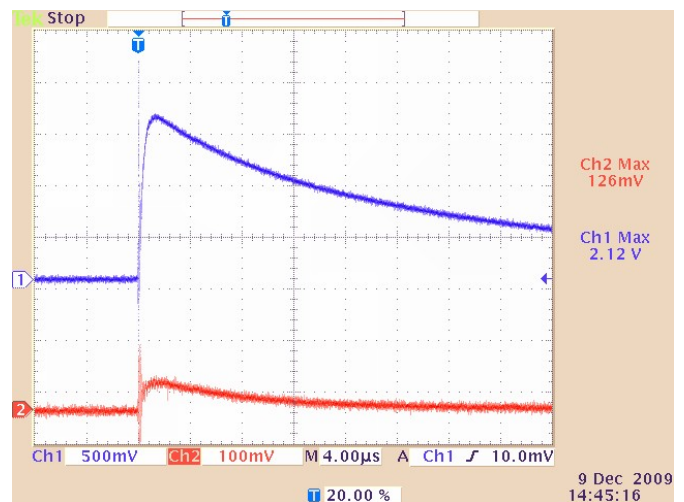
Θερμοκρασία:21° C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21° C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21° C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21° C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%

4.2 Σχόλια – Παρατηρήσεις επί των παλμογραφημάτων

Στα παλμογραφήματα για τις περιπτώσεις που το χώμα ήταν ξηρό (περιεκτικότητα σε υγρασία 0%) παρατηρούμε ότι το ρεύμα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές. Αυτό οφείλεται στην υψηλή τιμή της αντίστασης του χώματος, η οποία εμποδίζει την ανάπτυξη υψηλών τιμών ρεύματος. Αντίθετα, όταν αυξήσουμε την περιεκτικότητα του χώματος σε υγρασία παρατηρούμε ότι το ρεύμα αρχίζει να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές και η μορφή του να προσεγγίζει τη μορφή της τάσης, για εκείνες τις περιπτώσεις που δε γίνεται διάσπαση.

Όταν αυξάνουμε την περιεκτικότητα του χώματος σε νερό (ιδιαίτερα στις περιπτώσεις περιεκτικότητας σε υγρασία 10%) παρατηρούμε ότι η κυματομορφή της τάσης δεν ακολουθεί την προτυποποιημένη μορφή 1,2/50.

Το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στην τιμή της χωρητικότητας του δοκιμίου, η οποία παραλληλίζεται με τη χωρητικότητα του πυκνωτή φορτίου της κρουστικής γεννήτριας (C_ϕ) με συνέπεια τη μεταβολή των χρονικών παραμέτρων της κρουστικής κυματομορφής.

Συγκρίνοντας τα παλμογραφήματα, στα οποία έγινε διάσπαση, για διαφορετικά ποσοστά υγρασίας του χώματος παρατηρούμε ότι στην περίπτωση των ξηρών δειγμάτων η τάση και το ρεύμα σταθεροποιούνται αμέσως μετά τη διάσπαση. Όταν τα δείγματα χώματος ήταν βρεγμένα η τάση και το ρεύμα, μετά τη διάσπαση μειώνονται σταδιακά μέχρι να σταθεροποιηθούν. Αυτό το γεγονός ίσως να μπορεί να αποδοθεί στην μικρότερη αντίσταση και τη χωρητικότητα του βρεγμένου χώματος (η οποία είναι μεγαλύτερη εφόσον όσο μειώνεται η ειδική αντίσταση αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά και συνεπώς η τιμή της χωρητικότητας). Κατ' αυτόν τον τρόπο οι καμπύλες του ρεύματος και της τάσης μετά τη διάσπαση αποσβένουν ομαλότερα απ' ό,τι για ξηρό χώμα.

Στις μετρήσεις θετικής πολικότητας παρατηρείται ότι η κυματομορφή της επιβαλλόμενης στο δοκίμιο τάσης λαμβάνει αρνητικές τιμές. Αυτό το γεγονός αποδίδεται στο διαφορικό καταμεριστή. Προς διερεύνηση τούτου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της κυματομορφής της τάσης στο δείγμα χώματος Α με 0% υγρασία και θετική πολικότητα τόσο με τη χρήση του διαφορικού καταμεριστή όσο και με τη χρήση του μετρητικού συστήματος DIAS 733. Παρατηρήθηκε ότι οι κυματομορφές που λήφθηκαν από το DIAS δεν λάμβαναν αρνητικές τιμές πέραν μερικών παρασίτων. Στην περίπτωση χρήσης του διαφορικού καταμεριστή για την καταγραφή της τάσης παρατηρήθηκαν κυματομορφές όμοιες με τις ήδη ληφθείσες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επεξεργασία μετρήσεων-εξαγωγή αποτελεσμάτων

5.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας στόχο είχε τον υπολογισμό της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ μέσω της μεθόδου αυξομείωσης τάσης όπως αυτή καθορίζεται από το πρότυπο IEC 60060-1 και όπως περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 3**. Μια ποσοτική δήλωση της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ όμως, δεν μπορεί να είναι πλήρης αν δεν περιλαμβάνει, εκτός από το αποτέλεσμα μια αναφορά στην αβεβαιότητα που το συνοδεύει, δηλαδή το εύρος τιμών εκατέρωθεν της μετρούμενης από το όργανο τιμής μέσα στο οποίο βρίσκεται η αληθινή τιμή του μετρούμενου μεγέθους, με μια συγκεκριμένη πιθανότητα (επίπεδο εμπιστοσύνης). Μέσω της αβεβαιότητας, εξετάστηκε η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα των μετρήσεων που έγιναν καθώς και της πειραματικής διαδικασίας.

5.1.1 Υπολογισμός Αβεβαιότητας Τύπου A

Η αβεβαιότητα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης αποτελείται από πολλές συνιστώσες οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού τους:

- Αβεβαιότητα **τύπου A** (τυχαία αβεβαιότητα): Προέρχονται από στατιστική ανάλυση των μετρήσεων. Για μικρό αριθμό μετρήσεων υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$U_r = \frac{t \cdot s_r}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

όπου

t : ο συντελεστής Student, ο οποίος επιλέγεται από τον **Πίνακα 5.1**, με βάση τον αριθμό των μετρήσεων και το επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης.

Πίνακας 5.1 Τιμές του συντελεστή Student t' για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης συναρτήσει του αριθμού των μετρήσεων

$P\%$ n	68,3	90	95	99,7
2	1,84	6,31	12,7	-
3	1,32	2,92	4,30	-
4	1,20	2,35	3,18	9,22
5	1,14	2,13	2,78	6,62
6	1,11	2,02	2,57	5,51
7	1,09	1,94	2,45	4,90
8	1,08	1,89	2,36	4,53
9	1,07	1,86	2,31	4,28
10	1,06	1,83	2,26	4,09
20	1,03	1,73	2,09	3,45
∞	1,00	1,65	1,96	3,00

$$s_r = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (5.2)$$

όπου

u_i : οι τιμές που μετρήθηκαν

$\bar{u}$: η μέση τιμή των μετρήσεων

n : ο αριθμός των μετρήσεων

Η τυχαία αβεβαιότητα εκφρασμένη σαν ποσοστό υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$U_r(\%) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} \cdot \frac{100}{\bar{u}} \quad (5.3)$$

όπου

n : ο αριθμός των μετρήσεων

s_r : η τυπική απόκλιση

$\bar{u}$: η μέση τιμή των μετρήσεων

Οι μετρήσεις που λήφθηκαν μετά από επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων στη Matlab και στο Excell καταγράφονται στους πιο κάτω **Πίνακες (5.2-5.7)**. Συγκεκριμένα καταγράφονται οι τιμές της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$, οι τιμές του μέγιστου ρεύματος (I_{peak}) καθώς και οι αντίστοιχοι χρόνοι τους. Επιπλέον, καταγράφονται οι τιμές της αβεβαιότητας **τύπου A**, για επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο και ίσο του 95%.

Πίνακας 5.2 Μετρήσεις για δείγμα χώματος A, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	48,229	1,416	0,307	1,711
2	49,721	2,205	0,430	2,670
3	48,386	3,090	0,421	3,511
4	49,804	3,211	0,402	3,705
5	48,618	3,129	0,408	3,770
6	49,747	2,005	0,425	2,331
$\bar{u}$	49,084	2,509	0,399	2,950
s_r	0,748	0,742	0,046	0,843
U_r	0,785	0,779	0,048	0,885
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{ipeak}}(\%)$
	0,622	12,077	4,733	11,668

Πίνακας 5.3 Μετρήσεις για δείγμα χώματος Α, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	49,440	2,015	0,157	2,238
2	47,660	2,437	0,127	2,625
3	44,978	2,819	0,096	3,058
4	47,300	2,435	0,152	2,713
5	37,481	5,105	0,056	6,137
6	42,742	3,474	0,076	3,718
$\bar{u}$	44,934	3,048	0,111	3,415
s_r	4,329	1,121	0,041	1,423
U_r	4,542	1,176	0,043	1,493
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{ipeak}}(\%)$
	3,933	15,013	15,185	17,017

Πίνακας 5.4 Μετρήσεις για δείγμα χώματος Α, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	44,028	1,630	0,288	1,898
2	32,845	3,266	0,130	3,578
3	42,271	1,771	0,316	1,944
4	38,604	2,285	0,235	2,527
5	38,857	2,196	0,232	2,456
6	39,609	2,195	0,237	2,524
$\bar{u}$	39,369	2,224	0,240	2,488
s_r	3,837	0,575	0,064	0,606
U_r	4,025	0,603	0,067	0,635
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{ipeak}}(\%)$
	3,978	10,547	10,822	9,938

Πίνακας 5.5 Μετρήσεις για δείγμα χώματος Α, υπό αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	-48,966	1,602	-0,299	1,821
2	-48,845	2,703	-0,396	3,019
3	-49,190	1,615	-0,227	1,782
4	-48,033	1,346	-0,280	1,556
5	-48,333	1,248	-0,349	1,525
$\bar{u}$	-48,673	1,703	-0,310	1,941
s_r	0,476	0,581	0,065	0,617
U_r	0,592	0,723	0,081	0,767
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{ipeak}}(\%)$
	-0,438	15,266	-9,366	14,225

Πίνακας 5.6 Μετρήσεις για δείγμα χώματος Α υπό, αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	-43,871	1,901	-0,266	2,180
2	-33,900	3,317	-0,151	3,621
3	-37,364	2,828	-0,193	3,252
4	-43,365	1,896	-0,262	2,174
5	-32,717	3,477	-0,148	3,754
6	-39,187	2,558	-0,220	2,931
$\bar{u}$	-38,400	2,663	-0,207	2,985
s_r	4,665	0,678	0,052	0,689
U_r	4,895	0,711	0,054	0,723
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{ipeak}}(\%)$
	-4,960	10,391	-10,261	9,425

Πίνακας 5.7 Μετρήσεις για δείγμα χώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	67,253	4,053	0,653	4,238
2	68,925	3,627	0,615	3,796
3	69,056	2,436	0,648	2,642
4	69,278	2,954	0,659	3,124
5	69,527	3,172	0,595	3,969
6	67,318	3,484	0,620	3,643
7	69,849	1,903	0,663	2,096
8	68,970	2,160	0,660	2,373
$\bar{u}$	68,772	2,9737	0,639	3,235
s_r	0,967	0,755	0,026	0,796
U_r	0,807	0,630	0,021	0,664
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{Ipeak}}(\%)$
	0,497	8,975	1,417	8,695

Πίνακας 5.8 Μετρήσεις για δείγμα χώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%

A/A μέτρησης	$U_{50\%}(kV)$	$t_{U50\%}(\mu sec)$	$I_{peak}(A)$	$t_{ipeak}(\mu sec)$
1	47,967	7,442	0,228	7,595
2	61,660	2,783	0,389	3,016
3	54,188	5,596	0,307	5,946
4	50,859	6,729	0,279	7,106
5	57,536	4,279	0,254	4,633
6	49,802	7,198	0,269	7,715
$\bar{u}$	53,669	5,671	0,288	6,002
s_r	5,185	1,837	0,056	1,870
U_r	4,996	1,770	0,054	1,802
	$U_{U_{50\%}}(\%)$	$U_{t_{U50\%}}(\%)$	$U_{I_{peak}}(\%)$	$U_{t_{Ipeak}}(\%)$
	3,944	13,225	8,005	12,719

5.1.2 Υπολογισμός Αβεβαιότητας Τύπου B

Αβεβαιότητα **τύπου B** (συστηματική αβεβαιότητα): Έχουμε στην περίπτωση που δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Υπολογίζεται αξιοποιώντας οποιαδήποτε διαθέσιμη πληροφορία σχετικά με τη πιθανή μεταβλητότητα του μετρούμενου μεγέθους. Στην περίπτωση μας οι πληροφορίες λήφθηκαν

από πιστοποιητικά διακρίβωσης των οργάνων μέτρησης και χαρακτηριστικά τους.

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό αβεβαιοτήτων **τύπου B** είναι η (5.4)

$$U_S = k \cdot s_s = k \cdot \sqrt{s_{sa}^2 + s_{sg}^2} \quad (5.4)$$

όπου

s_{sa} : η τυπική απόκλιση για την περίπτωση ορθογώνιας κατανομής

s_{sg} : η τυπική απόκλιση για Γκαουσιανή κατανομή

Η αβεβαιότητα **τύπου B** υπολογίζεται με αντικατάσταση του παράγοντα της κανονικής κατανομής στη υπολογιζόμενη τυπική απόκλιση. Στους πιο κάτω **Πίνακες (5.9-5.12)** παρατίθεται η συμβολή των τμημάτων της αβεβαιότητας και οι κατανομές πιθανότητας για $U_{50\%}$, $t_{U50\%}$, I_{peak} και t_{Ipeak} . Η επεκταμένη συστηματική αβεβαιότητα δίνεται για επίπεδο εμπιστοσύνης μεγαλύτερο ή και ίσο του 95% και γι' αυτό το λόγο ο συντελεστής κατανομής είναι ίσος με 2. Η αβεβαιότητα σχετικά με την ακρίβεια καταγραφής της τάσης, τη γραμμικότητα τάσης του διαφορικού καταμεριστή, το εύρος συχνότητας του παλμογράφου, το εύρος συχνότητας του διαφορικού καταμεριστή και το 'droop rate' προέρχονται από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης του εξοπλισμού και δίνονται για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Έτσι ο συντελεστής κατανομής επιλέγεται να είναι ίσος με 2. Η αβεβαιότητα ανάλυσης του παλμογράφου αποτελείται από την αβεβαιότητα του 'half digit for zero' και του 'last digit for reading'. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του παλμογράφου [2], αυτές οι παράμετροι είναι ίσες με 0,031%. Επομένως η αβεβαιότητα ανάλυσης του παλμογράφου λαμβάνεται ίση με 0,062% με ορθογώνια κατανομή πιθανότητας εξαιτίας του ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις για το επίπεδο εμπιστοσύνης.

Πίνακας 5.9 Συστηματική αβεβαιότητα για την τάση διάσπασης $U_{50\%}$

		Τιμή		Κατανομή πιθανότητας	Συντελεστής κατανομής	$u(y)$	$u^2(y)$	
1	Ανάλυση του παλμογράφου	0,062	%	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	0,036	0,0013	Εγχειρίδιο παλμογράφου
2	Ακρίβεια καταγραφής της τάσης	0,085	%	Κανονική	2	0,043	0,0018	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης παλμογράφου
3	Γραμμικότητα της τάσης του διαφορικού καταμεριστή	0,036	%	Κανονική	2	0,018	0,0003	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης MD 200
						$u_c(y)$	$\Sigma u_i^2(y)$	
4	Πρότυπη συνδυασμένη αβεβαιότητα		%	Κανονική		0,058	0,0034	
	Επεκταμένη αβεβαιότητα (U_s)		%	Κανονική	2	0,117		

Πίνακας 5.10 Συστηματική αβεβαιότητα για τη χρονική στιγμή της διάσπασης $t_{U50\%}$

		Τιμή		Κατανομή πιθανότητας	Συντελεστής κατανομής	$u(y)$		
1	Ανάλυση του παλμογράφου	0,062	%	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	0,036	0,0013	Εγχειρίδιο παλμογράφου
2	Οριζόντια ανάλυση παλμογράφου	0,167	%	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	0,096	0,0093	Εγχειρίδιο παλμογράφου
3	Ακρίβεια καταγραφής της τάσης	0,085	%	Κανονική	2	0,043	0,0018	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης παλμογράφου
4	Εύρος συχνότητας του παλμογράφου	0,290	%%	Κανονική	2	0,145	0,0210	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης παλμογράφου
5	Εύρος συχνότητας του διαφορικού καταμεριστή	0,112	%	Κανονική	2	0,056	0,0031	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης MD 200
						$u_c(y)$	$\Sigma u_i^2(y)$	
6	Πρότυπη συνδυασμένη αβεβαιότητα		%	Κανονική		0,191	0,0365	
	Επεκταμένη αβεβαιότητα (U_s)		%	Κανονική	2	0,382		

Πίνακας 5.11 Συστηματική αβεβαιότητα για το ρεύμα κορυφής I_{peak}

		Τιμή		Κατανομή πιθανότητας	Συντελεστής κατανομής	$u(y)$	$u^2(y)$	
1	Ανάλυση του παλμογράφου	0,062	%	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	0,036	0,0013	Εγχειρίδιο παλμογράφου
2	Ακρίβεια καταγραφής της τάσης	0,085	%	Κανονική	2	0,043	0,0018	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης παλμογράφου
3	Amplitude error	0,130	%	Κανονική	2	0,065	0,0042	13243 πιστοποιητικό διακρίβωσης Pearson
						$u_c(y)$	$\Sigma u_i^2(y)$	
4	Πρότυπη συνδυασμένη αβεβαιότητα		%	Κανονική		0,086	0,0073	
	Επεκταμένη αβεβαιότητα (U_s)		%	Κανονική	2	0,171		

Πίνακας 5.12 Συστηματική αβεβαιότητα για τη χρονική στιγμή μεγιστοποίησης του ρεύματος t_{Ipeak}

		Τιμή		Κατανομή πιθανότητας	Συντελεστής κατανομής	$u(y)$		
1	Ανάλυση του παλμογράφου	0,062	%	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	0,036	0,0013	Εγχειρίδιο παλμογράφου
2	Οριζόντια ανάλυση παλμογράφου	0,071	%	Ορθογώνια	$\sqrt{3}$	0,064	0,0041	Εγχειρίδιο παλμογράφου
4	Ακρίβεια καταγραφής της τάσης	0,085	%	Κανονική	2	0,043	0,0018	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης παλμογράφου
5	Εύρος συχνότητας του παλμογράφου	0,290	%%	Κανονική	2	0,145	0,0210	E211108C πιστοποιητικό διακρίβωσης παλμογράφου
						$u_c(y)$	$\Sigma u_i^2(y)$	
6	Πρότυπη συνδυασμένη αβεβαιότητα		%	Κανονική		0,168	0,0282	
	Επεκταμένη αβεβαιότητα (U_s)		%	Κανονική	2	0,336		

5.1.3 Υπολογισμός ολικής αβεβαιότητας.

Η ολική αβεβαιότητα δίνεται από τη σχέση:

$$U = \sqrt{U_s^2 + U_r^2} \quad (5.5)$$

Στους **Πίνακες 5.13- 5.18** παρατίθενται οι συνολικές αβεβαιότητες για όλα τα δείγματα χώματος και τις περιεκτικότητες σε υγρασία που μελετήθηκαν.

Πίνακας 5.13 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος A, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	49,084 kV	0,622	0,117	0,633
$t_{U50\%}$	2,636 μsec	12,077	0,382	12,083
I_{peak}	0,399A	4,733	0,171	4,736
$t_{i\text{peak}}$	4,374 μsec	11,668	0.336	11,673

Πίνακας 5.14 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος A, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 5%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	44,934 kV	3,933	0,117	3,935
$t_{U50\%}$	3,165 μsec	15,013	0,382	15,018
I_{peak}	0,111A	15,185	0,171	15,186
$t_{i\text{peak}}$	4,261 μsec	17,017	0.336	17,020

Πίνακας 5.15 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος Α, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	39,369 kV	3,978	0,117	3,980
$t_{U50\%}$	2,316 μsec	10,547	0,382	10,554
I_{peak}	0,240A	10,822	0,171	10,823
t_{ipeak}	3,447 μsec	9,938	0.336	9,944

Πίνακας 5.15 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος Α, υπό αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	-48,673 kV	-0,438	0,117	0,453
$t_{U50\%}$	1,992 μsec	15,266	0,382	15,271
I_{peak}	0,310A	-9,366	0,171	9,368
t_{ipeak}	2,867 μsec	14,225	0.336	14,229

Πίνακας 5.16 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος Α, υπό αρνητική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	-38,400 kV	-4,960	0,117	4,961
$t_{U50\%}$	2,826 μsec	10,391	0,382	10,398
I_{peak}	0,207A	-10,261	0,171	10,262
t_{ipeak}	4,005 μsec	9,425	0.336	9,431

Πίνακας 5.17 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 0%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	68,772 kV	0,497	0,117	0,511
$t_{U50\%}$	3,161 μsec	8,975	0,382	8,983
I_{peak}	0,639A	1,417	0,171	1,427
t_{ipeak}	4,812 μsec	8,695	0.336	8,701

Πίνακας 5.18 Ολική αβεβαιότητα για δείγμα χώματος B, υπό θετική πολικότητα και περιεκτικότητα σε υγρασία 10%

	$\bar{U}$	$U_r(\%)$	$U_s(\%)$	$U(\%)$
$U_{50\%}$	53,669 kV	3,944	0,117	3,946
$t_{U50\%}$	5,835 μsec	13,225	0,382	13,231
I_{peak}	0,288A	8,005	0,171	8,007
t_{ipeak}	7,109 μsec	12,719	0.336	12,723

5.1.4 Υπολογισμός κρίσιμης πεδιακής έντασης

Η κρίσιμη ένταση E_C μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια του τύπου:

$$E_C = \frac{U_{50\%}}{d} \quad (5.6)$$

όπου $U_{50\%}$ είναι η τάση διάσπασης

d είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (7cm)

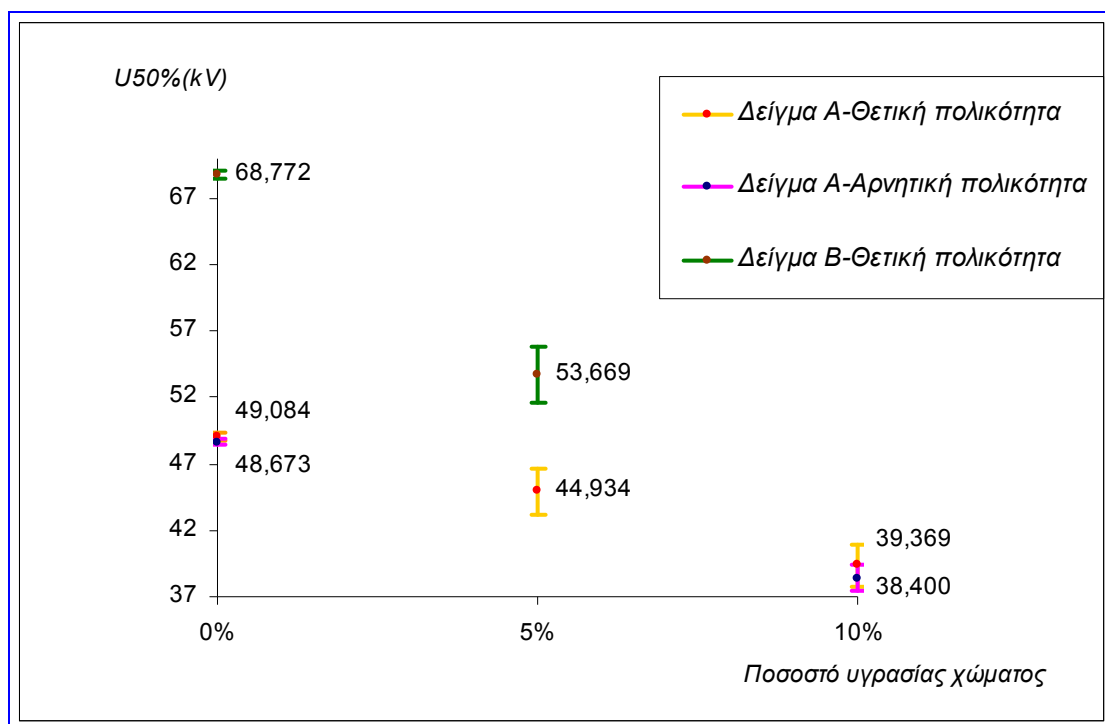
Οι τιμές της κρίσιμης πεδιακής έντασης που υπολογίστηκαν παρατίθενται στο πιο κάτω ραβδόγραμμα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η Nor και οι συνεργάτες της χρησιμοποιώντας ως δοκίμιο ξερή άμμο τοποθετημένη σε διάταξη παραλλήλων πλακών υπολόγισαν τιμές πεδιακών εντάσεων της τάξης των 7,9kV/cm και 9kV/cm για θετική και αρνητική πολικότητα, αντίστοιχα.

Από τον τύπο (5.6) καθίσταται σαφές ότι για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης απαιτείται η τιμή της τάσης διάσπασης.

Στο **Σχήμα 5.1** παρουσιάζονται οι τιμές $U_{50\%}$, που προέκυψαν για δείγμα χώματος Α. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και οι αβεβαιότητες των αντίστοιχων μετρήσεων, όπως υπολογίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Παρατηρούμε ότι το χώμα Β παρουσιάζει υψηλότερες τιμές τάσης διάσπασης για την ίδια περιεκτικότητα σε υγρασία απ' ότι το δείγμα χώματος Α, όταν εφαρμόζεται τάση θετικής πολικότητας.

Επίσης, από τα **Σχήματα 5.1-5.2** παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα του χώματος σε υγρασία τόσο στο δείγμα Α όσο και στο δείγμα Β, η τιμή της τάσης διάσπασης ($U_{50\%}$) μειώνεται.



Σχήμα 5.1 $U_{50\%}$ για δείγμα χώματος Α υπό θετική και αρνητική πολικότητα και για δείγμα χώματος Β υπό θετική πολικότητα

Στο **Σχήμα 5.2** παρατηρείται ότι αυξανόμενης της περιεκτικότητας σε υγρασία τόσο στο δείγμα χώματος Α όσο και στο δείγμα χώματος Β, η τιμή της κρίσιμης πεδιακής έντασης E_c μειώνεται. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως η τιμή της E_c στο δείγμα χώματος Α υπό θετική πολικότητα, είναι πολύ κοντά στην τιμή της E_c στο ίδιο δείγμα χώματος για αρνητική πολικότητα.

Η αβεβαιότητα της κρίσιμης πεδιακής έντασης υπολογίζεται από τον τύπο (5.7)

$$U = \frac{U_{50\%}}{d} \cdot \sqrt{\frac{U_{50\%}^2}{U_{50\%}^2} + \frac{U_d^2}{d^2}} \quad (5.7)$$

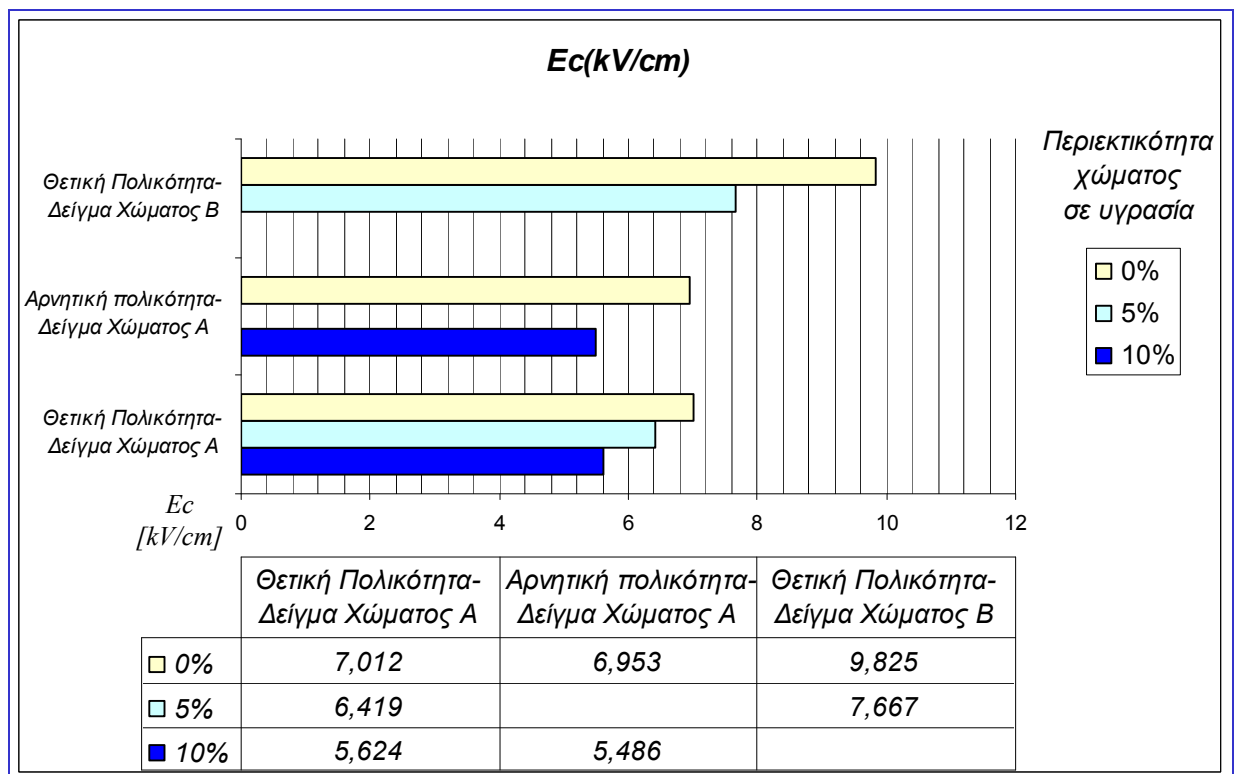
όπου $U_{50\%}$ η τάση διάσπασης

d η απόσταση μεταξύ των παράλληλων πλακών

$U_{50\%}$ η αβεβαιότητα της τάσης διάσπασης

U_d η αβεβαιότητα της απόστασης μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών

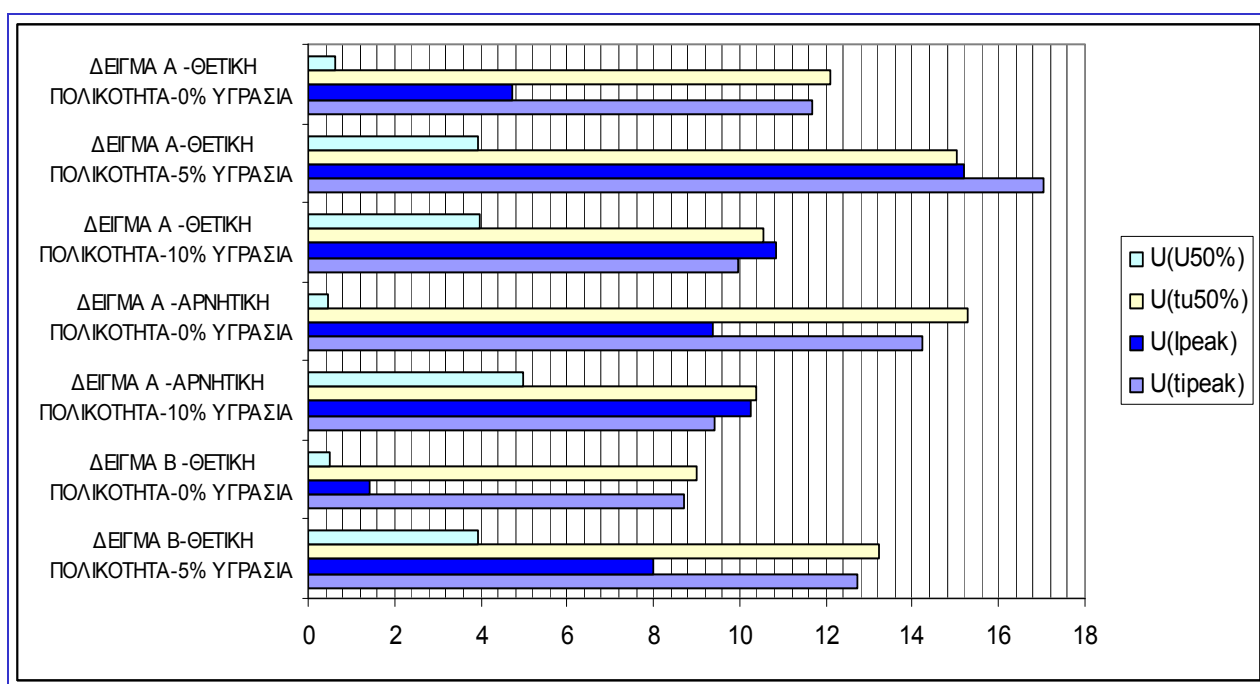
Ωστόσο, δεν μπορεί να υπολογιστεί επειδή για τον προσδιορισμό της, πέραν της αβεβαιότητας της τάσης διάσπασης είναι απαραίτητη και η αβεβαιότητα της απόστασης μεταξύ των δύο παράλληλων πλακών, τα όργανα μέτρησης της οποίας δεν είναι διακριβωμένα.



Σχήμα 5.2 Γραφική παράσταση της μεταβολής της κρίσιμης πεδιακής έντασης με την περιεκτικότητα σε υγρασία και το είδος χώματος.

5.1.5 Επεξεργασία μετρήσεων-Εξαγωγή αποτελεσμάτων

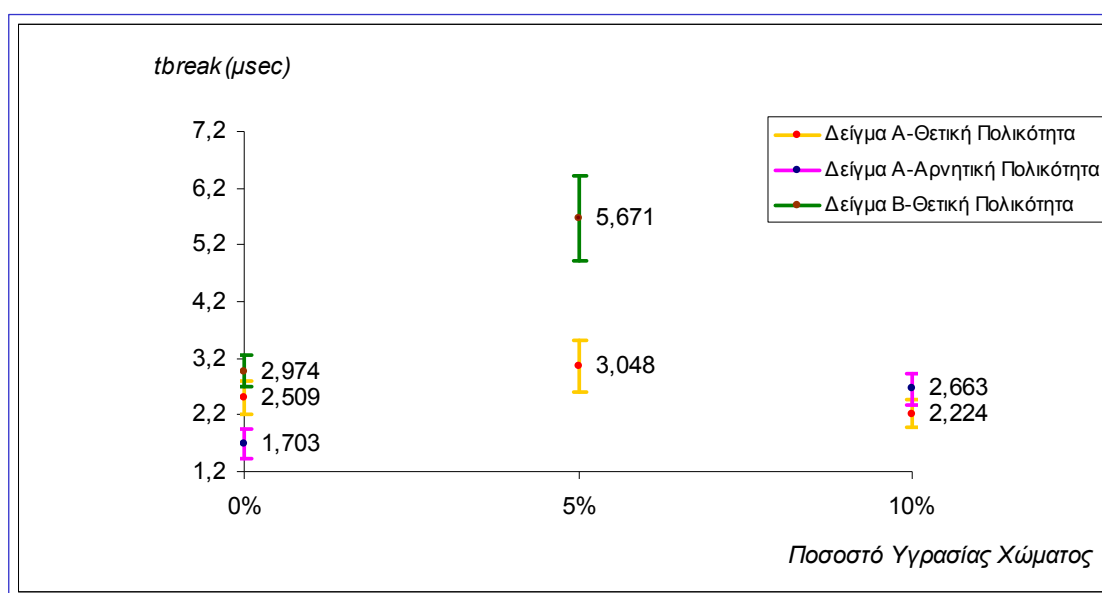
Από μια πρώτη ματιά της τιμές της ολικής αβεβαιότητας που υπολογίστηκαν για την τάση διάσπασης $U_{50\%}$, το χρόνο διάσπασης $t_{U50\%}$, το ρεύμα κορυφής I_{peak} , και το χρόνο μεγιστοποίησης του ρεύματος προκύπτει ότι τη μικρότερη αβεβαιότητα παρουσιάζει η τάση διάσπασης. Η αβεβαιότητα του ρεύματος κορυφής είναι μεγαλύτερη από αυτή της τάσης διάσπασης και μικρότερη από της αβεβαιότητες των πιο πάνω χρονικών παραμέτρων (**Σχήμα 5.3**) που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα εξαιτίας των άγνωστων στοχαστικών και στατιστικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος τη στιγμή της κρούσης.



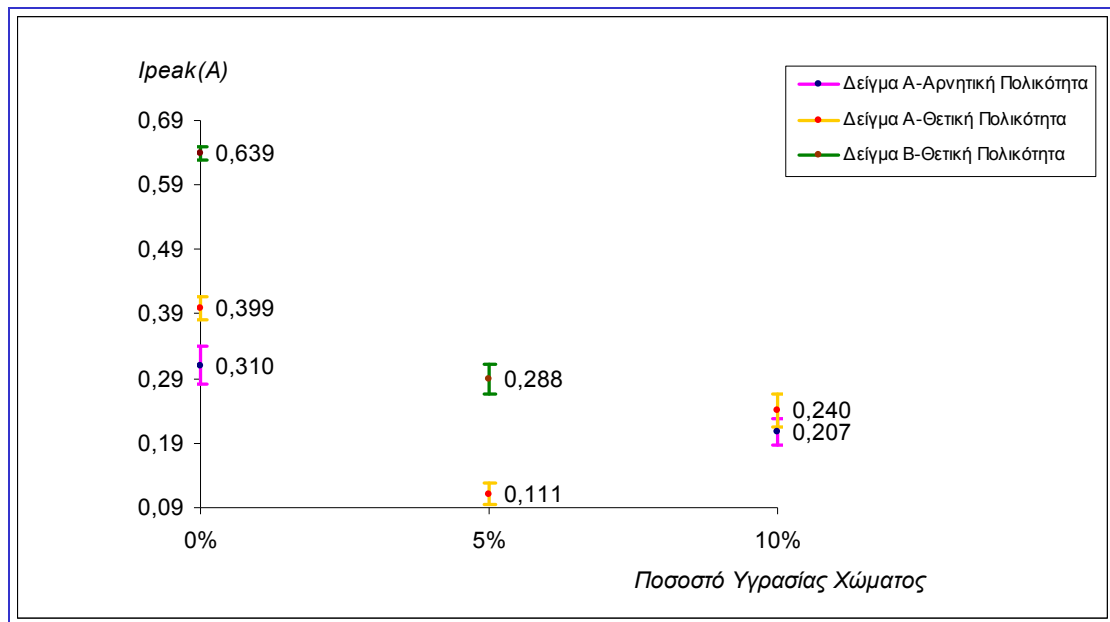
Σχήμα 5.3 Ολικές αβεβαιότητες για δείγματα χώματος Α και Β, για κάθε περιεκτικότητα σε υγρασία που διερευνήθηκε.

Παρατηρείται ακόμα πως η αβεβαιότητα για δείγμα χώματος Α είναι μεγαλύτερη παρά για δείγμα χώματος Β για κάθε παράμετρο πλην της τάσης διάσπασης για την οποία οι τιμές των αβεβαιοτήτων είναι παρόμοιες. Επιπλέον η αβεβαιότητα αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία από 0% σε 10% και αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής του νερού στο έδαφος.

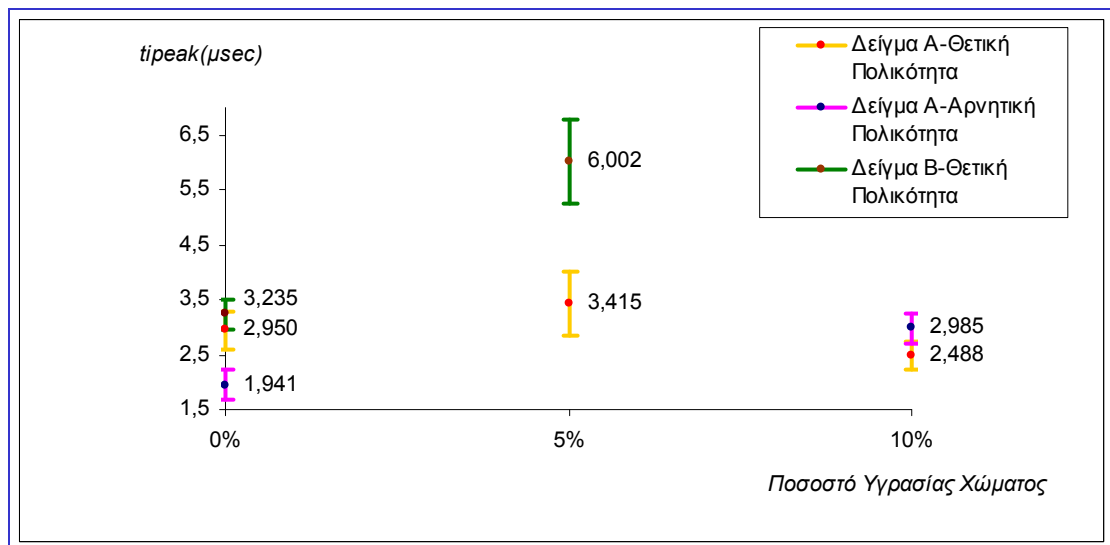
Στα **Σχήματα 5.4-5.6** παρατηρείται ότι το δείγμα χώματος B παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από το δείγμα χώματος A (και για τις δύο πολικότητες τάσης) τόσο για τους χρόνους διάσπασης και ρεύματος κορυφής όσο και για το ρεύμα κορυφής. Όσο αφορά το δείγμα χώματος A, αυτό που μπορεί να σημειωθεί είναι πως για περιεκτικότητα σε υγρασία 0% παρουσιάζει μεγαλύτερο χρόνο διάσπασης και χρόνο ρεύματος κορυφής υπό την επιβολή θετικής πολικότητας ενώ για περιεκτικότητα σε υγρασία 10% υπό την επιβολή αρνητικής πολικότητας.



Σχήμα 5.4 Αβεβαιότητες χρόνου διάσπασης για δείγμα χώματος A υπό αρνητική και θετική πολικότητα και για δείγμα χώματος B υπό θετική πολικότητα τάσης.



Σχήμα 5.5 Αβεβαιότητες ρεύματος κορυφής για δείγμα χώματος A υπό αρνητική και θετική πολικότητα και για δείγμα χώματος B υπό θετική πολικότητα τάσης.



Σχήμα 5.6 Αβεβαιότητες χρόνου ρεύματος κορυφής για δείγμα χώματος A υπό αρνητική και θετική πολικότητα και για δείγμα χώματος B υπό θετική πολικότητα τάσης.

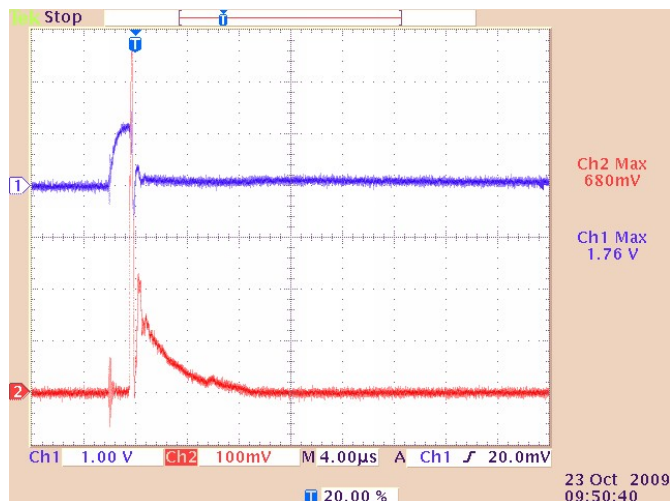
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Παλμογραφήματα

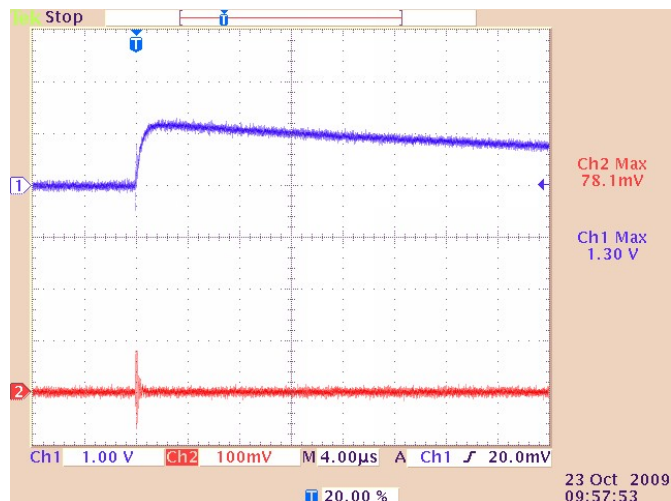
Για την εύρεση της τάσης διάσπασης $U_{50\%}$ ακολουθήθηκε η πειραματική διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 της διπλωματικής μου εργασίας. Τα παλμογραφήματα που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας παρατίθενται πιο κάτω διαχωρισμένα με βάση το δείγμα χώματος που χρησιμοποιήθηκε, την υγρασία του χώματος και την πολικότητα της κρουστικής τάσης που εφαρμόστηκε. Κάτω από κάθε παλμογράφημα καταγράφονται η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$, η υγρασία του περιβάλλοντος σε ποσοστιαία αναλογία καθώς επίσης και η ατμοσφαιρική πίεση σε mbar. Σε κάποιες περιπτώσεις μετρήσεις της ίδιας πολικότητας, υγρασίας χώματος και για ίδιο διάκενο σπινθηριστή έγιναν πάνω από μία φορές, λόγω του στατιστικού χαρακτήρα που προβάλλει η διάσπαση του χώματος.

Π.1.1 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος A, υγρασία 0% και θετική πολικότητα.

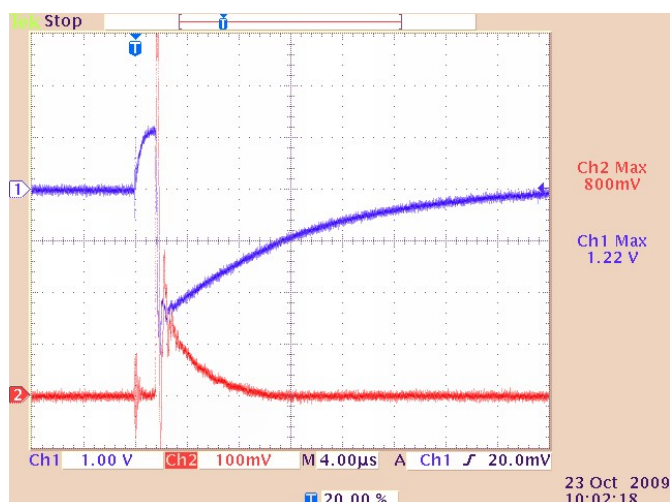
Π.1.1.1 Διάκενο σπινθηριστή: 2cm.



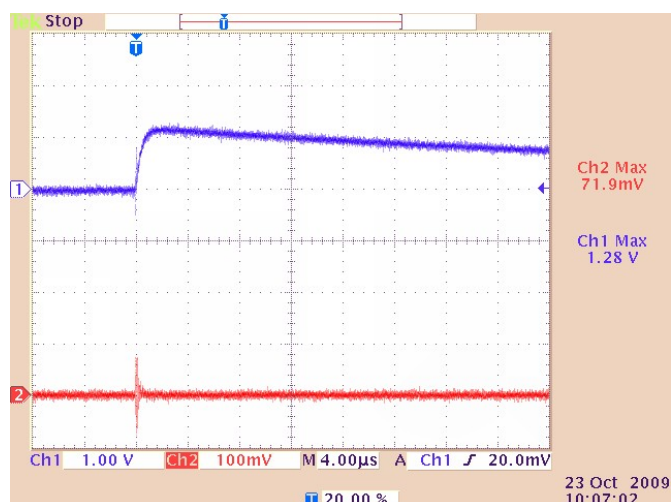
Θερμοκρασία: 24°C Πίεση: 996mbar Υγρασία: 50%



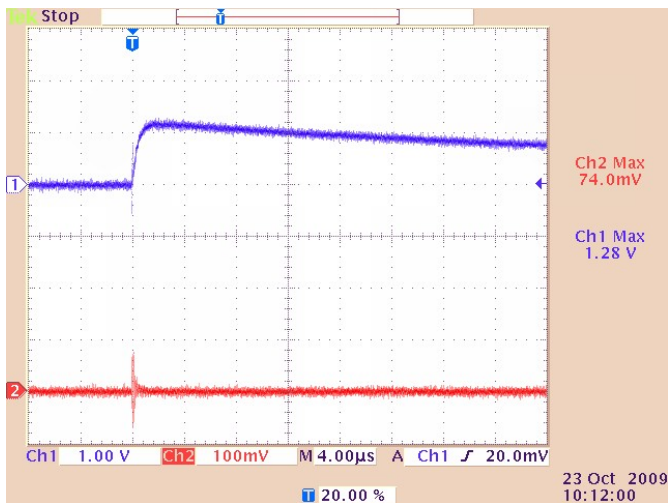
Θερμοκρασία: 24°C Πίεση: 996mbar Υγρασία: 50%



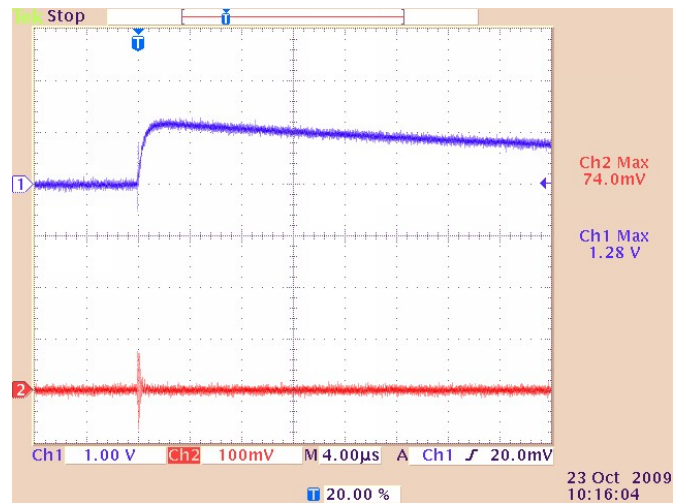
Θερμοκρασία: 24°C Πίεση: 996mbar Υγρασία: 50%



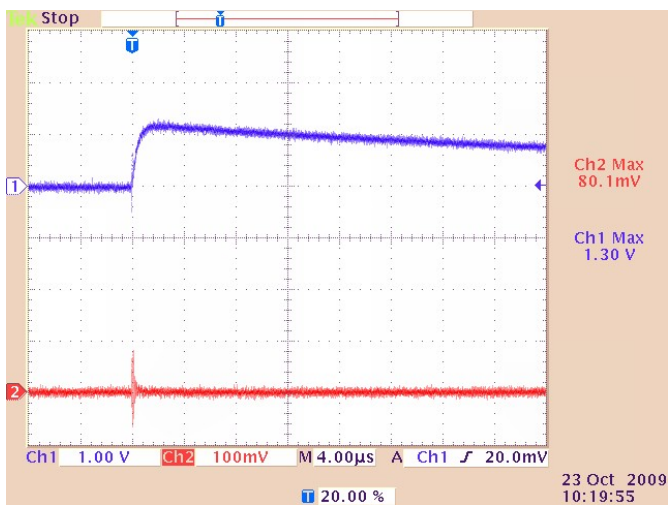
Θερμοκρασία: 24°C Πίεση: 996mbar Υγρασία: 50%



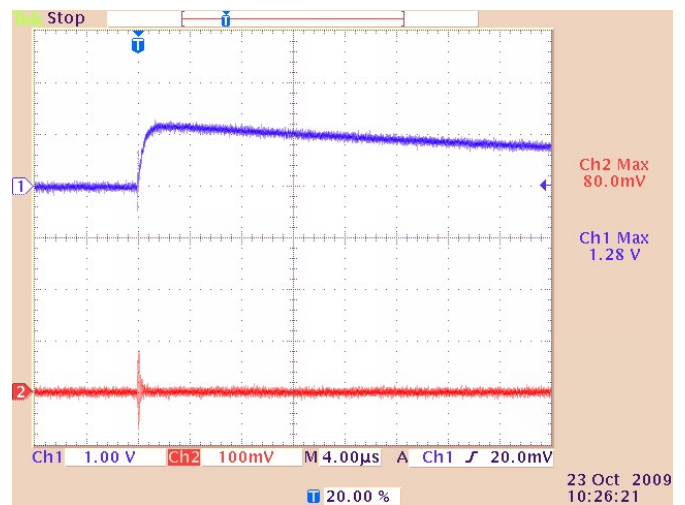
Θερμοκρασία:24° C Πίεση:996mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:24° C Πίεση:996mbar Υγρασία:50%

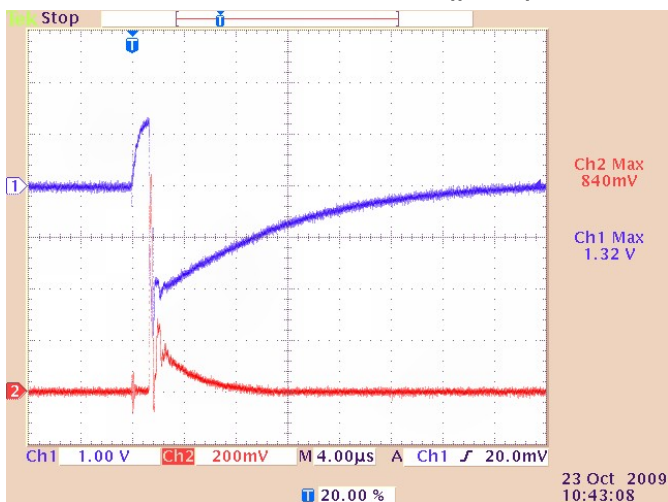


Θερμοκρασία:24° C Πίεση:996mbar Υγρασία:50%

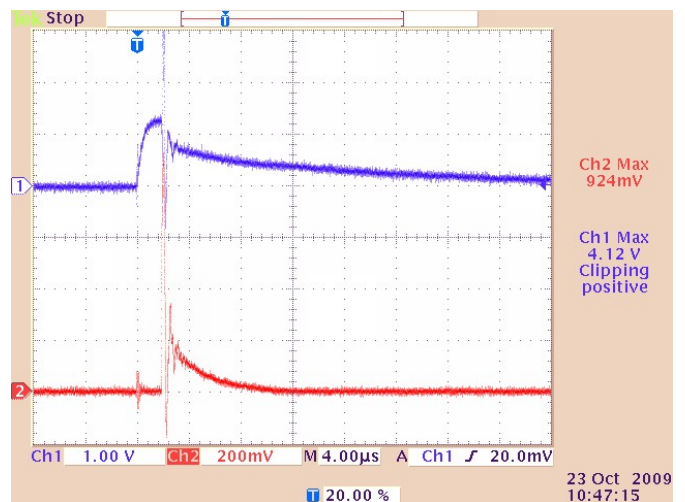


Θερμοκρασία:24° C Πίεση:996mbar Υγρασία:50%

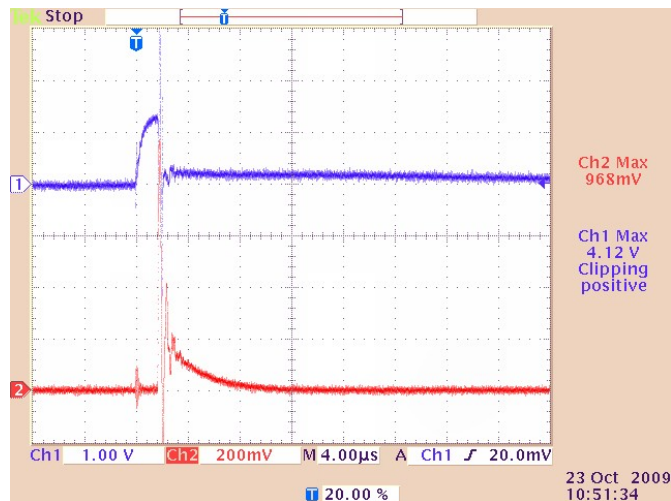
Π.1.1.2 Διάκενο σπινθηριστή: 2,3cm



Θερμοκρασία:25° C Πίεση:996mbar Υγρασία:49%



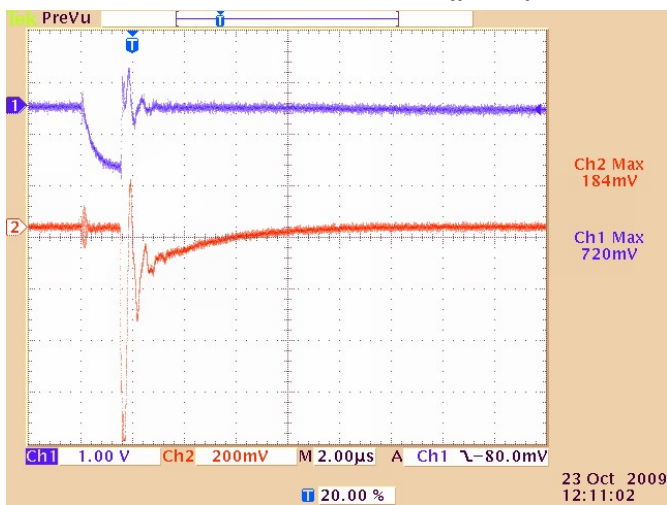
Θερμοκρασία:25° C Πίεση:996mbar Υγρασία:49%



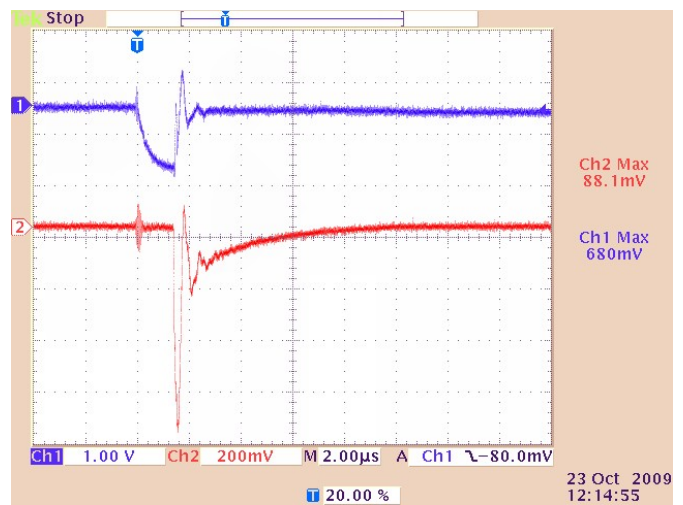
Θερμοκρασία: 25°C Πίεση: 996mbar Υγρασία: 49%

Π.1.2 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος A, υγρασία 0% και αρνητική πολικότητα.

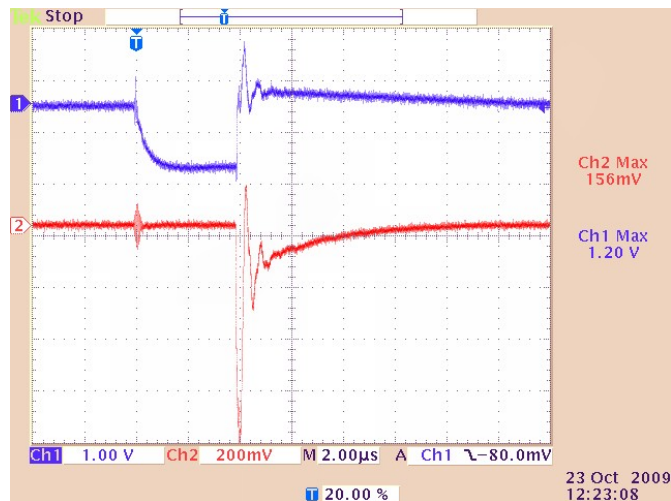
Π.1.2.1 Διάκενο σπινθηριστή: 2,1cm



Θερμοκρασία: 24°C Πίεση: 995mbar Υγρασία: 49%

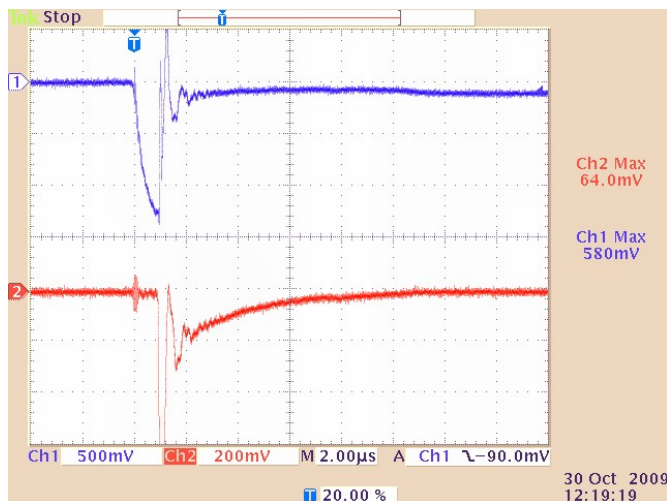


Θερμοκρασία: 24°C Πίεση: 995mbar Υγρασία: 49%

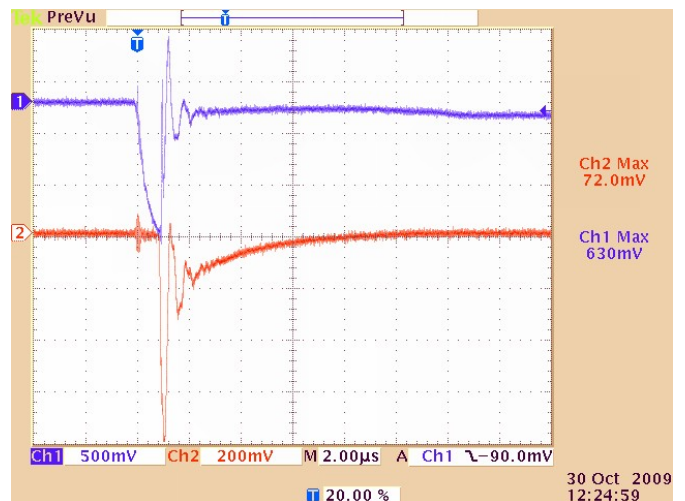


Θερμοκρασία:24°C Πίεση:995mbar Υγρασία:49%

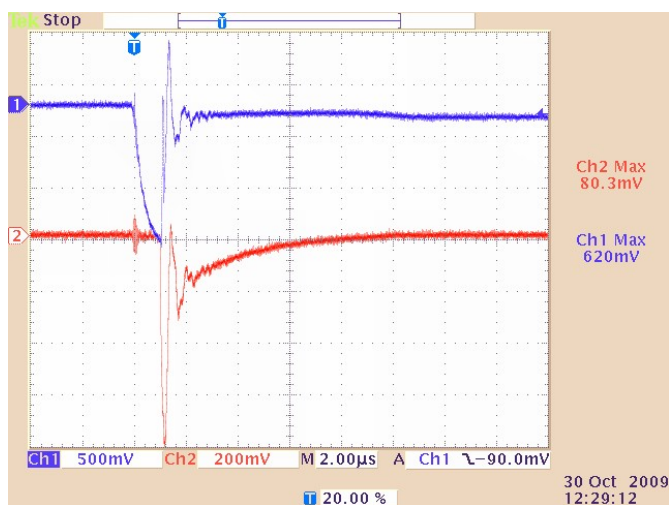
Π.1.2.2 Διάκενο σπινθηριστή: 2,5cm



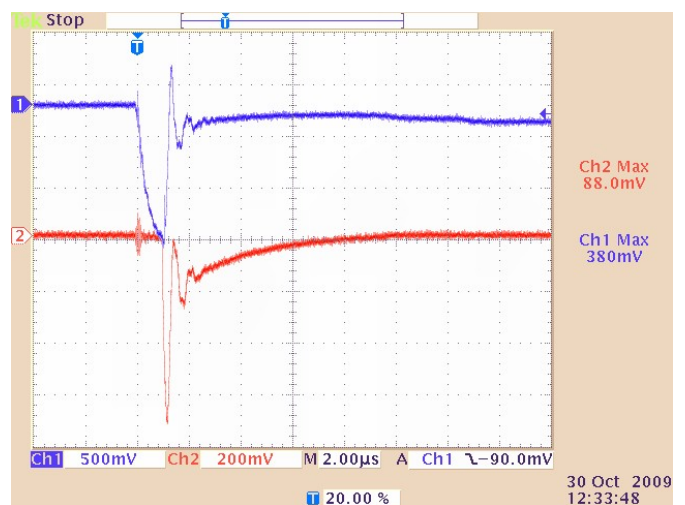
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:49%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:49%

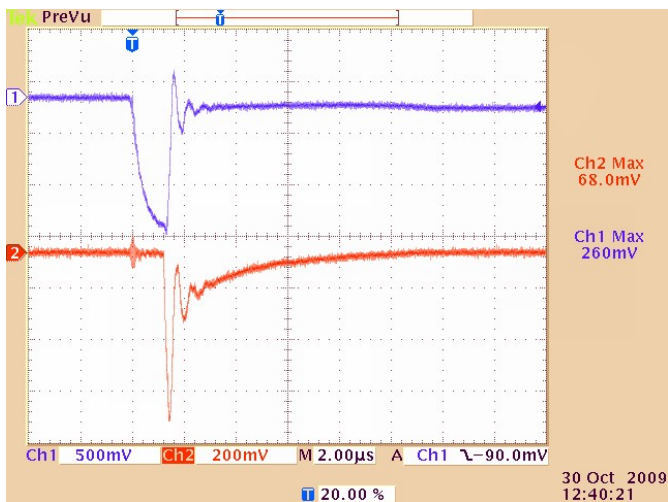


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:49%

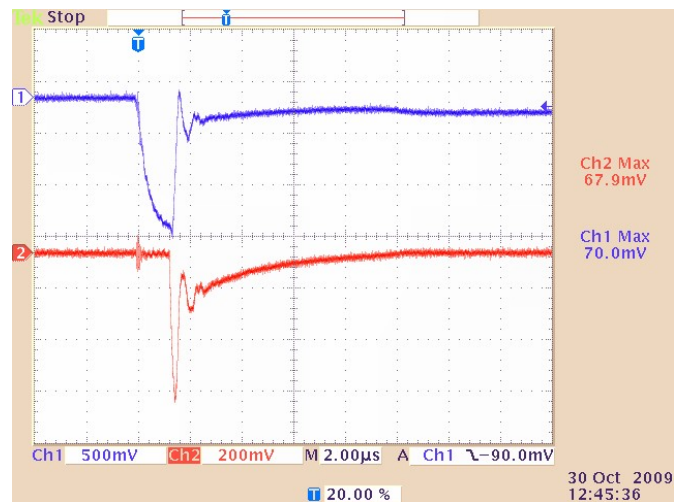


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:49%

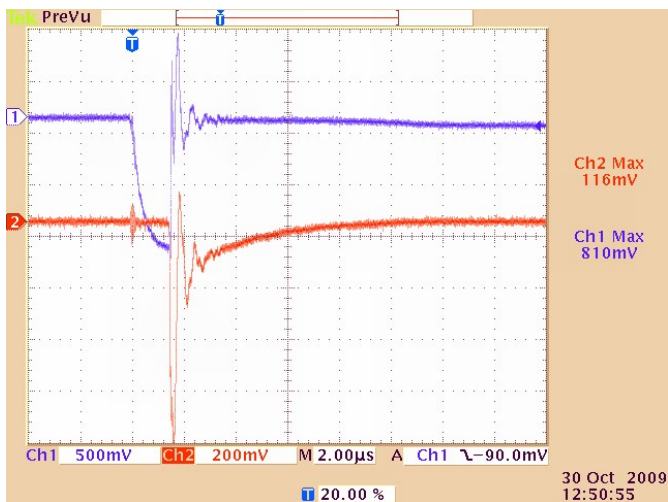
Π.1.2.3 Διάκενο σπινθηριστή: 2,3cm



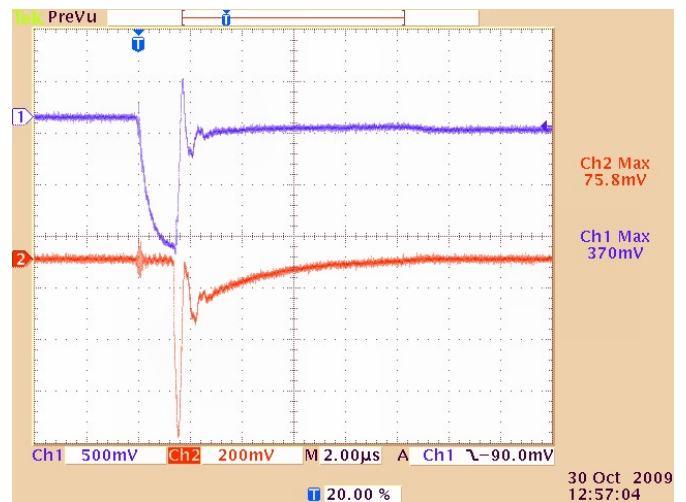
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

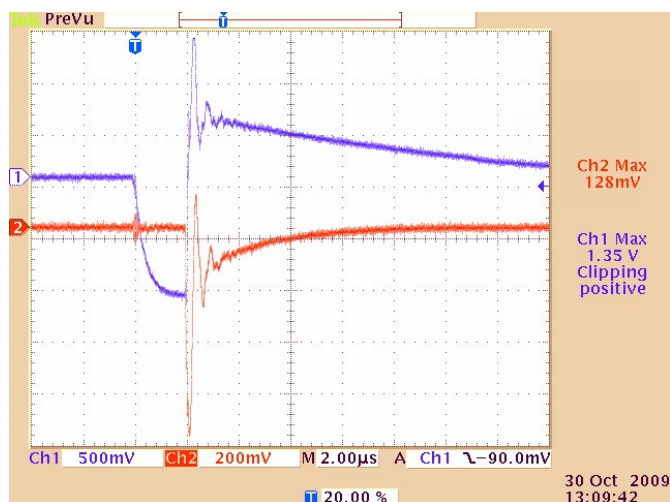


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

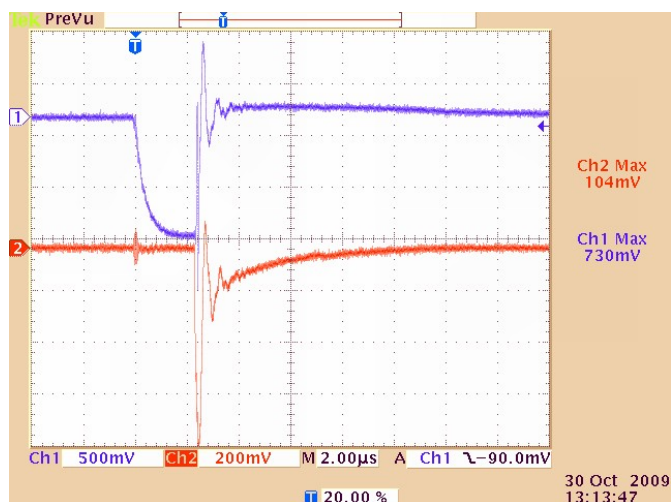


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

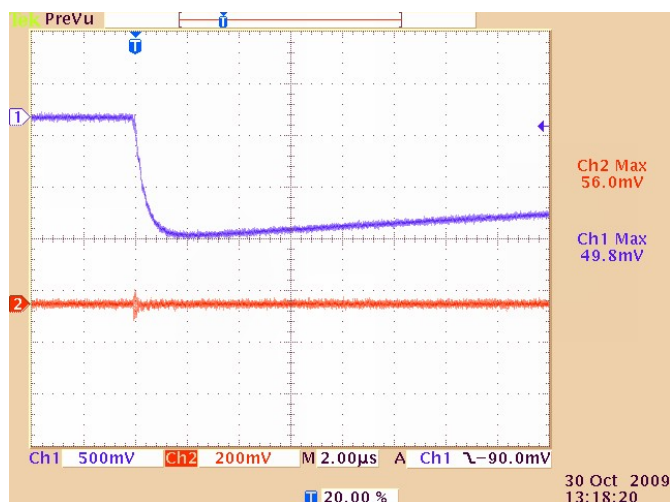
Π.1.2.4 Διάκενο σπινθηριστή: 2cm (α' σειρά μετρήσεων)



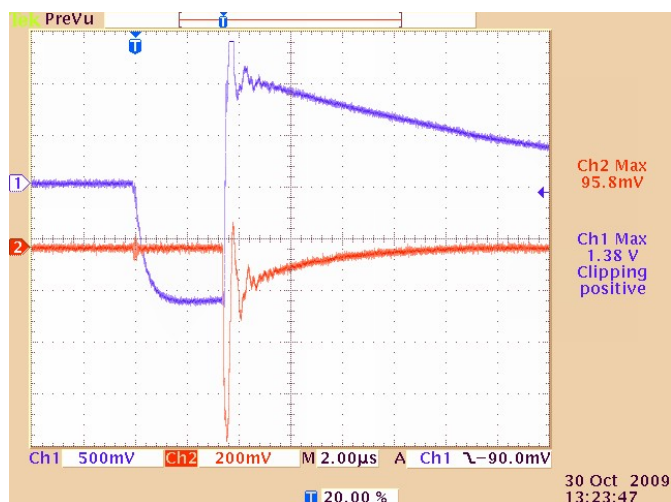
Θερμοκρασία:23° C Πίεση:994mbar Υγρασία:48%



Θερμοκρασία:23° C Πίεση:994mbar Υγρασία:48%

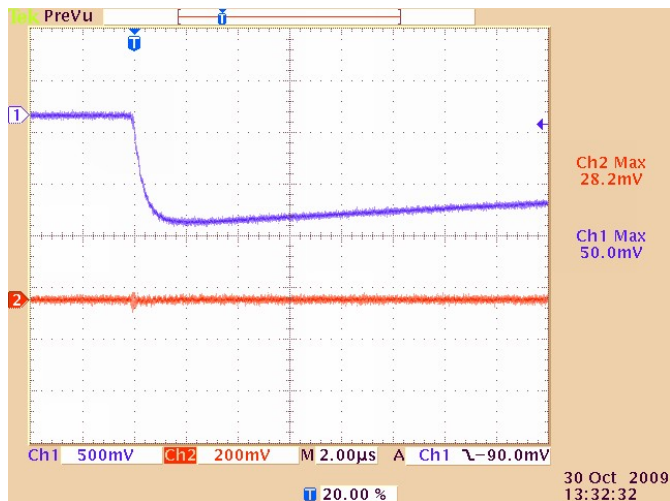


Θερμοκρασία:23° C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

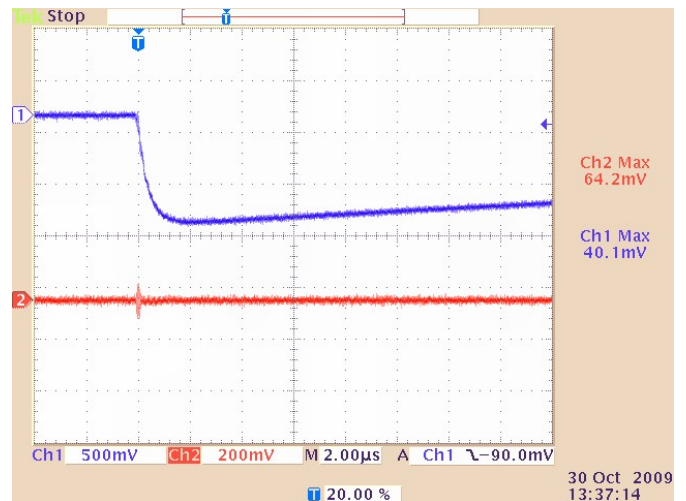


Θερμοκρασία:23° C Πίεση:994mbar Υγρασία:48%

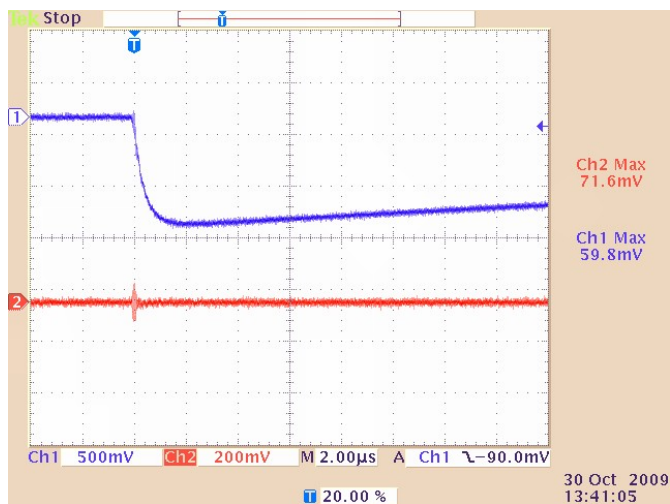
Π.1.2.5 Διάκενο σπινθηριστή: 1,8cm



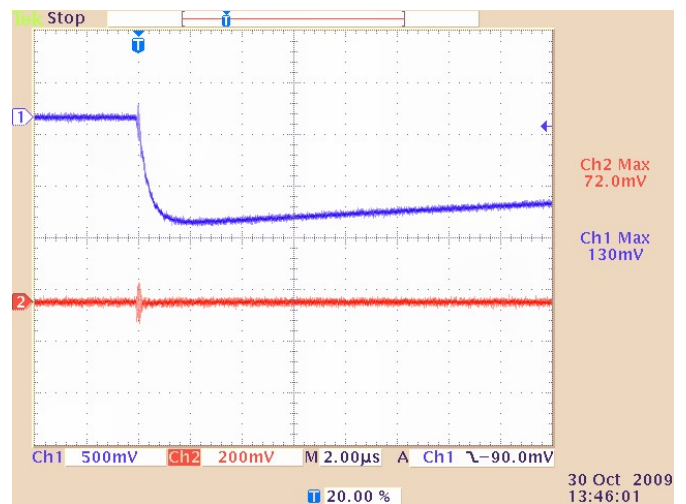
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

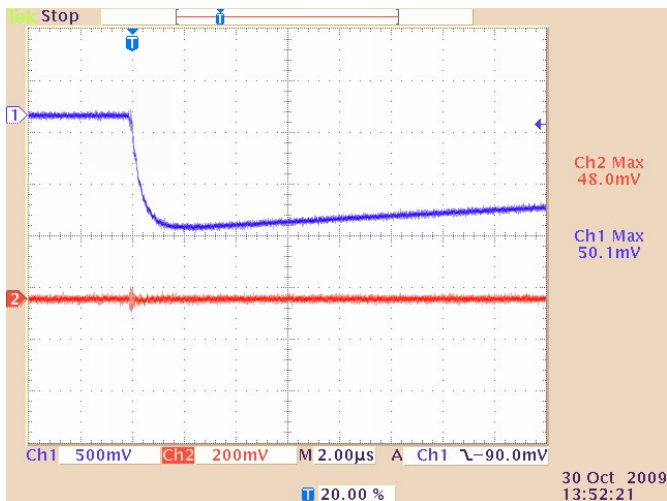


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

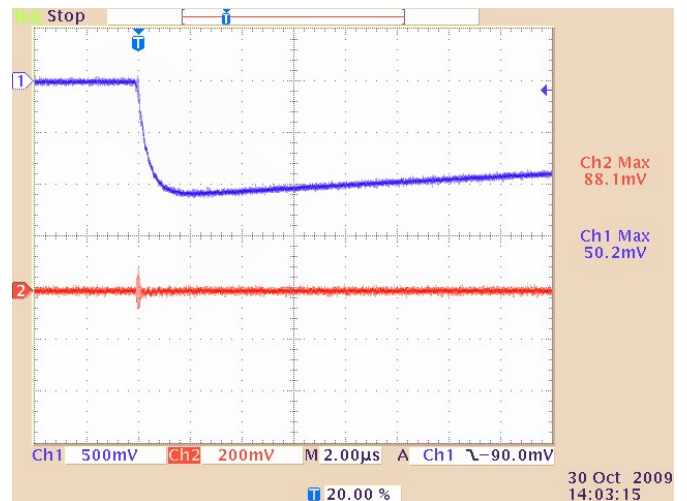


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

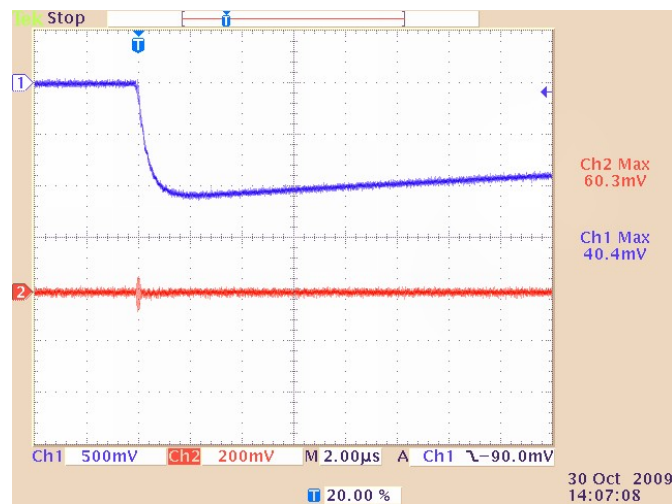
Π.1.2.6 Διάκενο σπινθηριστή: 1,9cm



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

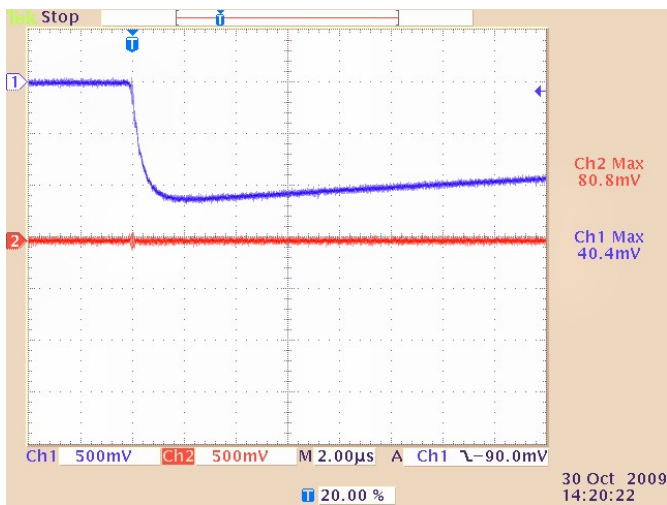


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

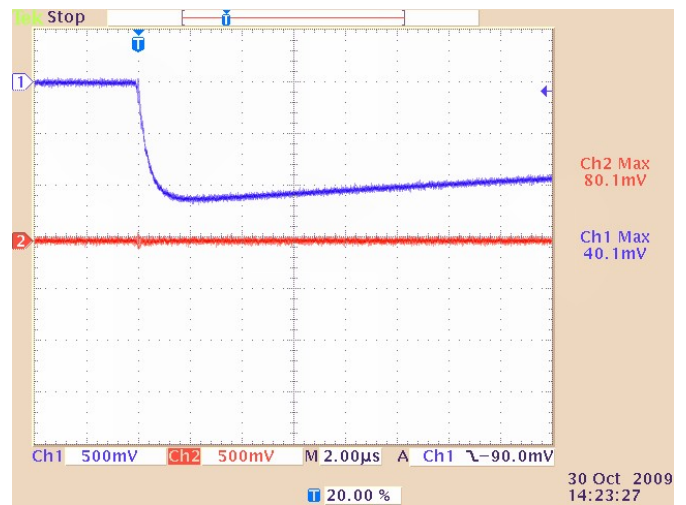


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%

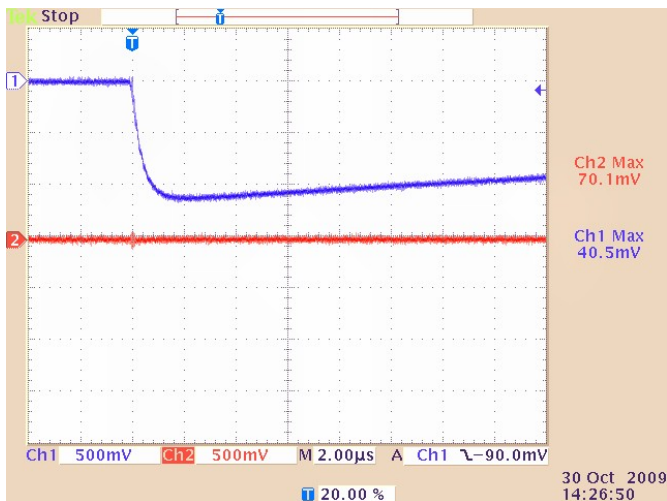
Π.1.2.7 Διάκενο σπινθηριστή: 1,95cm



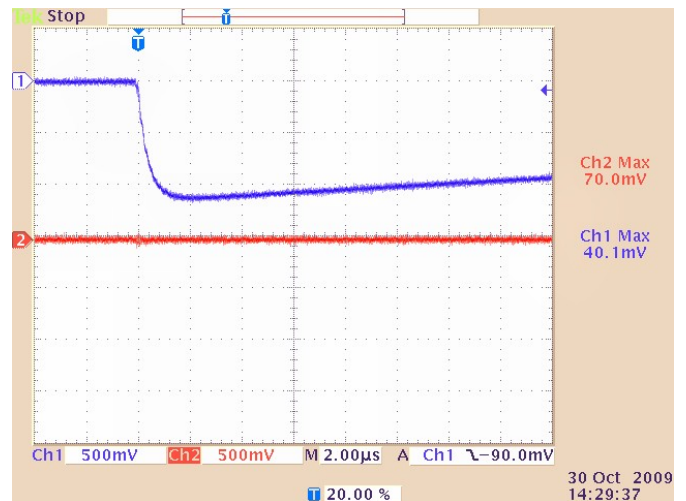
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%

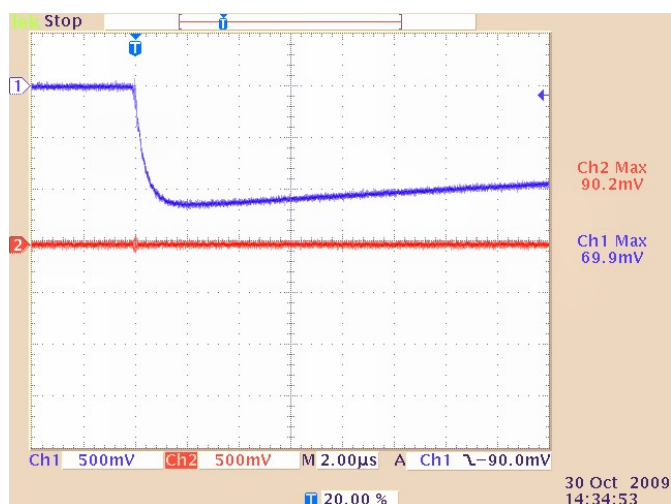


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%

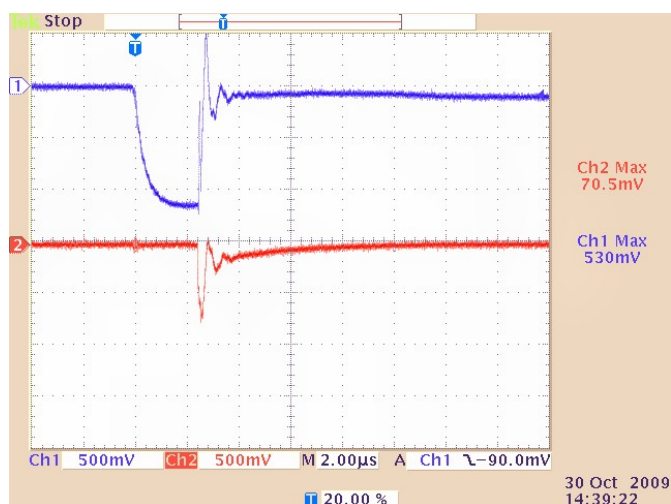


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%

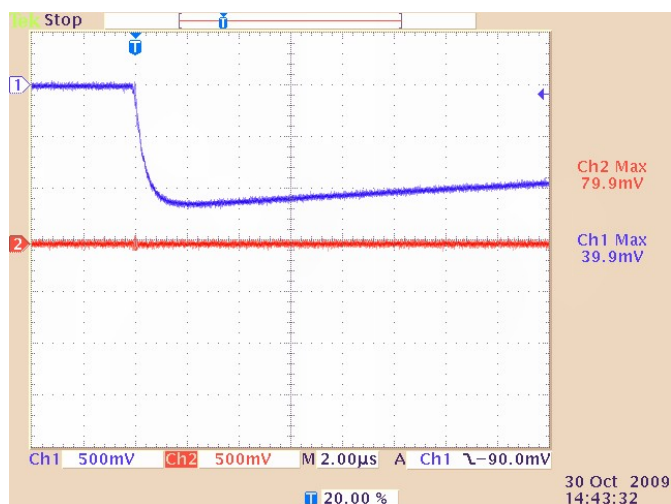
Π.1.2.8 Διάκενο σπινθηριστή: 2cm (β' σειρά μετρήσεων)



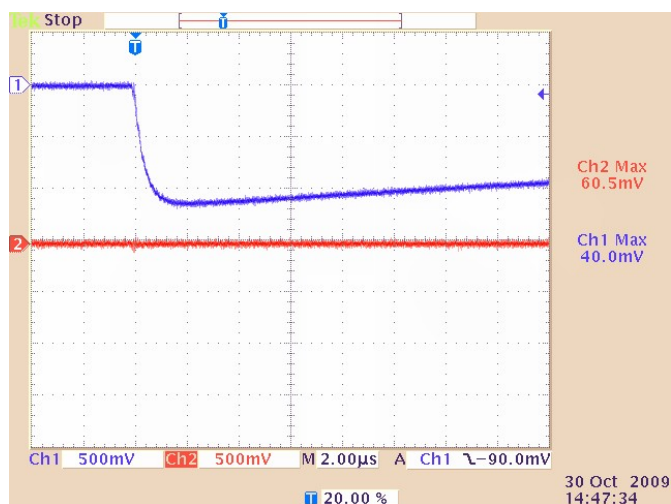
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%



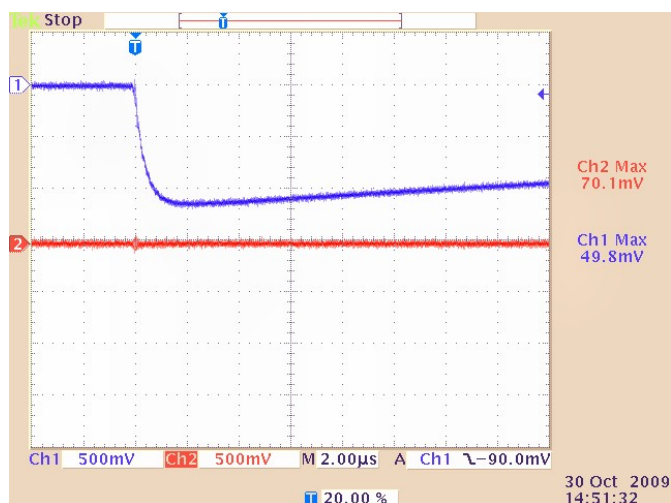
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%



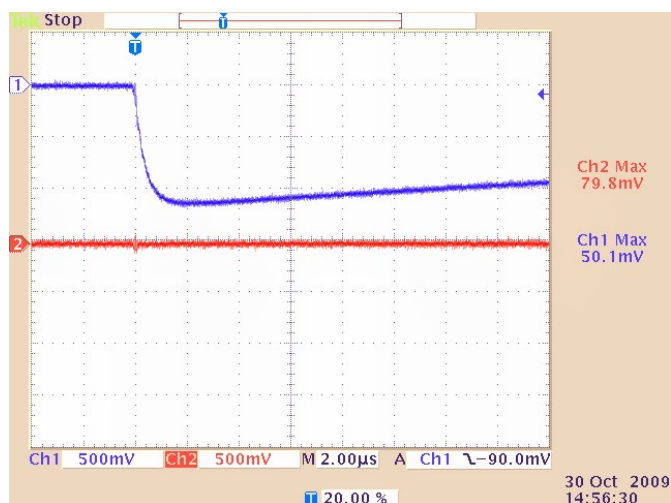
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%

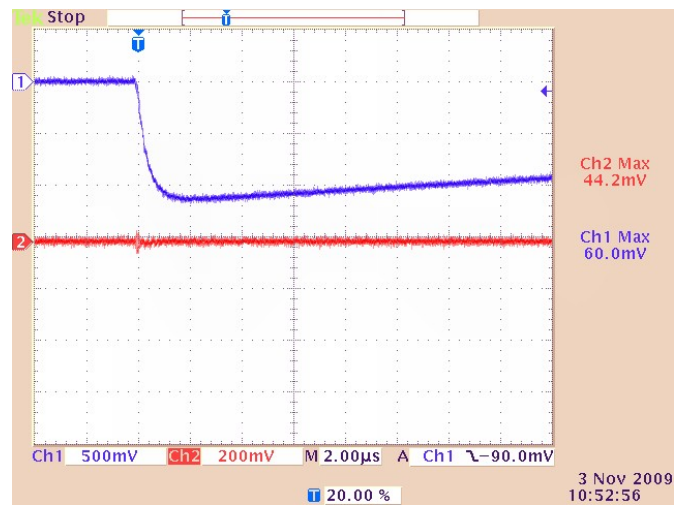
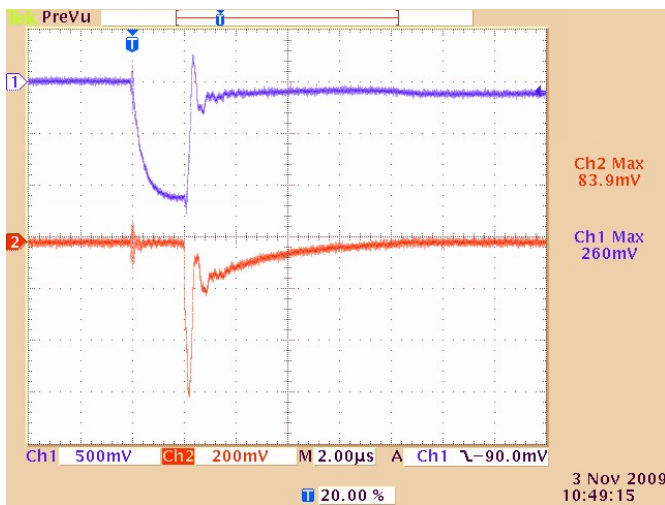


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%



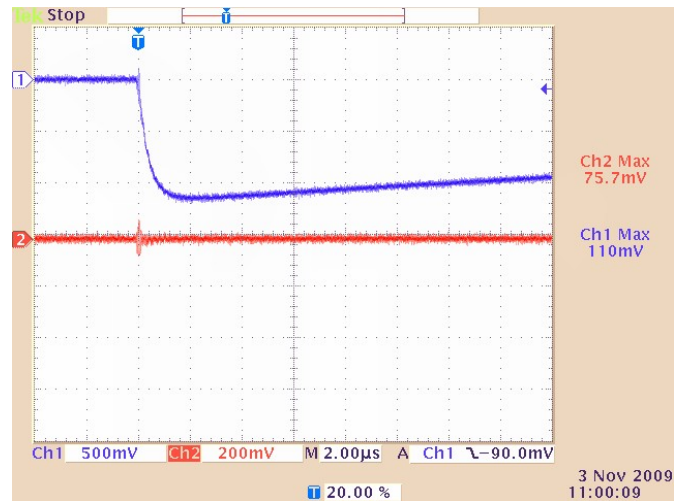
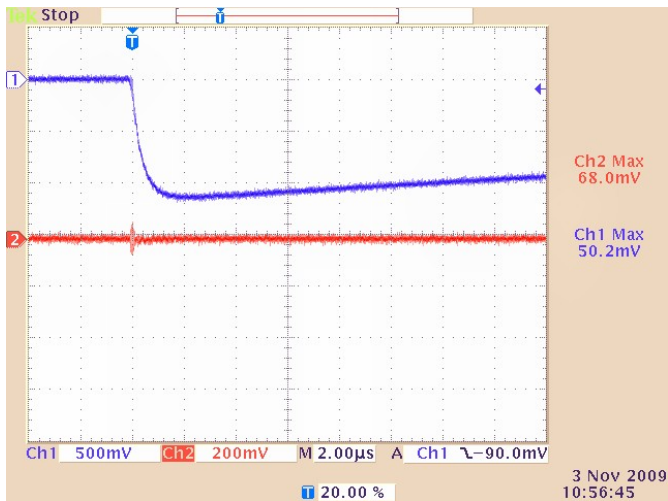
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:993mbar Υγρασία:47%

Π.1.2.9 Διάκενο σπινθηριστή: 2cm (γ' σειρά μετρήσεων)



Θερμοκρασία:20°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%

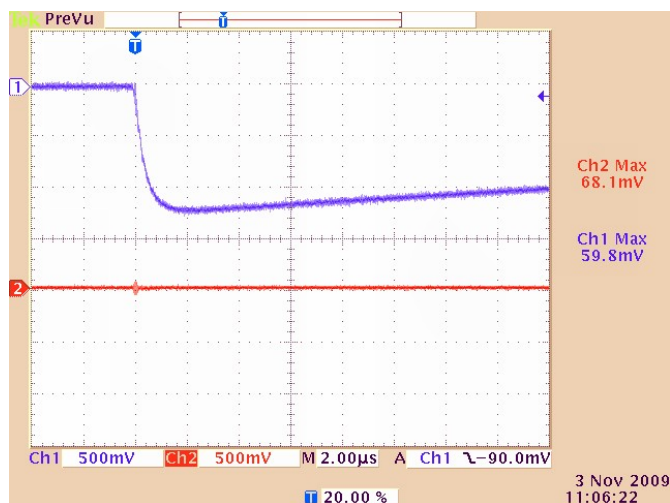
Θερμοκρασία:20°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%



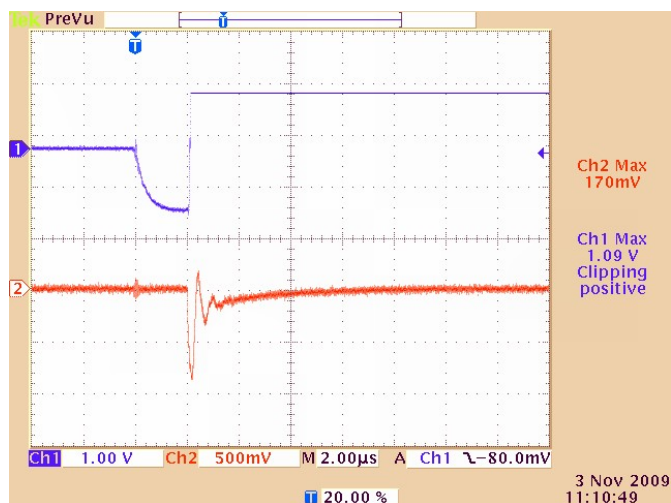
Θερμοκρασία:20°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%

Θερμοκρασία:20°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%

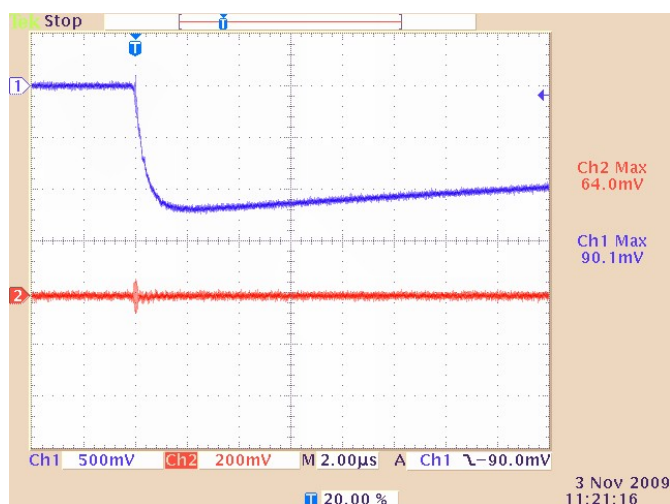
Π.1.2.10 Διάκενο σπινθηριστή: 2,1cm



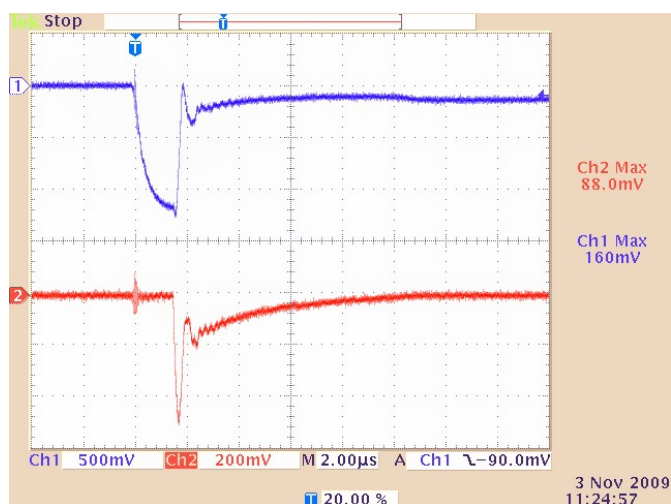
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%



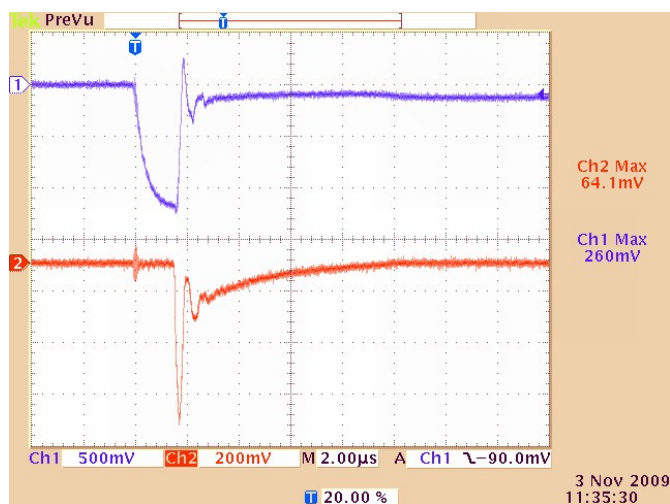
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%



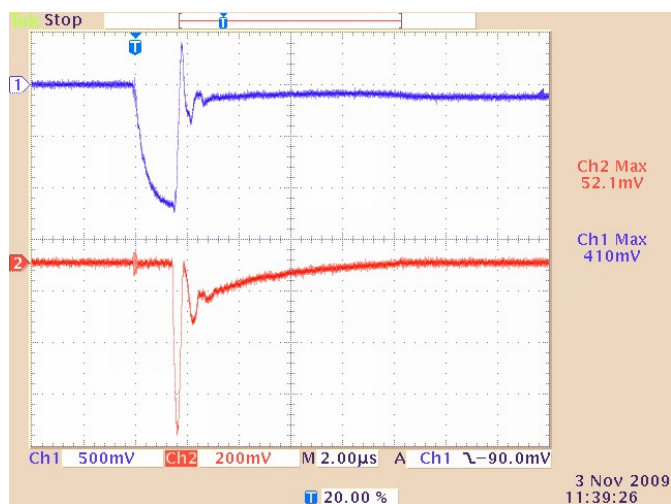
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%



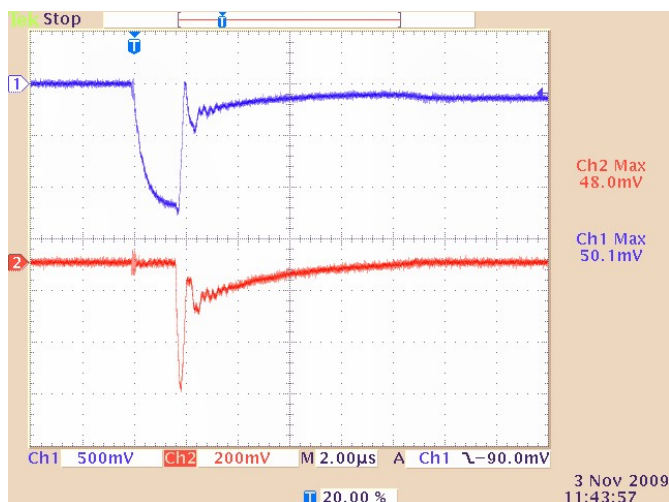
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:45%



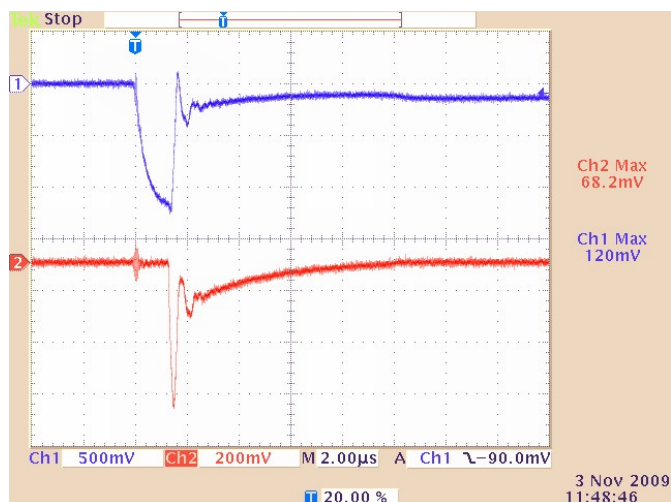
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:983mbar Υγρασία:46%



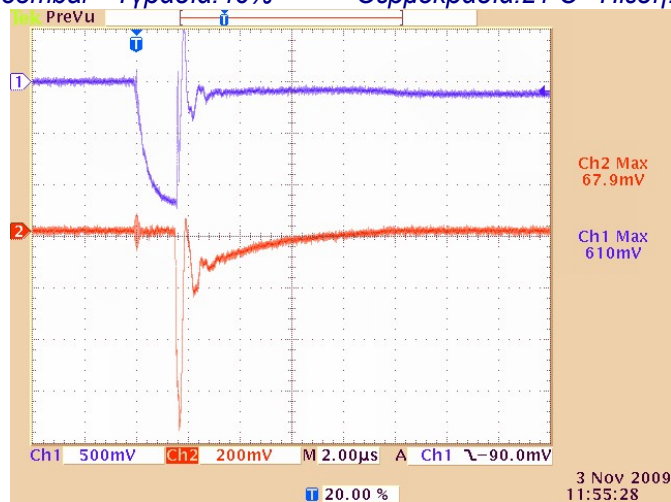
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:983mbar Υγρασία:46%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:983mbar Υγρασία:46%

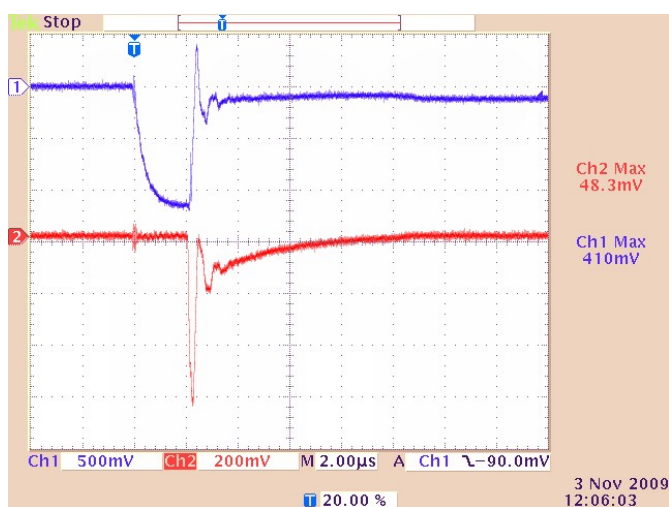


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:45%

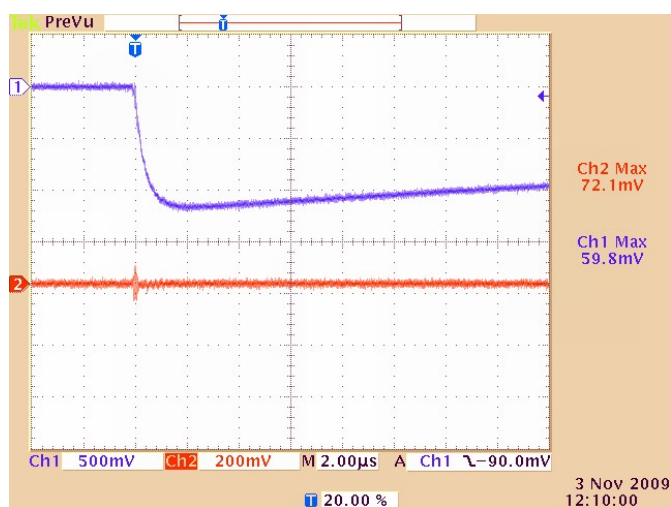


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:45%

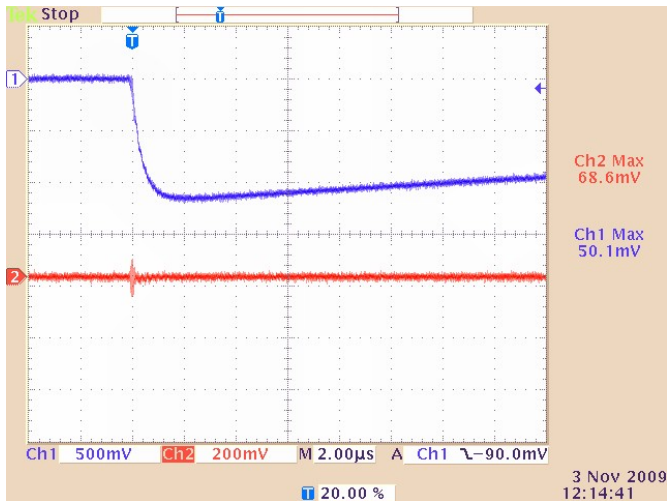
Π.1.2.11 Διάκενο σπινθηριστή: 2,05cm



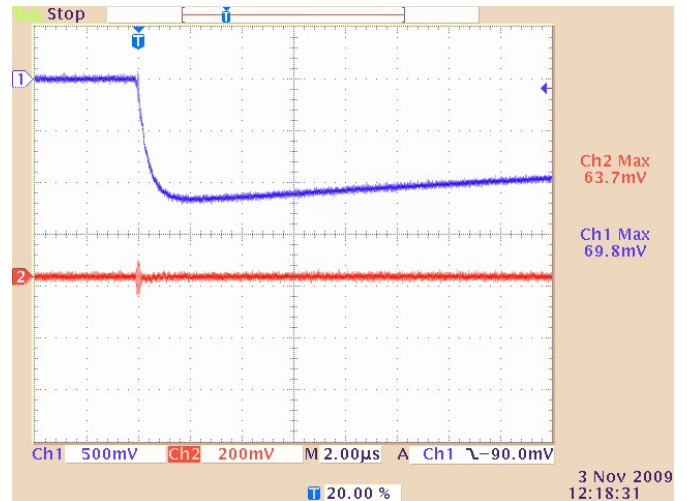
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:44%



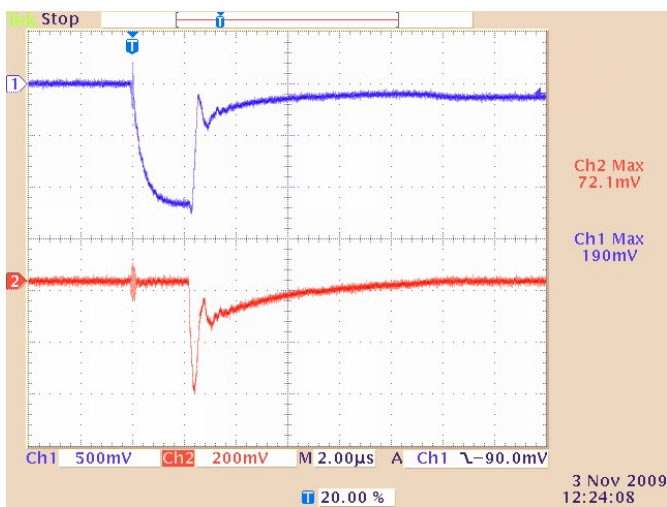
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:44%



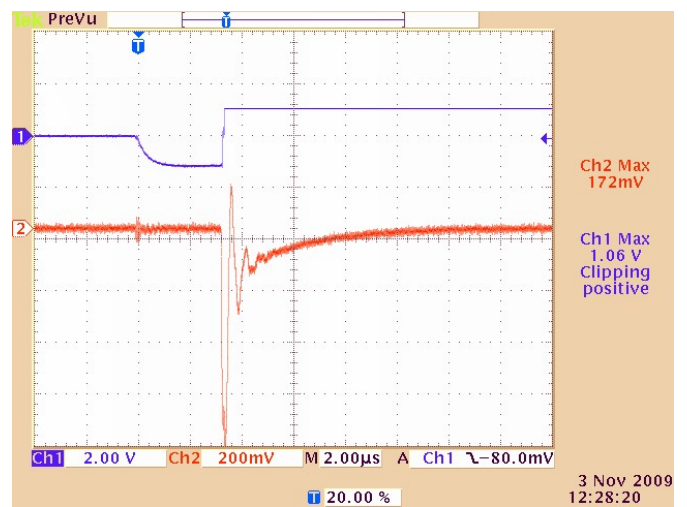
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:48%



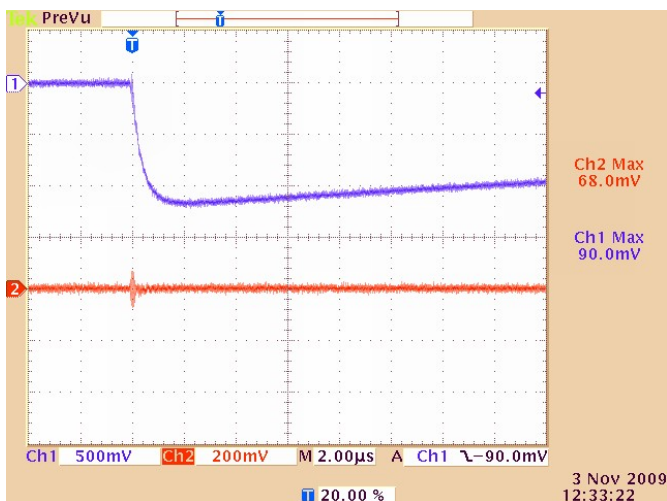
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:48%



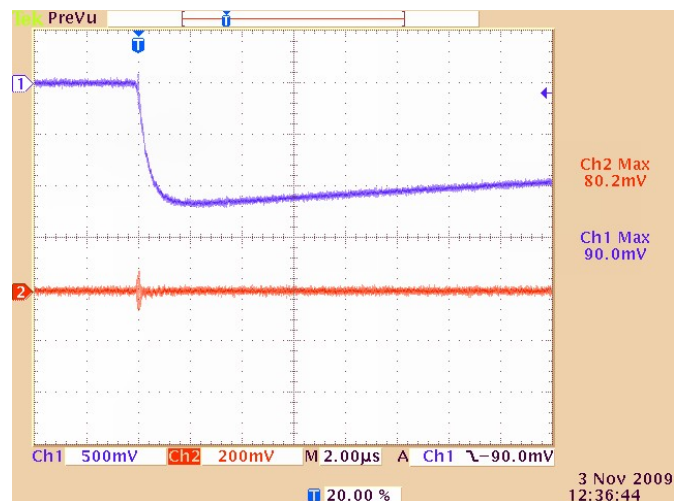
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:47%



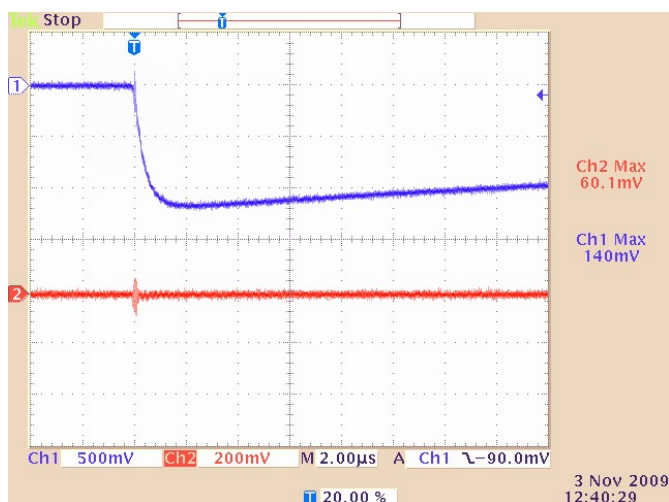
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:47%



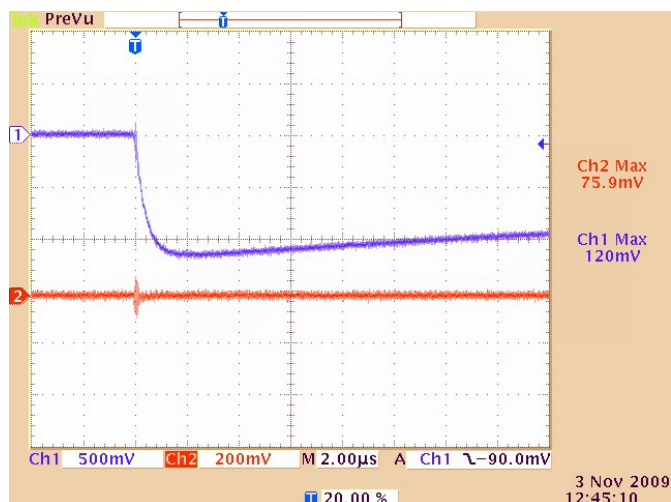
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:46%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:46%



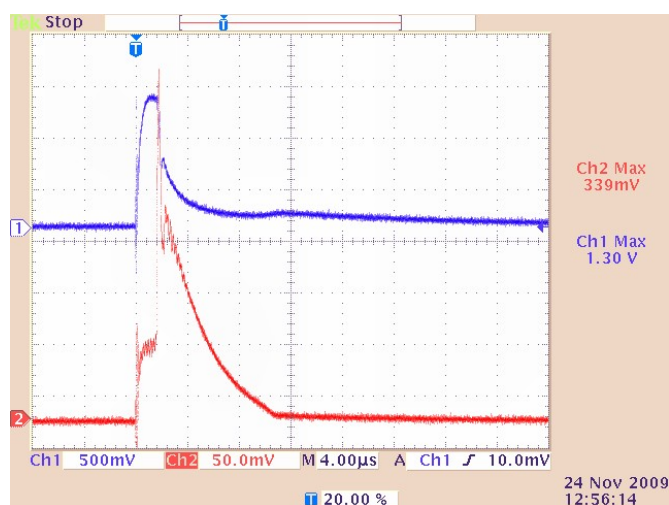
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:44%



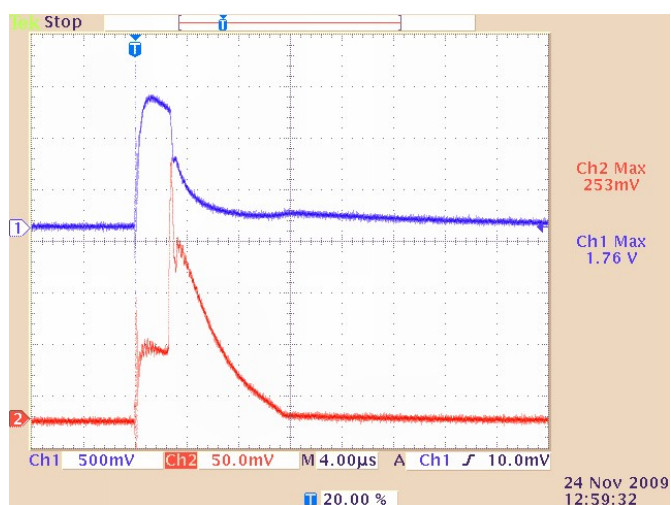
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:44%

Π.1.3 Παλμογραφήματα για δείγμα χρώματος A, υγρασία 5% και θετική πολικότητα

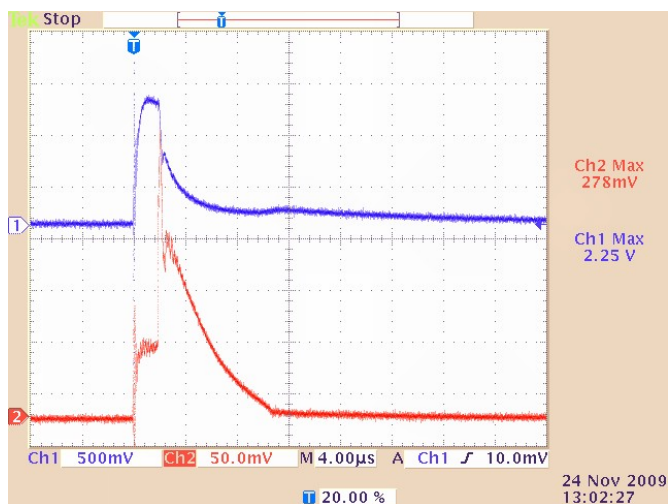
Π.1.3.1 Διάκενο σπινθηριστή: 3cm



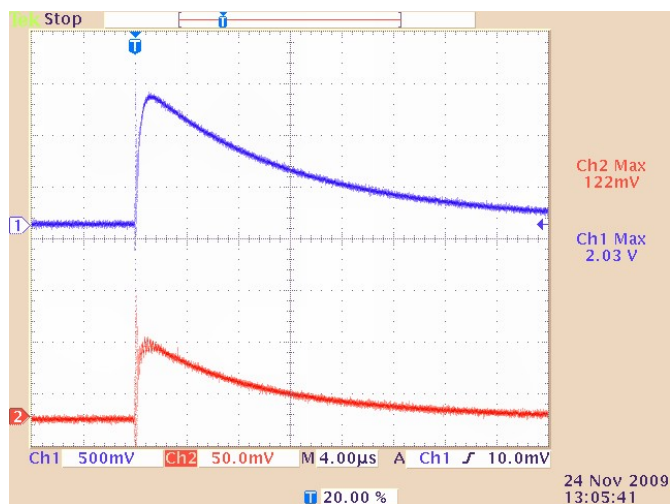
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:994mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:994mbar Υγρασία:50%

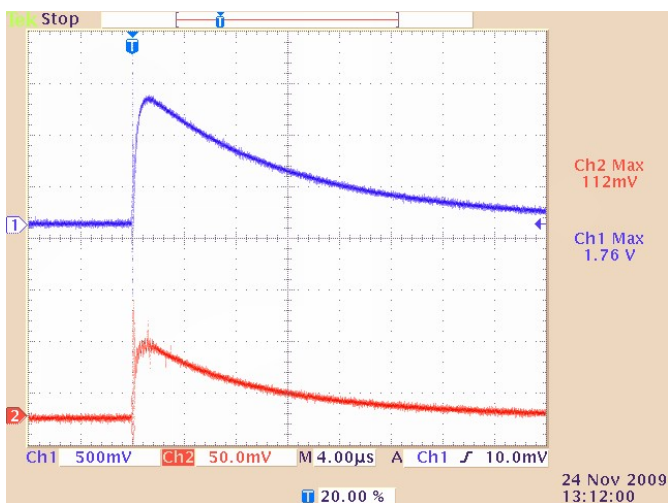


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:994mbar Υγρασία:50%

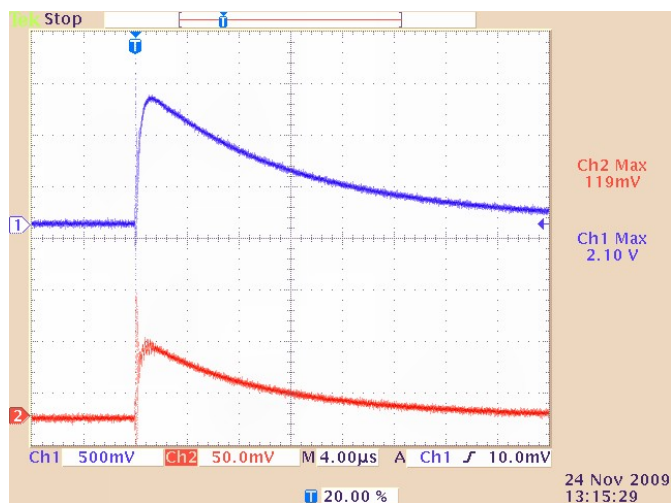


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:994mbar Υγρασία:50%

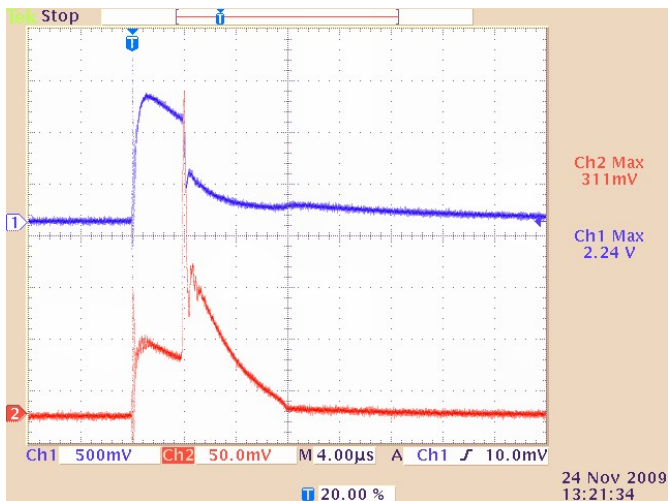
Π.1.3.2 Διάκενο σπινθηριστή: 2,9cm(α' σειρά μετρήσεων)



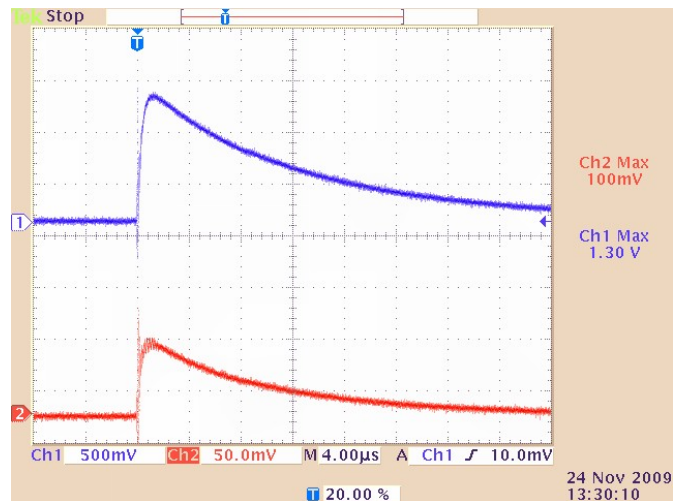
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



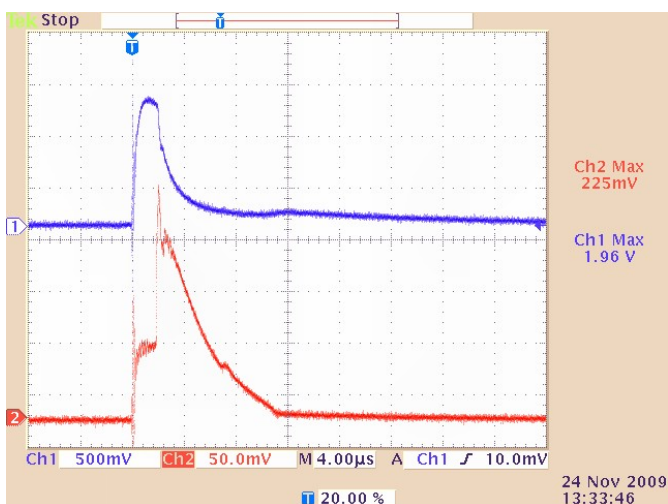
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



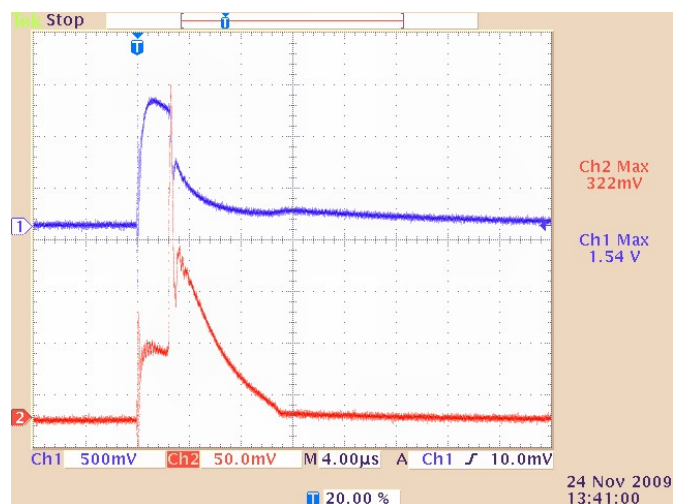
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



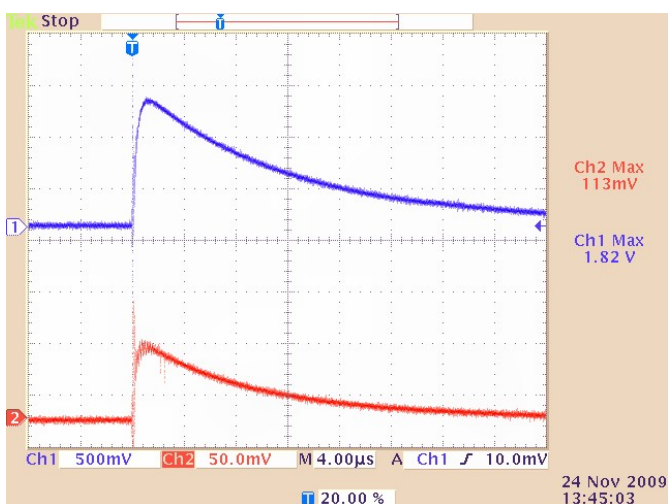
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



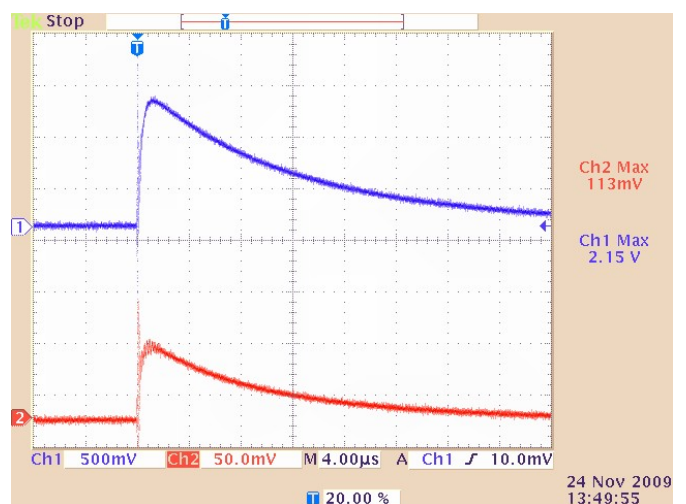
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



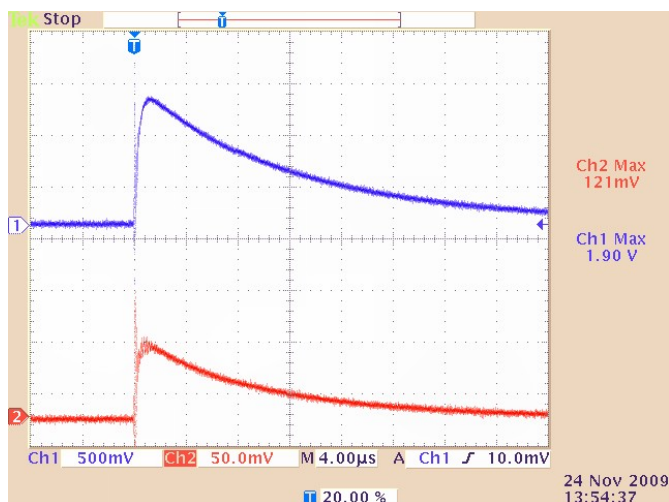
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



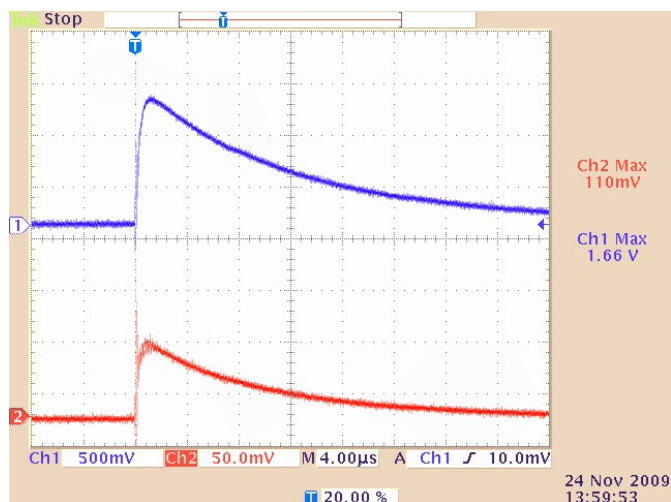
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:993mbar Υγρασία:48%



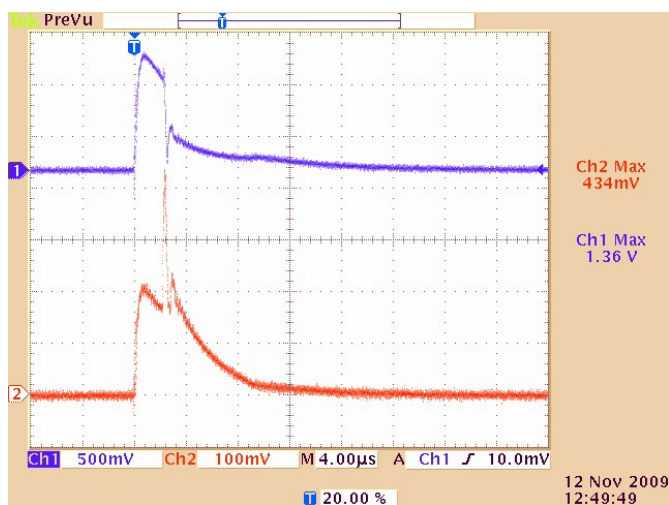
Θερμοκρασία: 22°C Πίεση: 993mbar Υγρασία: 48%



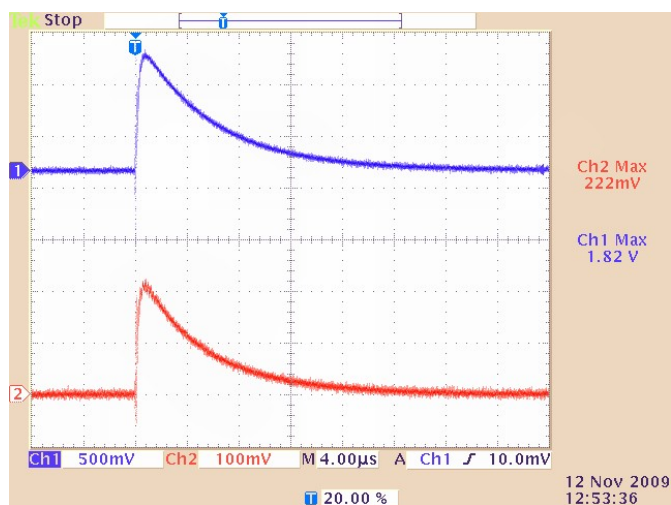
Θερμοκρασία: 22°C Πίεση: 993mbar Υγρασία: 48%

Π.1.4 Παλμογραφήματα για δείγμα χρώματος Α, υγρασία 10% και θετική πολικότητα.

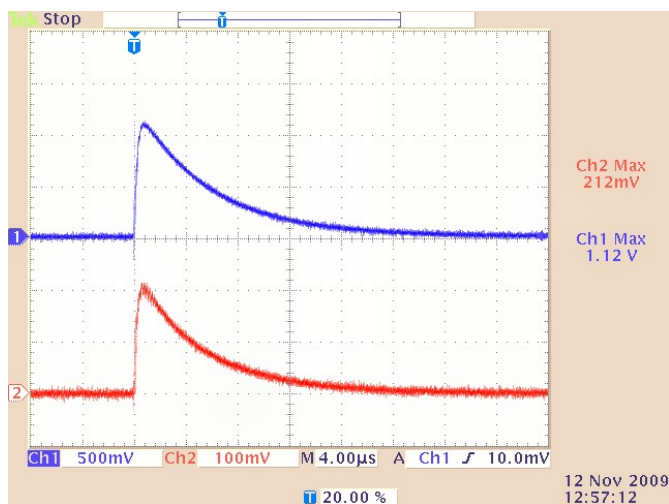
Π.1.4.1 Διάκενο σπινθηριστή: 4,2cm.



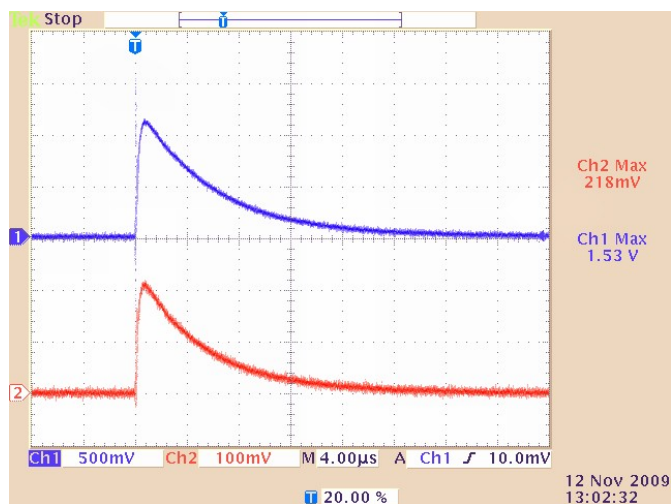
Θερμοκρασία: 23°C Πίεση: 989mbar Υγρασία: 44%



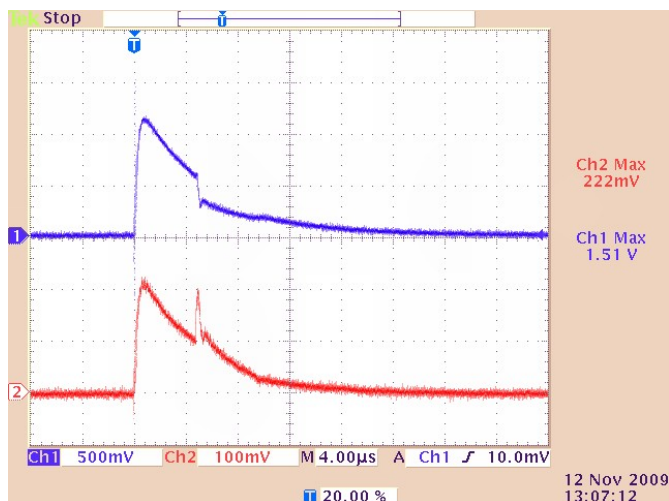
Θερμοκρασία: 23°C Πίεση: 989mbar Υγρασία: 44%



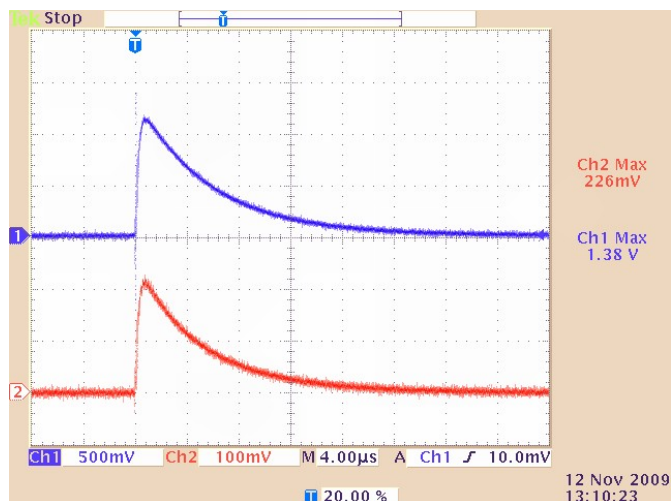
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



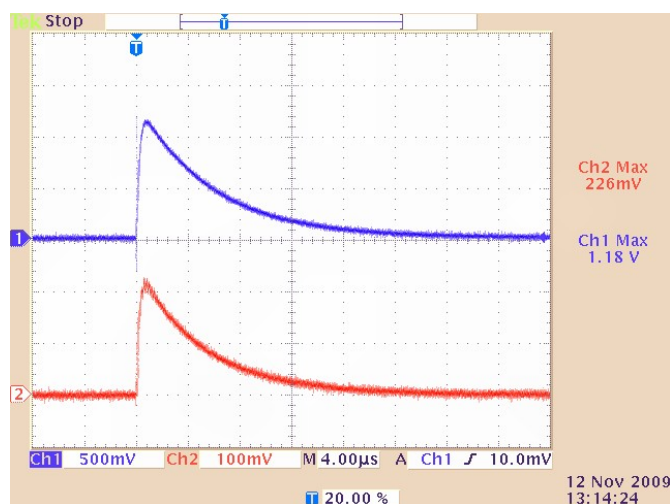
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%

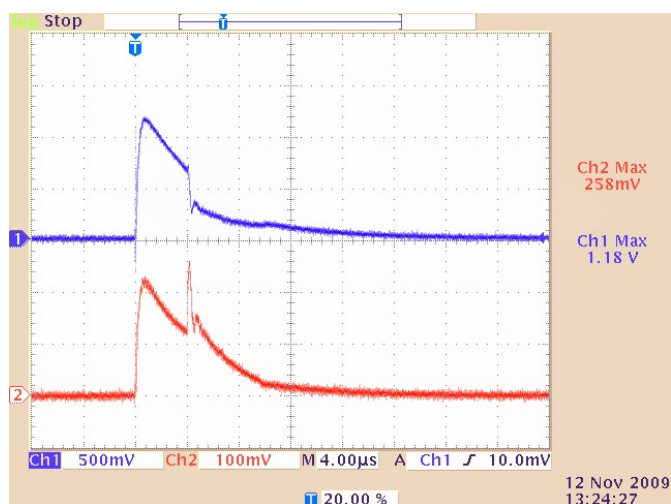


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%

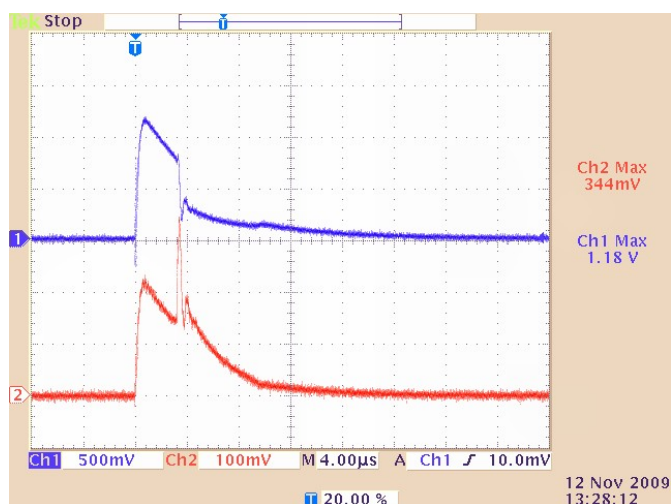


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%

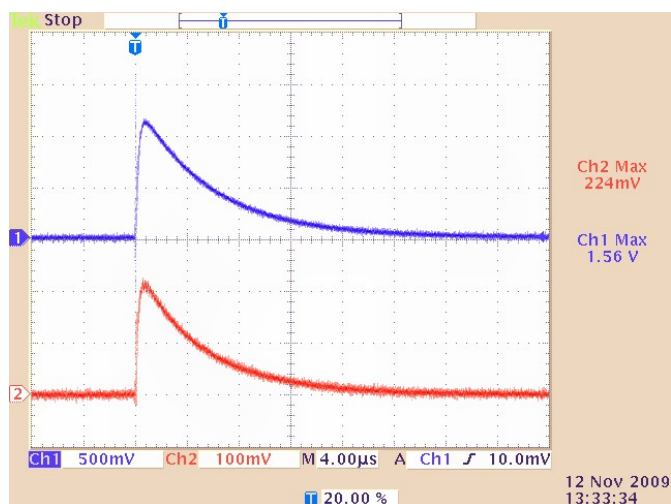
Π.1.4.2 Διάκενο σπινθηριστή: 4,3cm.



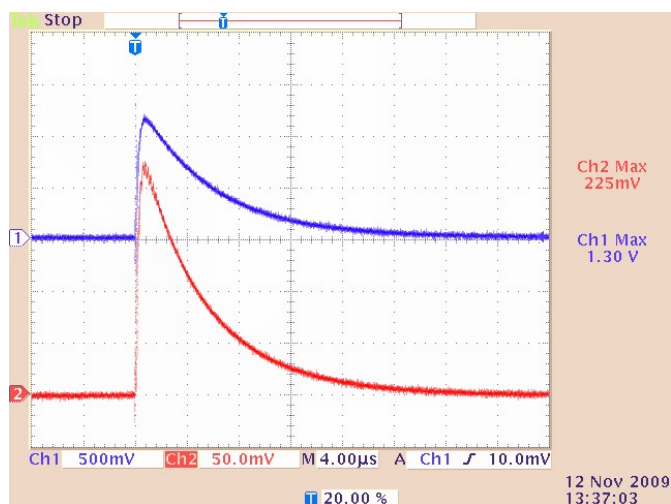
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



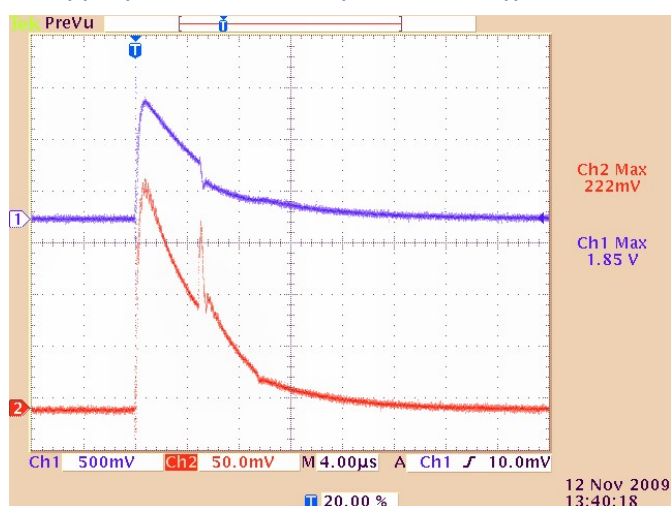
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



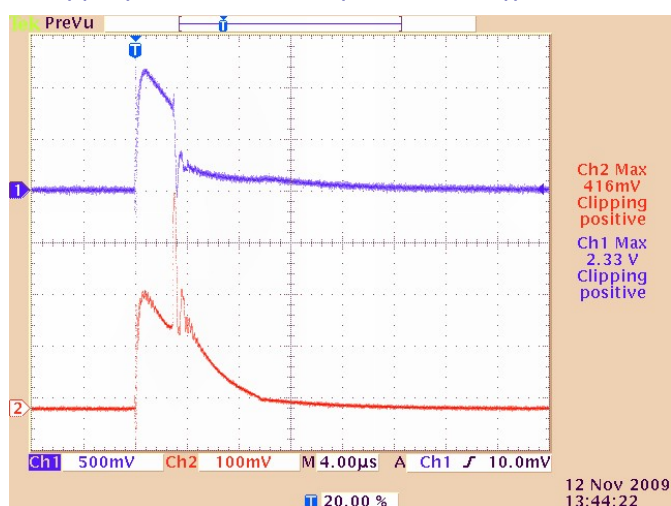
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



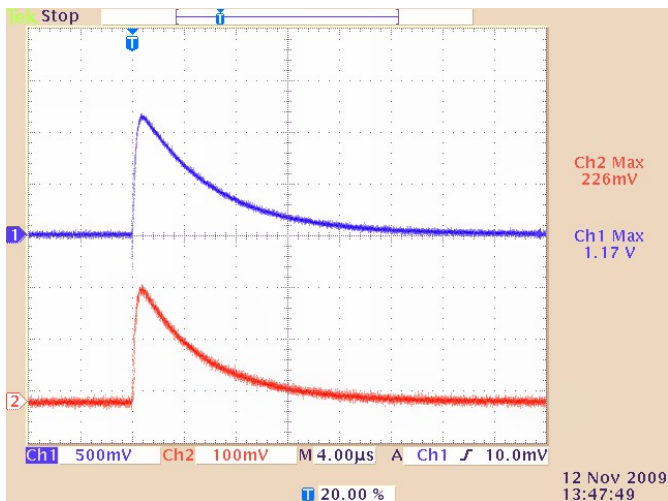
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



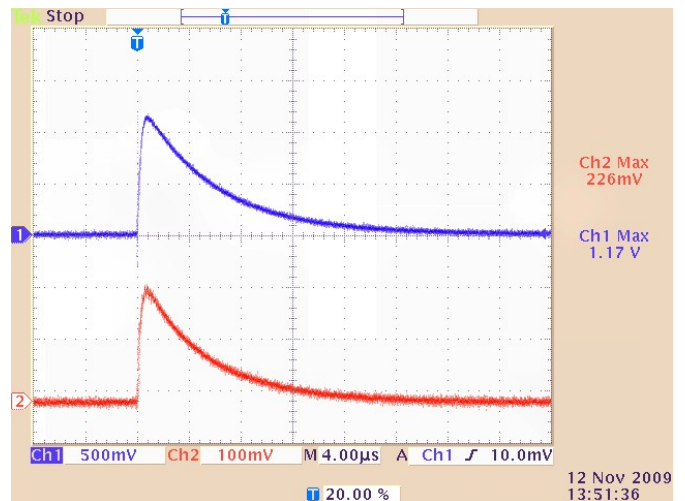
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



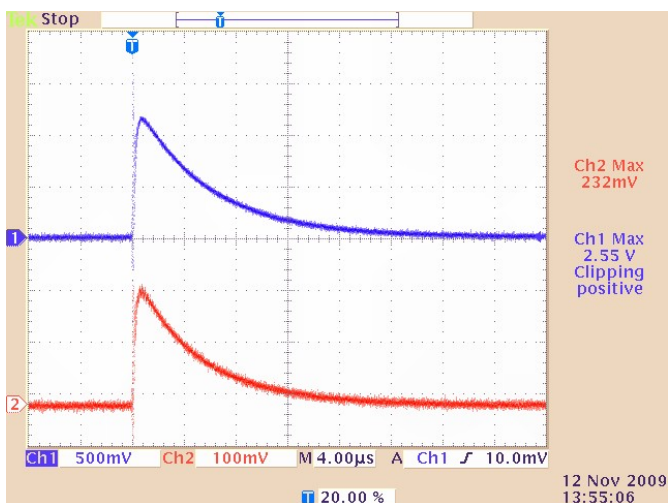
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



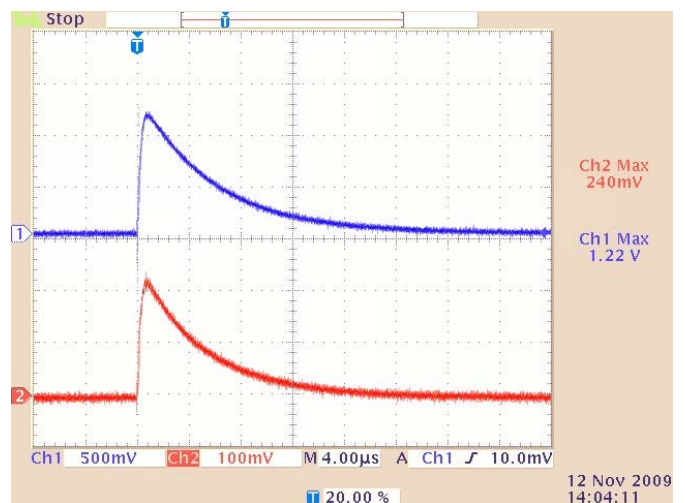
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%

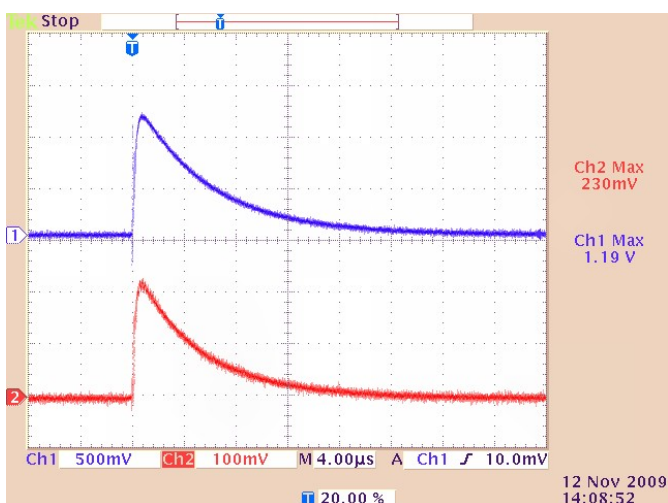


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%

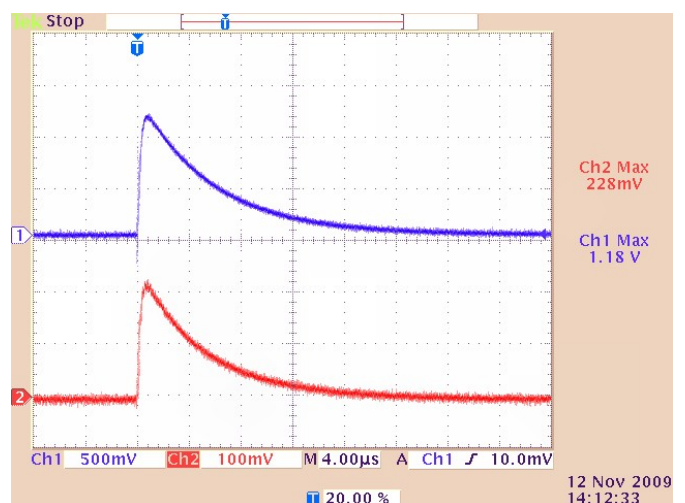


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%

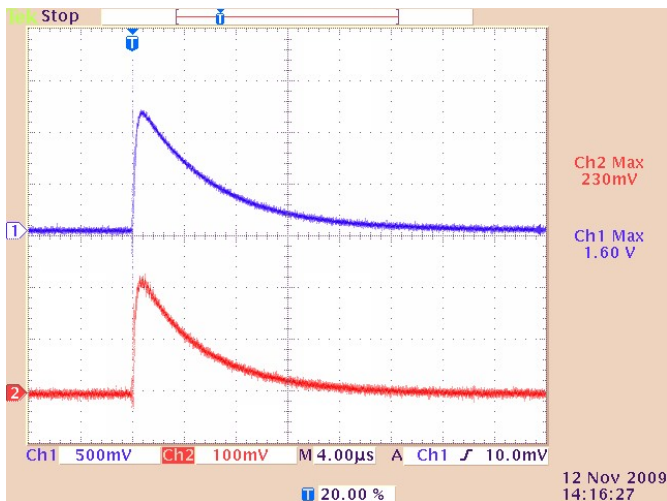
Π.1.4.3 Διάκενο σπινθηριστή: 4,4cm



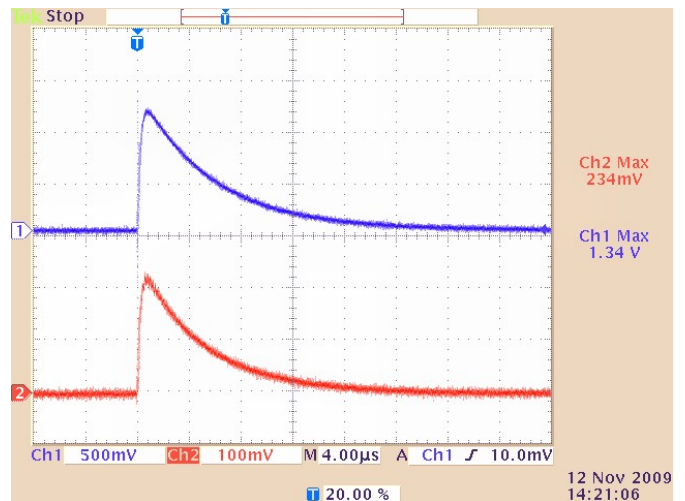
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:989mbar Υγρασία:44%



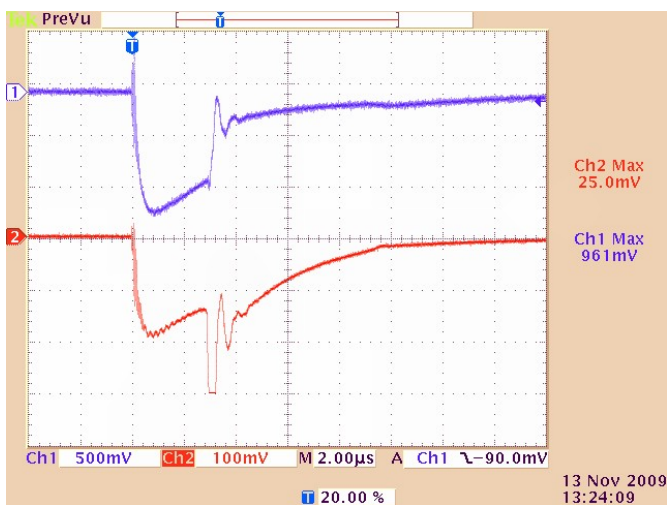
Θερμοκρασία: 23°C Πίεση: 989mbar Υγρασία: 44%



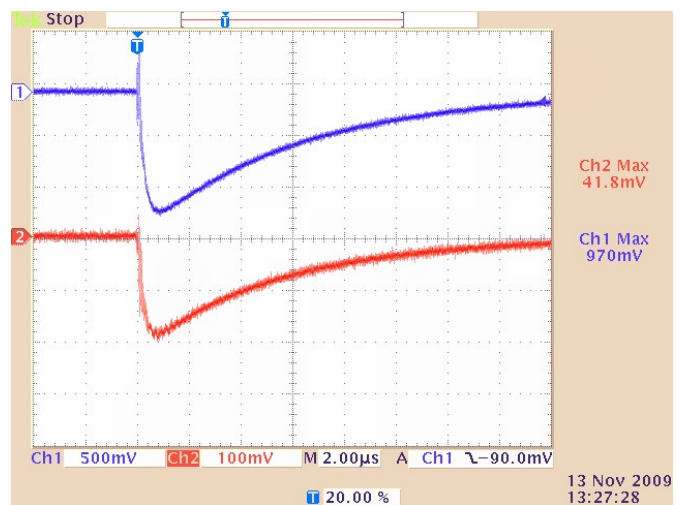
Θερμοκρασία: 23°C Πίεση: 989mbar Υγρασία: 43%

Π.1.5 Παλμογραφήματα για δείγμα χρώματος Α, υγρασία 10% και αρνητική πολικότητα.

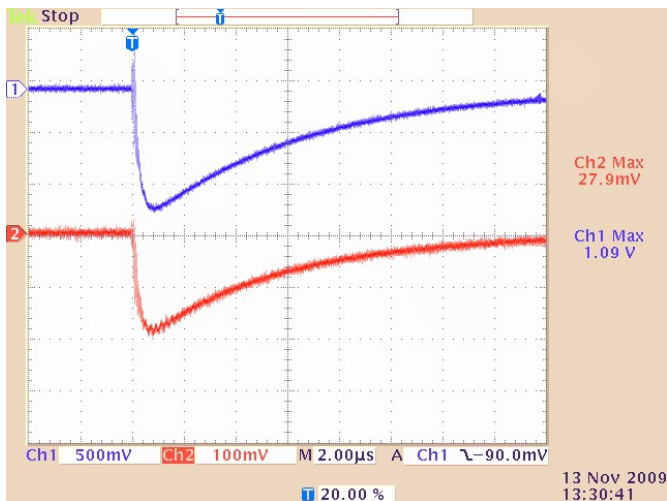
Π.1.5.1 Διάκενο σπινθηριστή: 4,0cm.



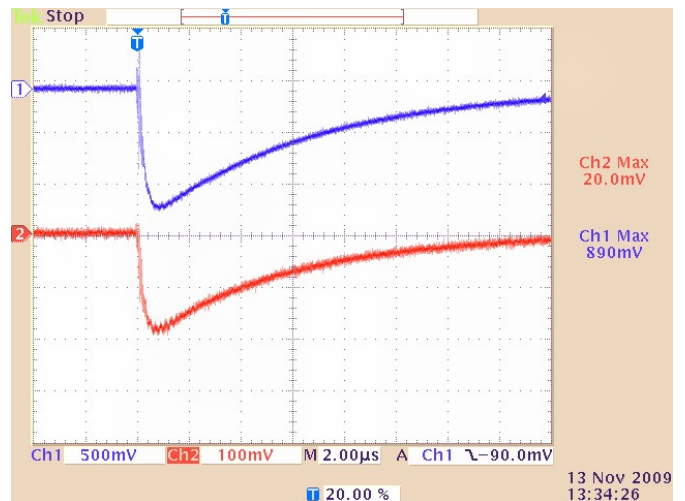
Θερμοκρασία: 22°C Πίεση: 998mbar Υγρασία: 44%



Θερμοκρασία: 22°C Πίεση: 998mbar Υγρασία: 44%

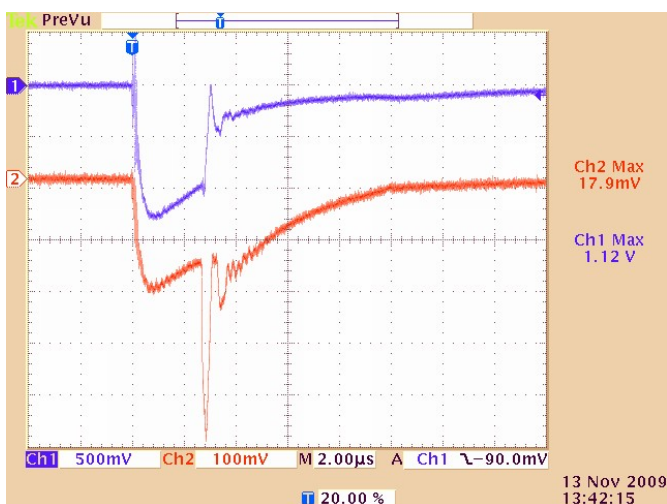


Θερμοκρασία:22°C Πίεση:998mbar Υγρασία:44%

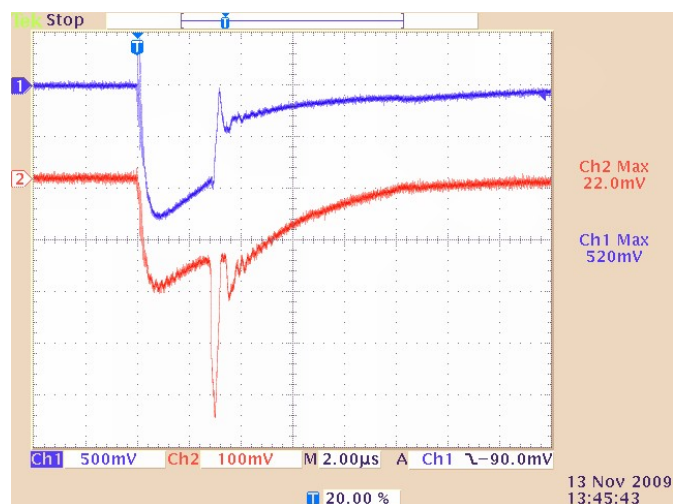


Θερμοκρασία:22°C Πίεση:998mbar Υγρασία:44%

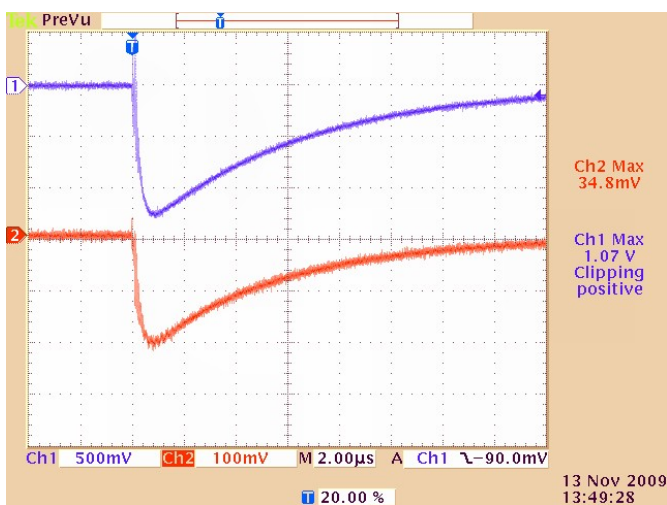
Π.1.5.2 Διάκενο σπινθηριστή: 4,5cm.



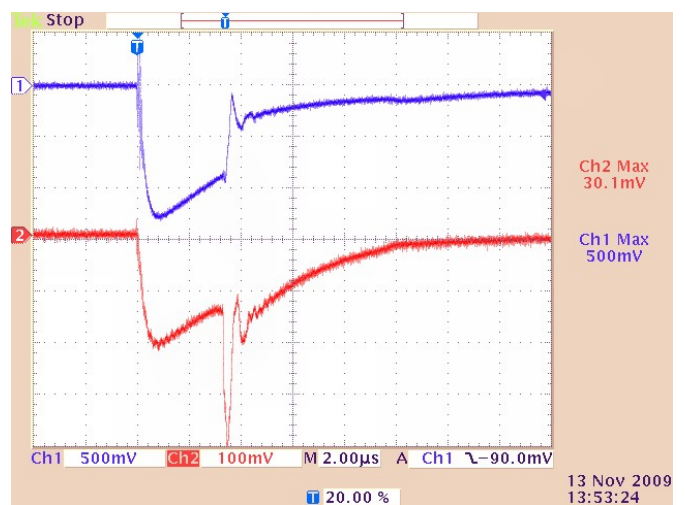
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:998mbar Υγρασία:43%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:998mbar Υγρασία:43%

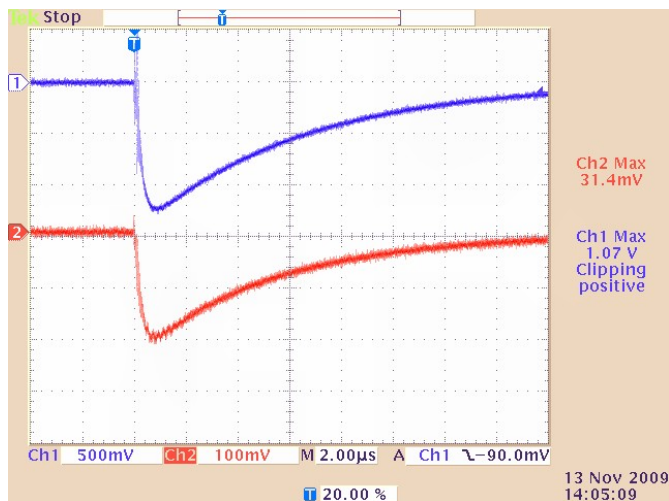


Θερμοκρασία:22°C Πίεση:998mbar Υγρασία:43%

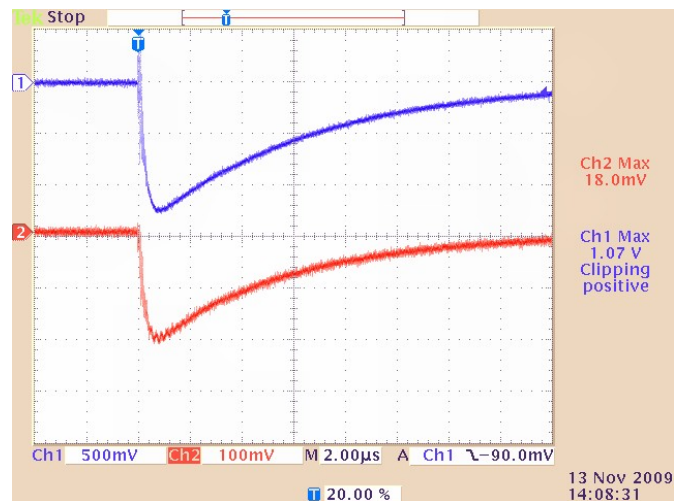


Θερμοκρασία:22°C Πίεση:998mbar Υγρασία:43%

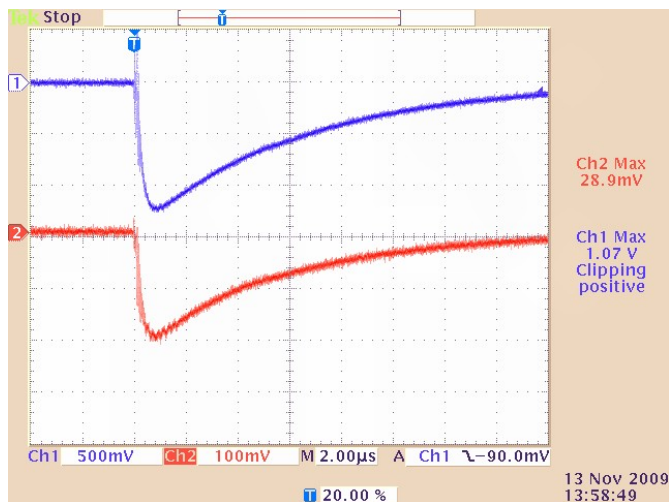
Π.1.5.3 Διάκενο σπινθηριστή: 4,3cm.



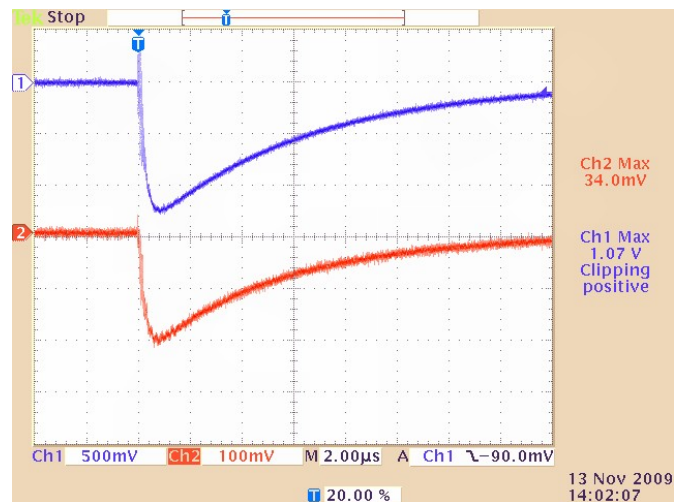
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%

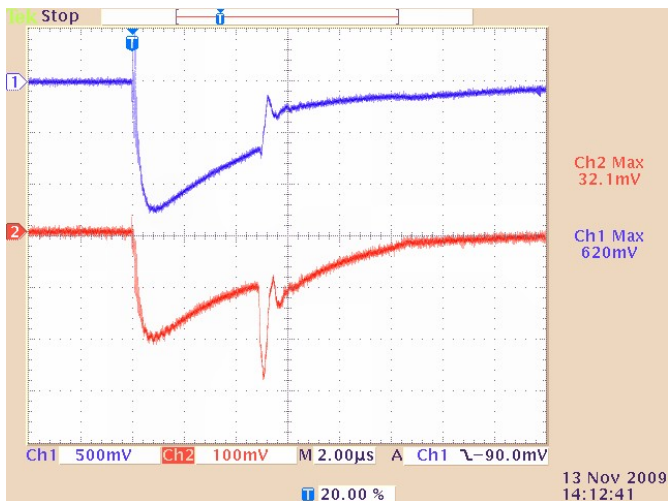


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%

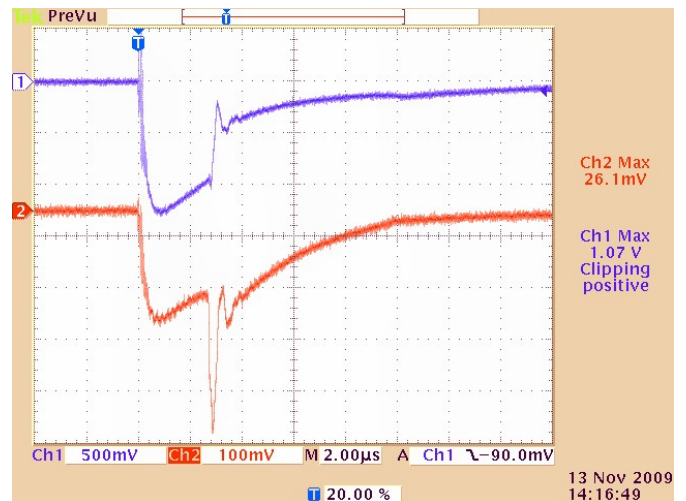


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%

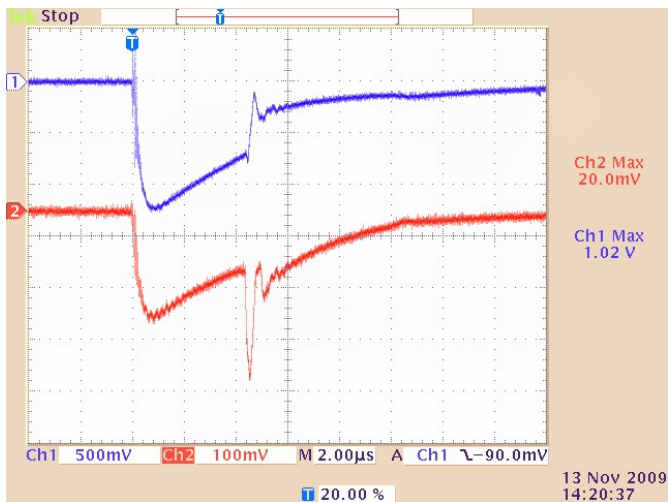
Π.1.5.4 Διάκενο σπινθηριστή: 4,45cm.



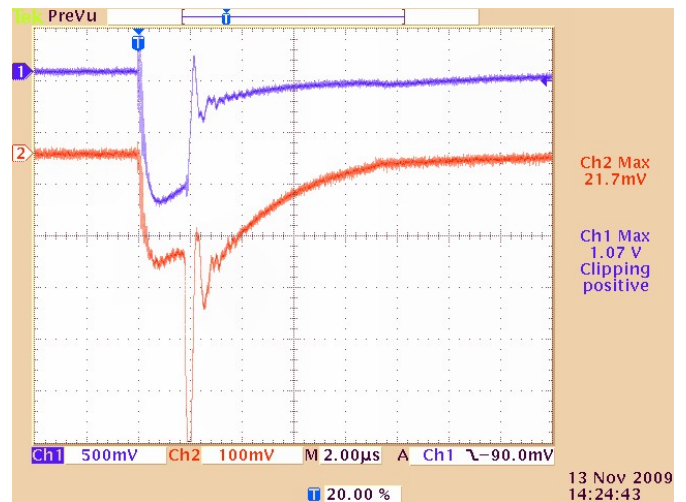
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%

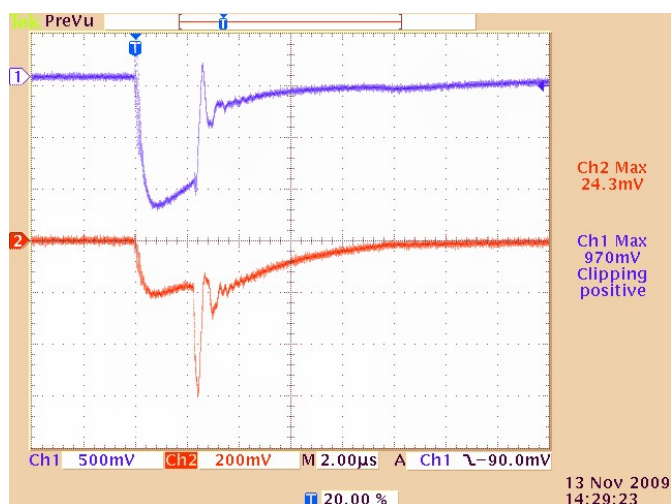


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%

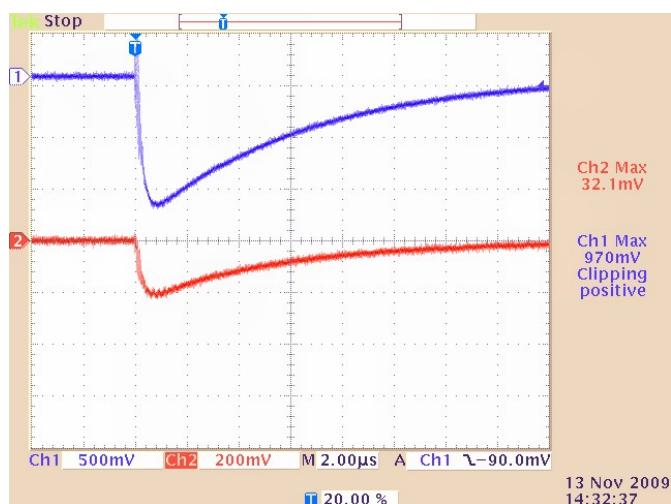


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%

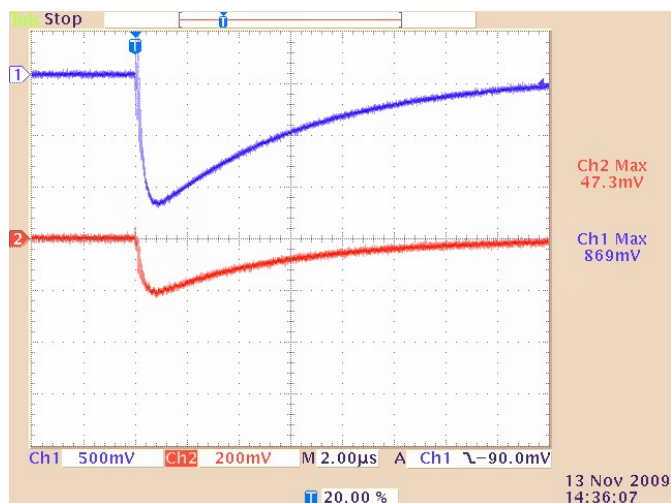
Π.1.5.5 Διάκενο σπινθηριστή: 4,4cm.



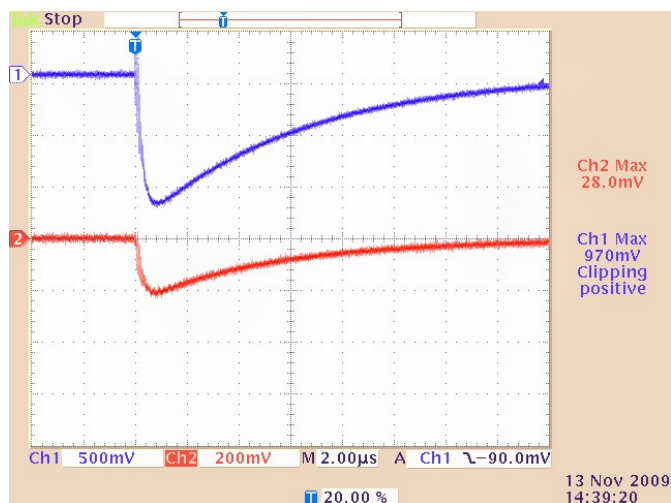
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%



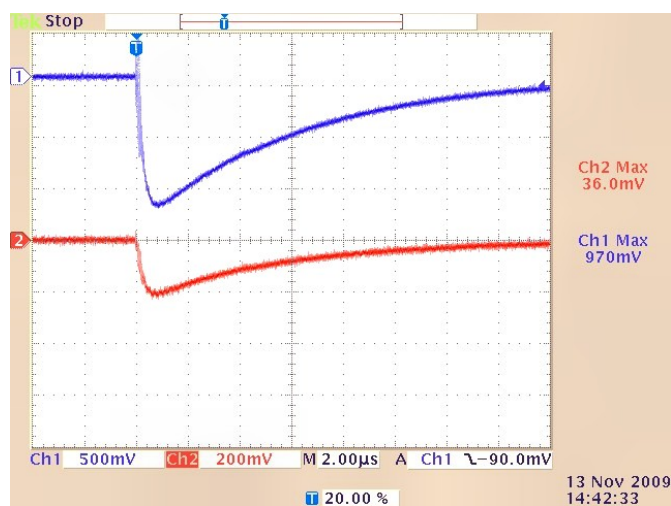
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%

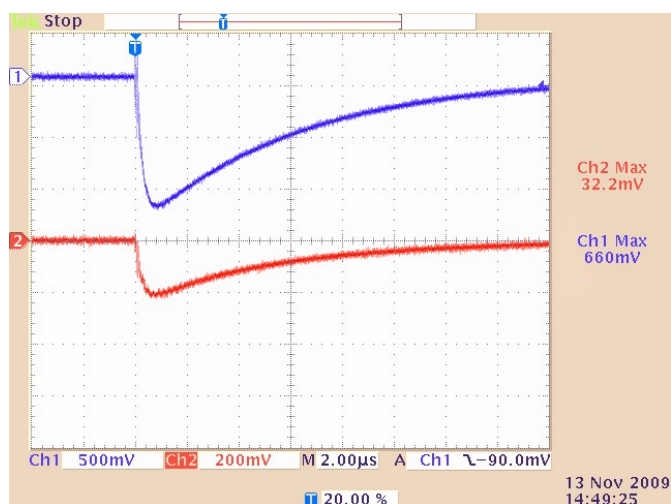


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%

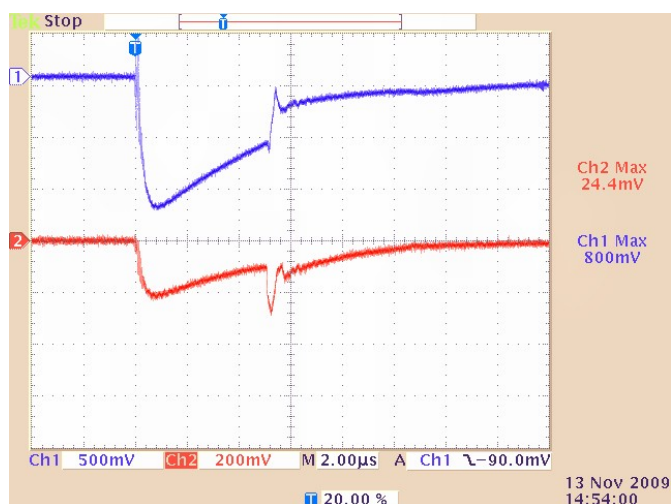


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:999mbar Υγρασία:42%

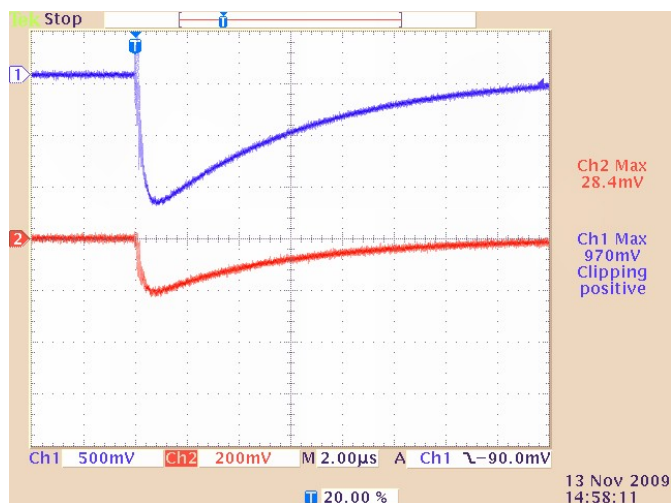
Π.1.5.6 Διάκενο σπινθηριστή: 4,42cm.



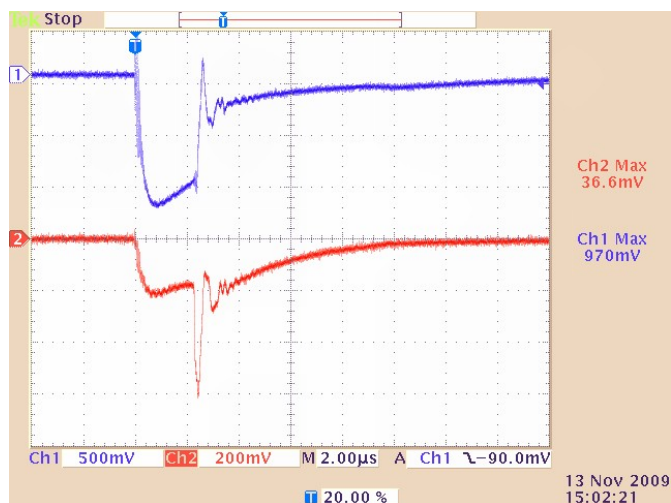
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%



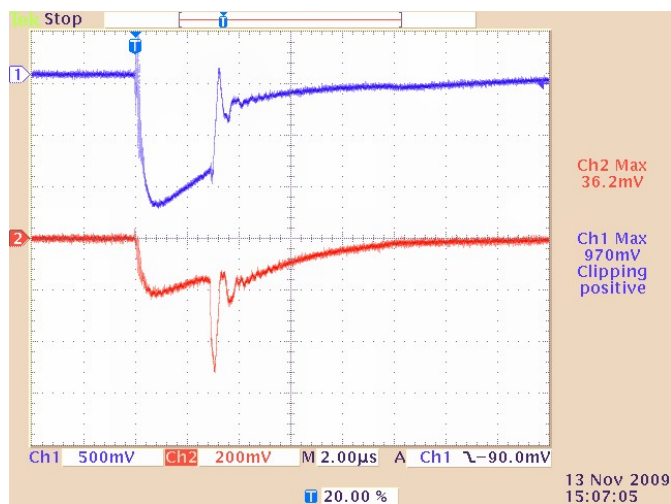
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%



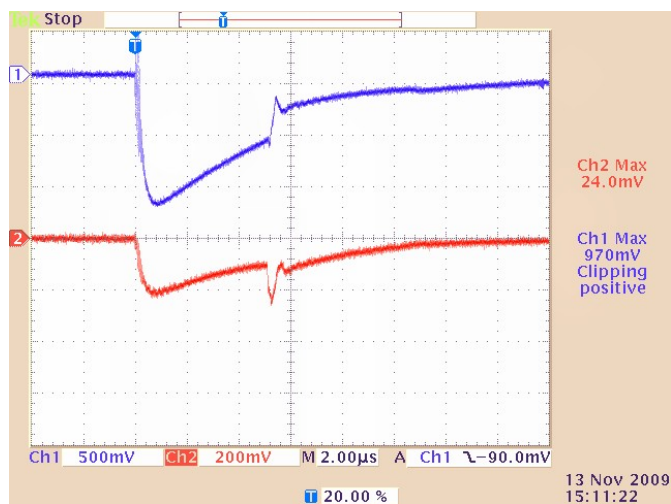
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%



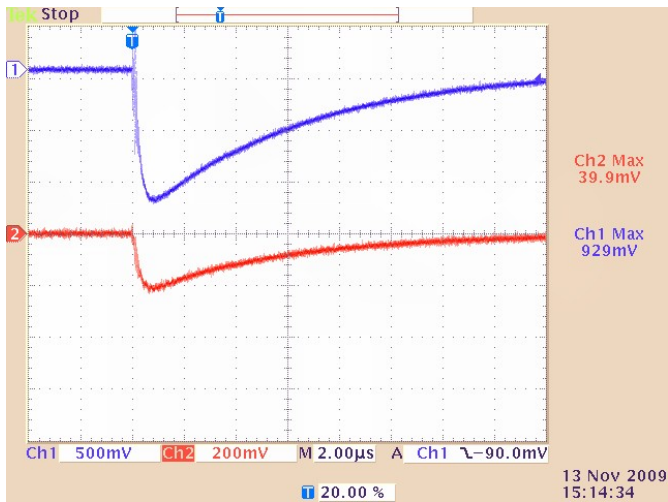
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:42%



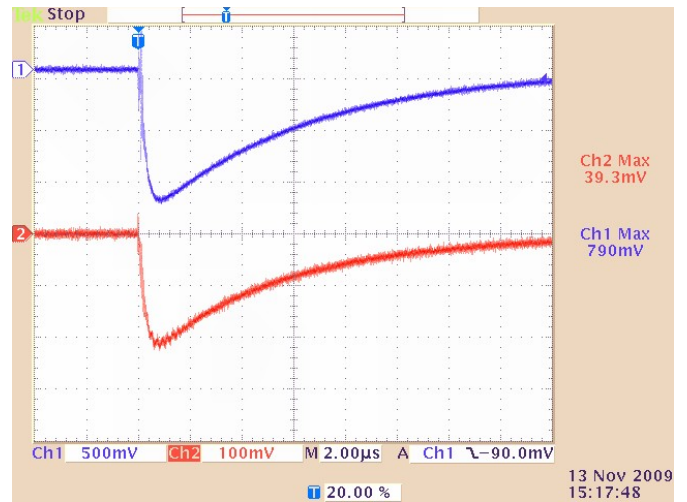
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%



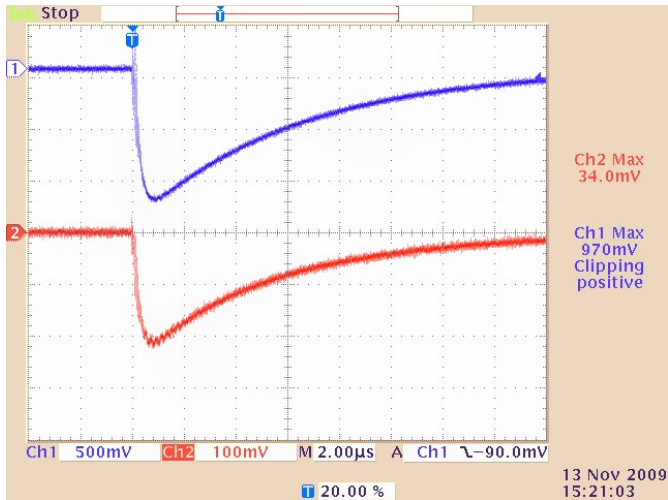
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%



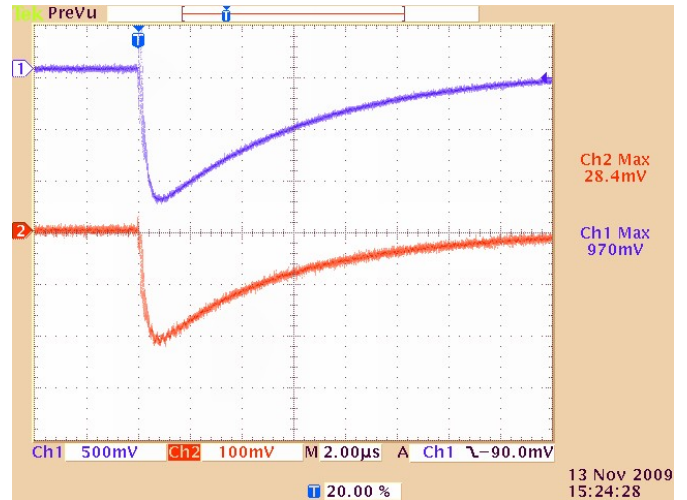
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%



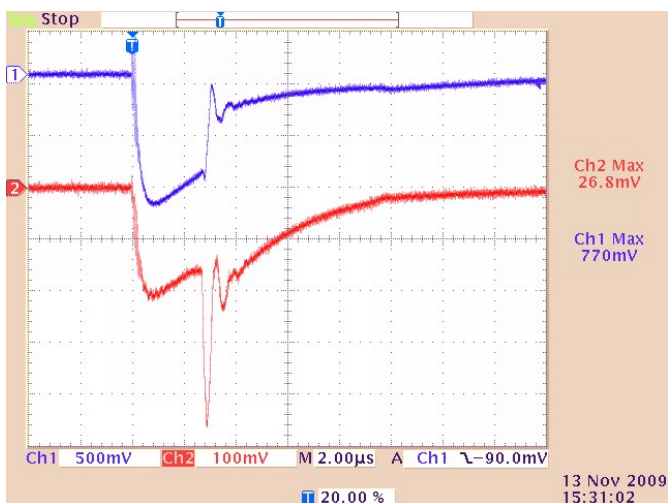
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%



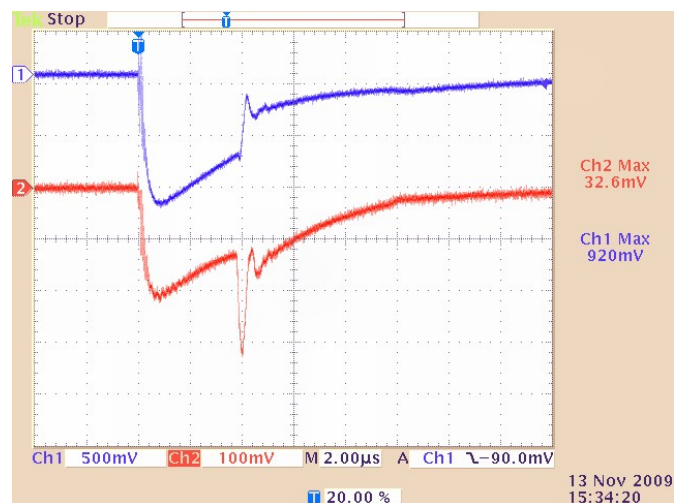
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%



Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%

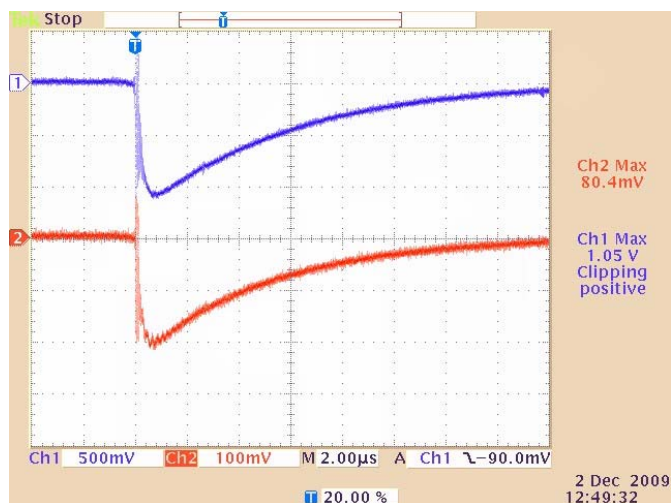


Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%



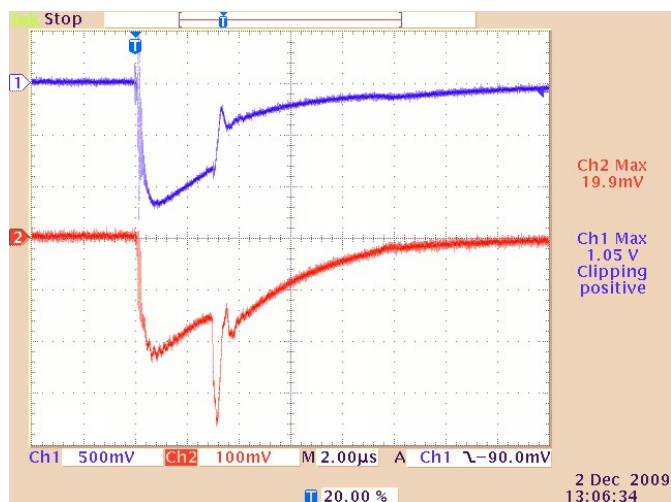
Θερμοκρασία:23°C Πίεση:998mbar Υγρασία:41%

Π.1.5.7 Διάκενο σπινθηριστή: 5cm.



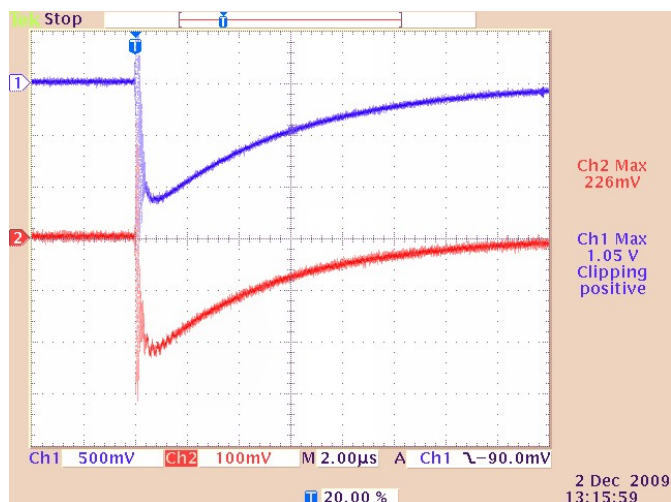
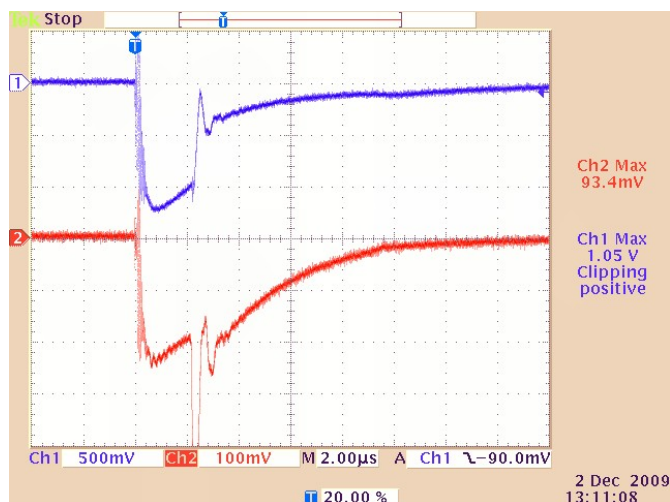
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%

Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%



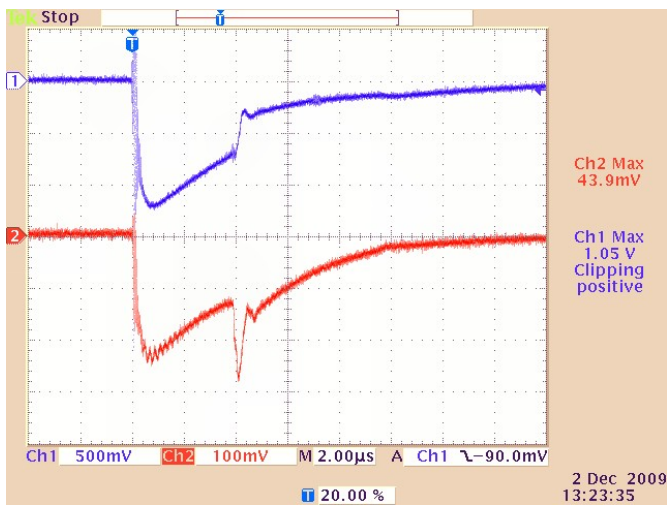
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%

Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:53%

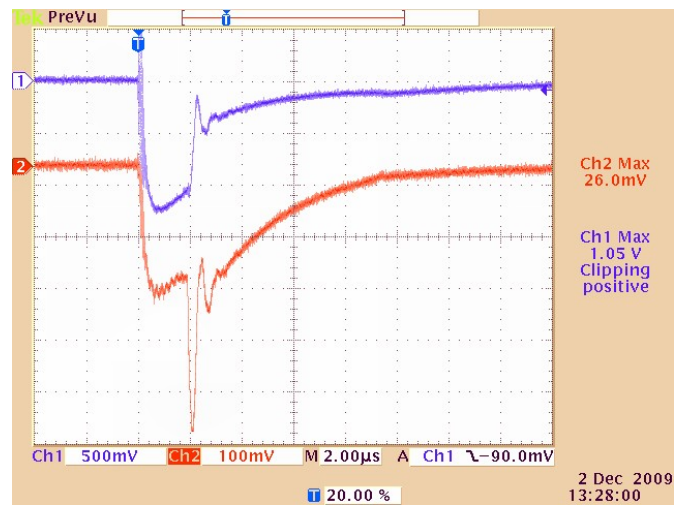


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:53%

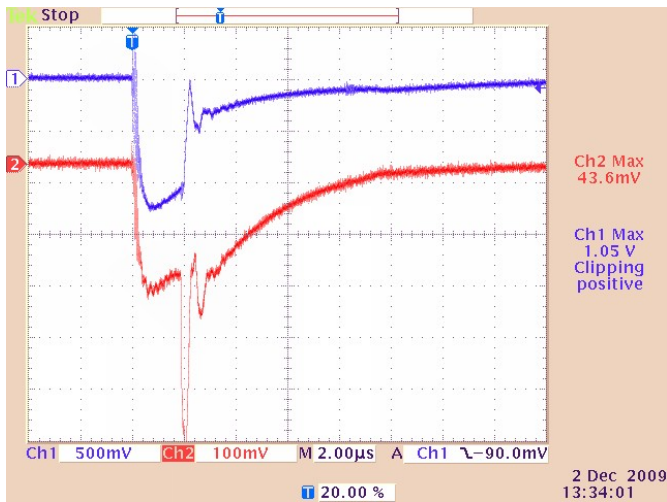
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:53%



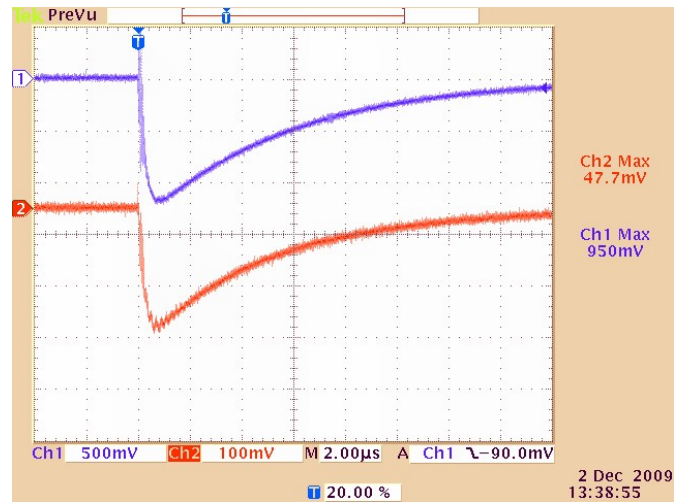
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:982mbar Υγρασία:53%



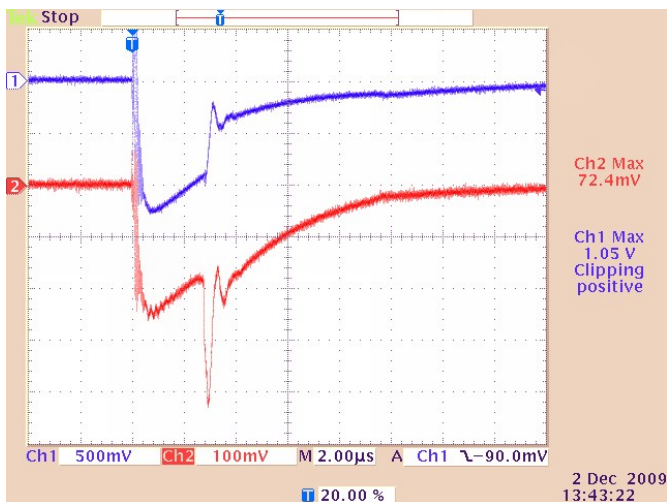
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%



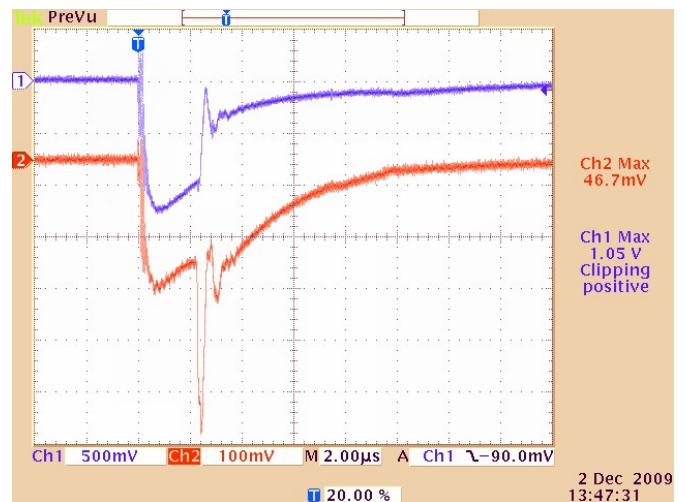
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%

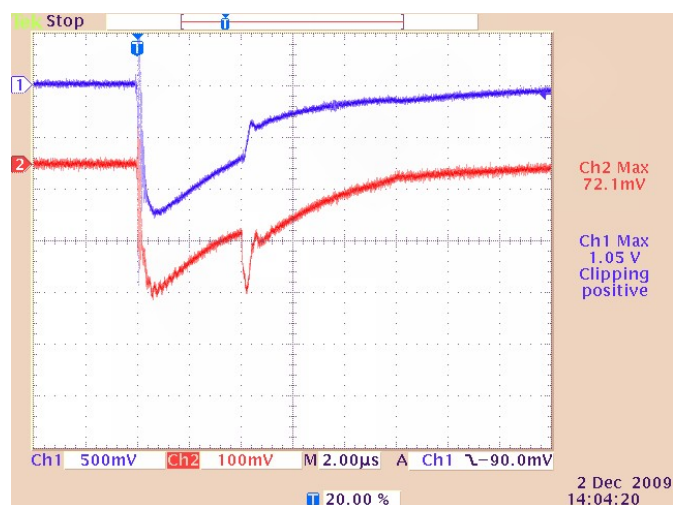
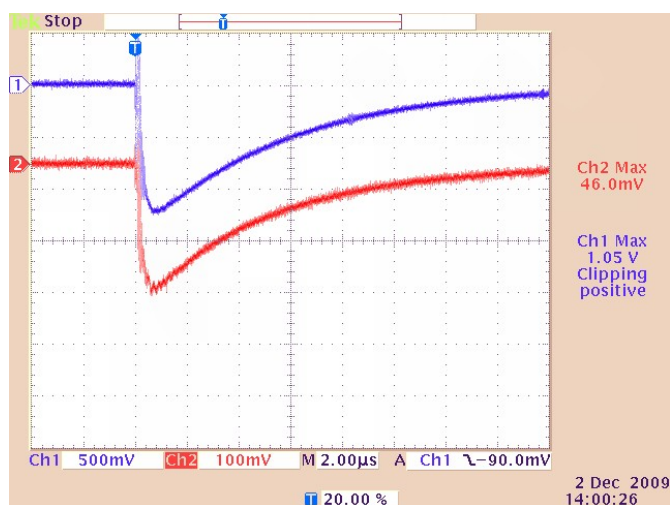


Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%



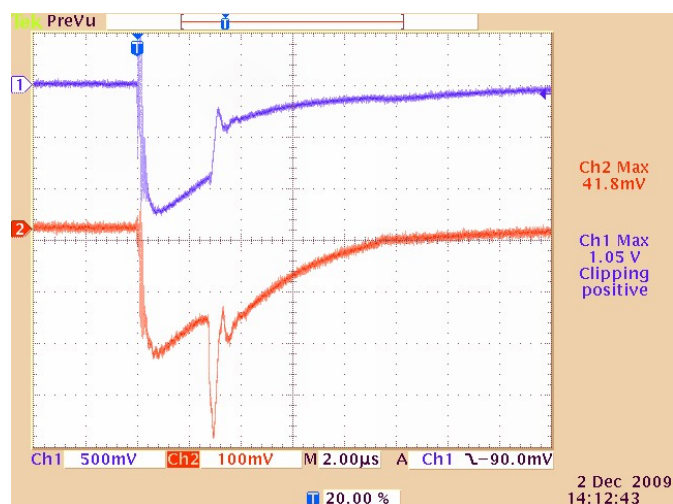
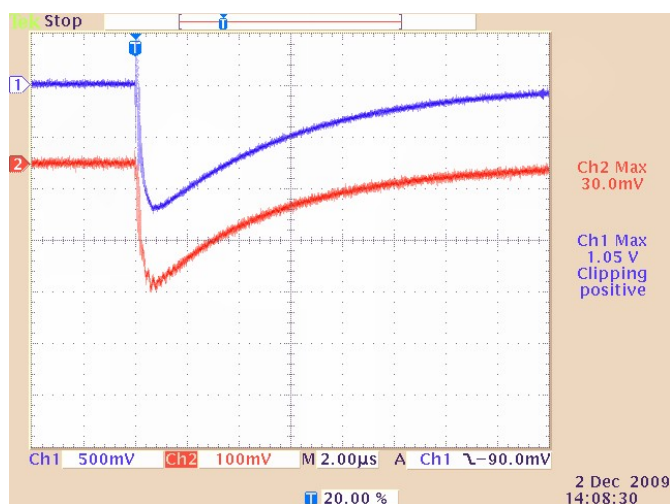
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:54%

Π.1.5.8 Διάκενο σπινθηριστή: 4,9cm.



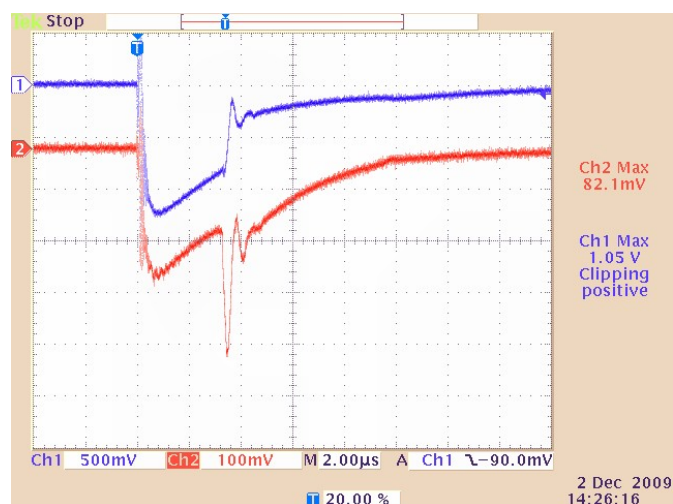
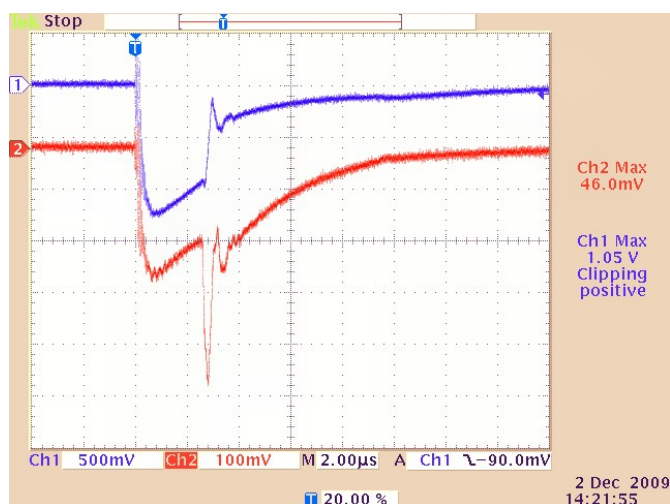
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%

Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



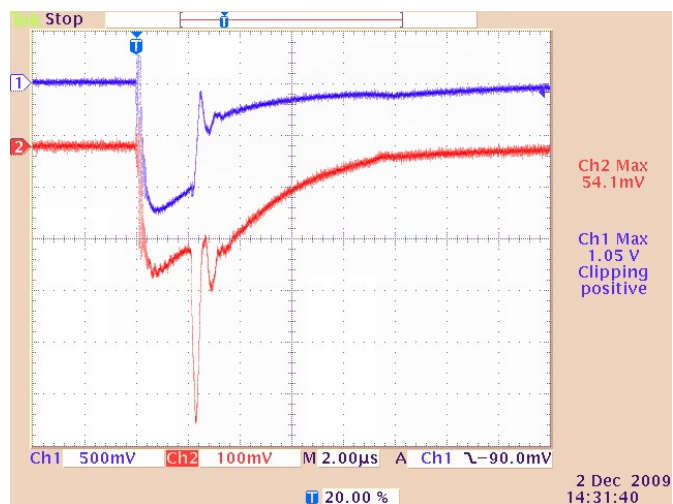
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%

Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%



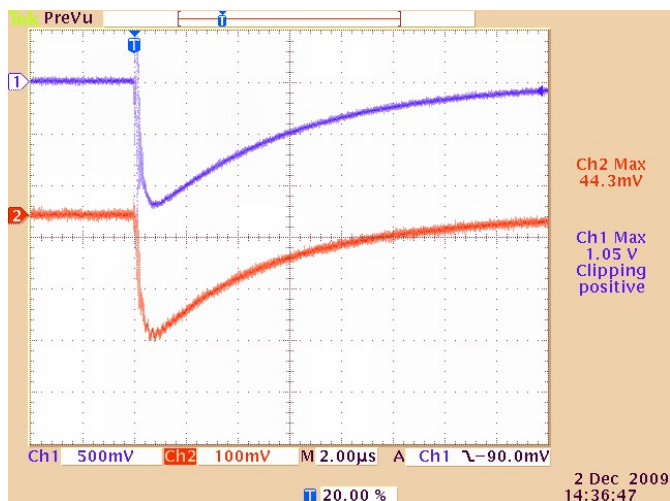
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%

Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%

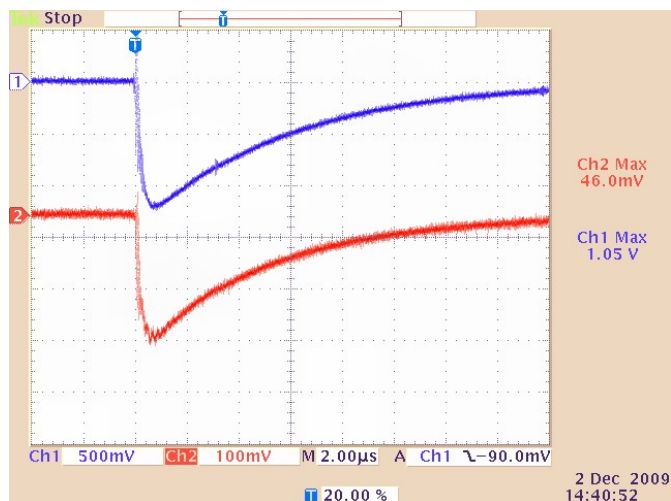


Θερμοκρασία:22°C Πίεση:980mbar Υγρασία:52%

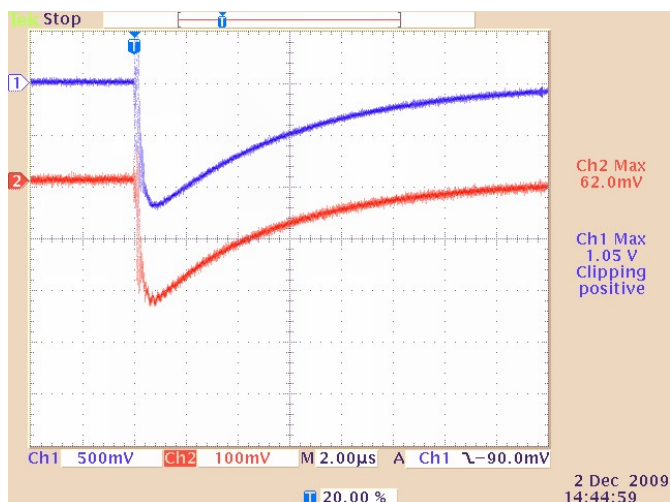
Π.1.5.9 Διάκενο σπινθηριστή: 4,7cm.



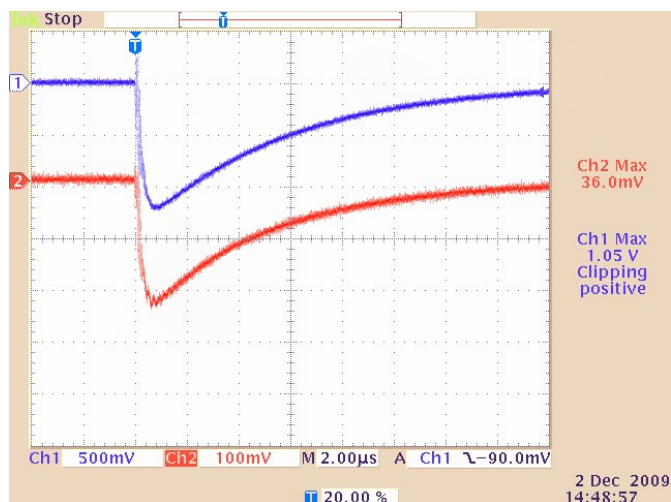
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:52%



Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:52%



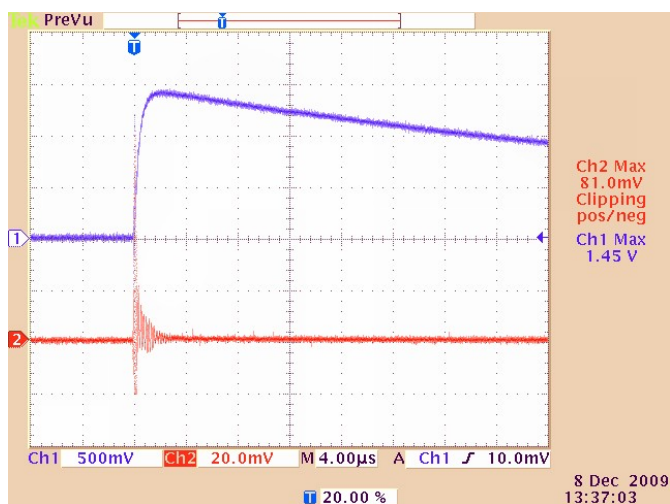
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:52%



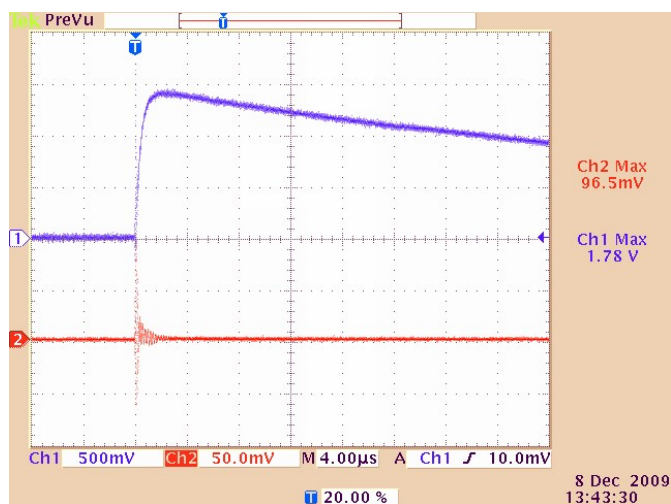
Θερμοκρασία:22°C Πίεση:981mbar Υγρασία:52%

Π.1.6 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος B, υγρασία 0% και θετική πολικότητα.

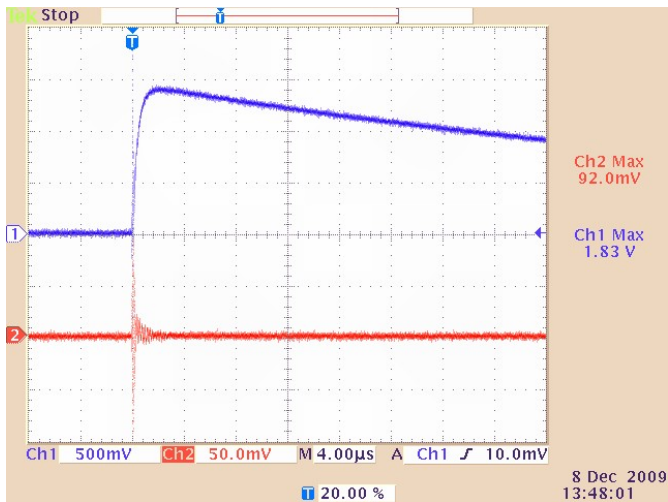
Π.1.6.1 Διάκενο σπινθηριστή: 2,5cm.



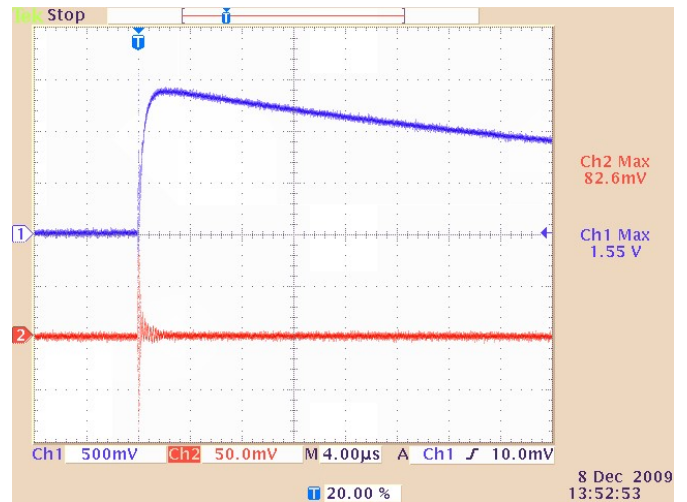
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%

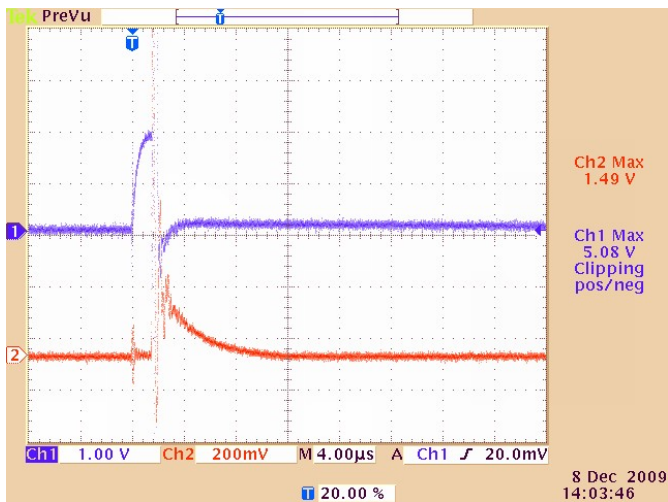


Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 992 mbar Υγρασία: 49%

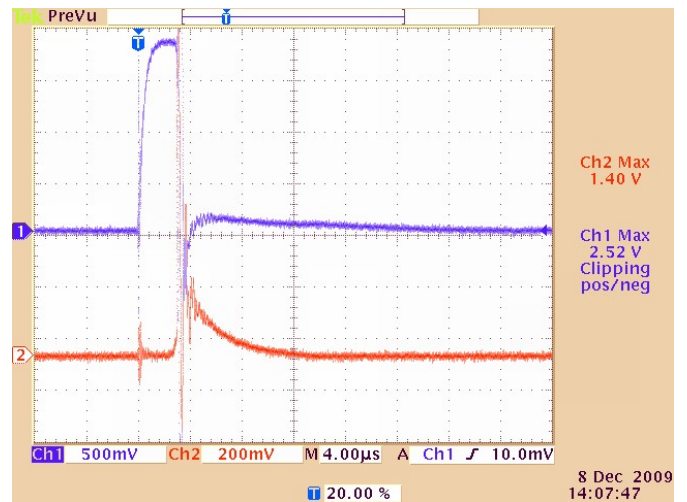


Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 992 mbar Υγρασία: 49%

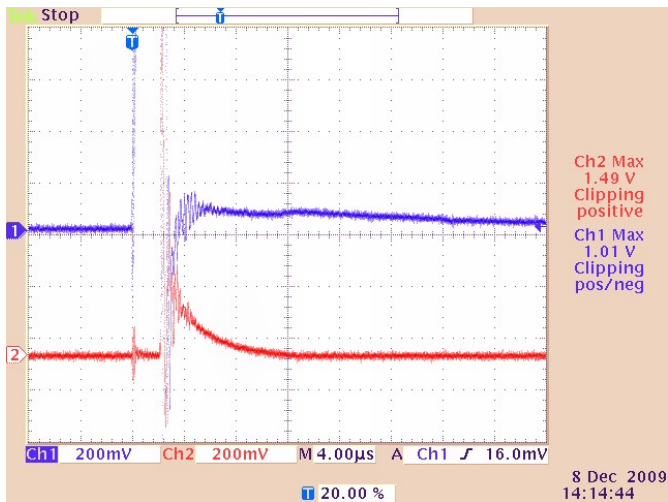
Π.1.6.2 Διάκενο σπινθηριστή: 3,5 cm.



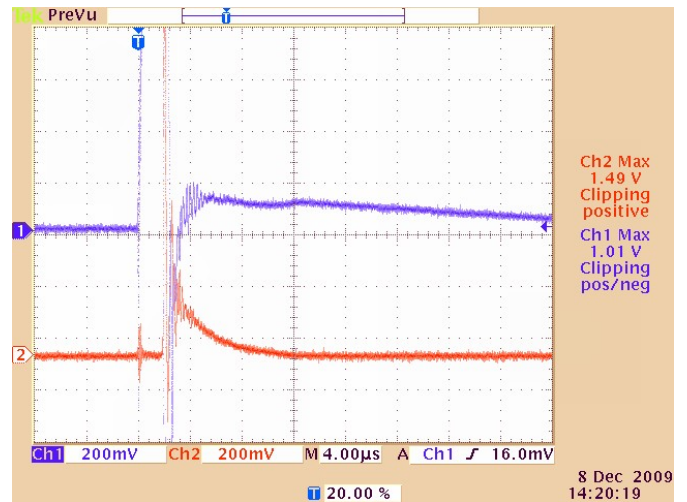
Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 990 mbar Υγρασία: 49%



Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 990 mbar Υγρασία: 49%

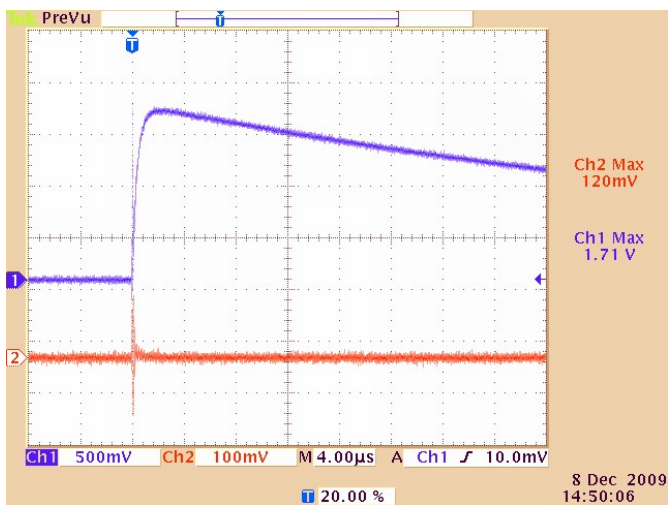


Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 990 mbar Υγρασία: 49%

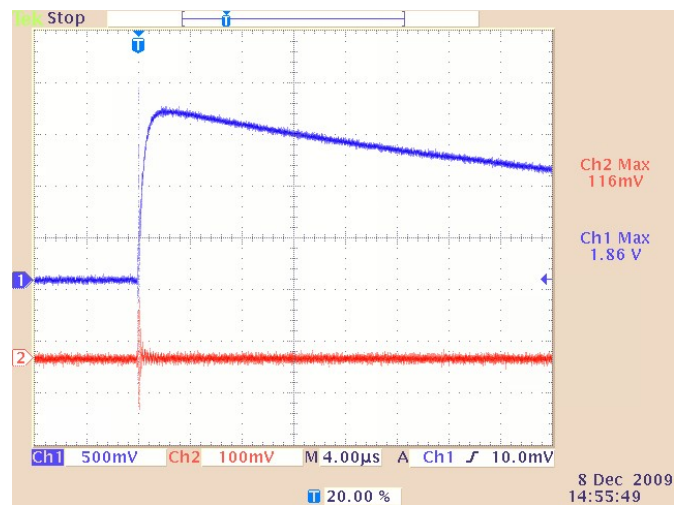


Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 990 mbar Υγρασία: 49%

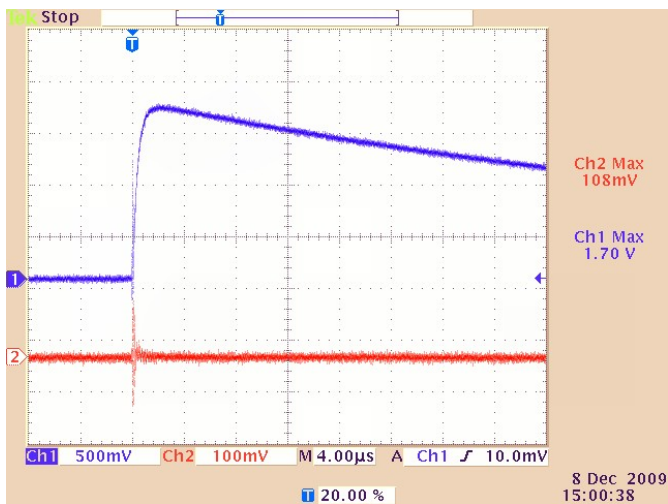
Π.1.6.3 Διάκενο σπινθηριστή: 3cm.



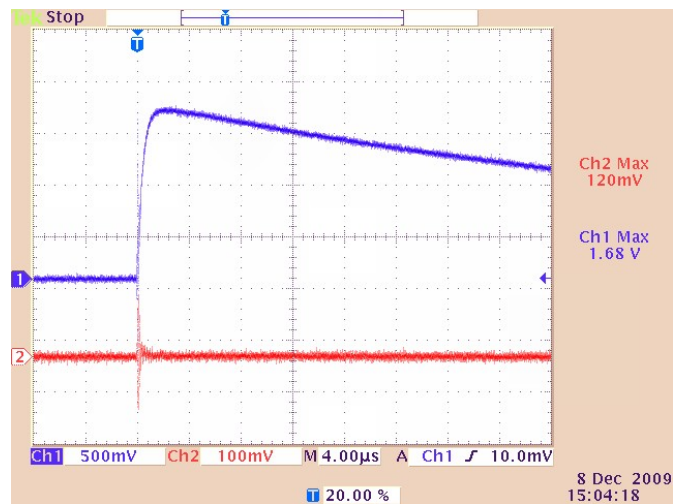
Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 991 mbar Υγρασία: 50%



Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 991 mbar Υγρασία: 50%

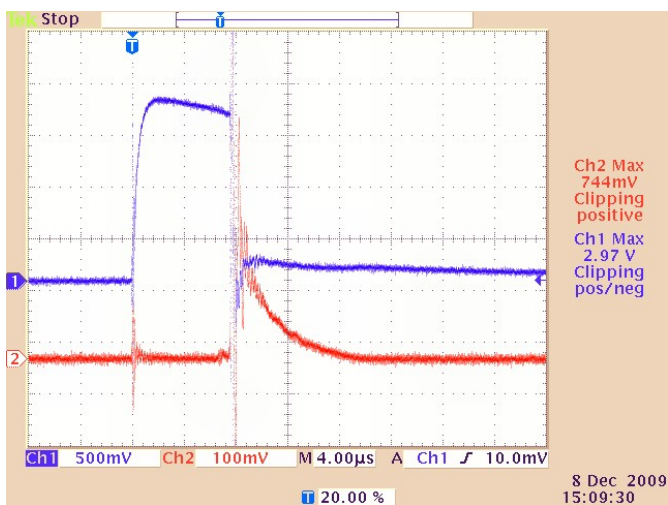


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:991mbar Υγρασία:50%

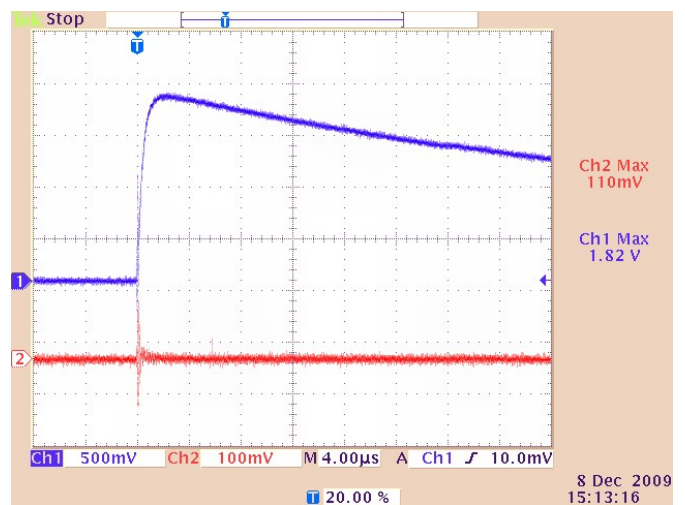


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:991mbar Υγρασία:50%

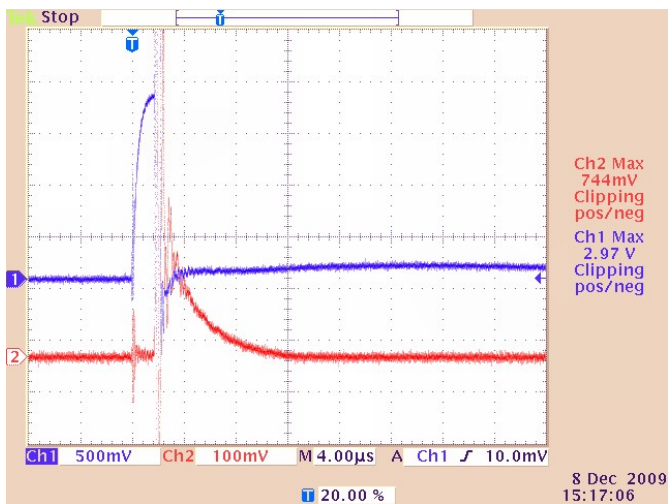
Π.1.6.4 Διάκενο σπινθηριστή: 3,3cm.



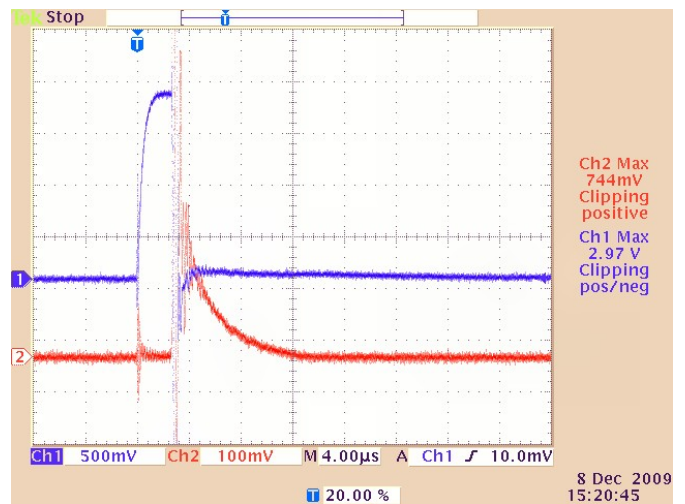
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%

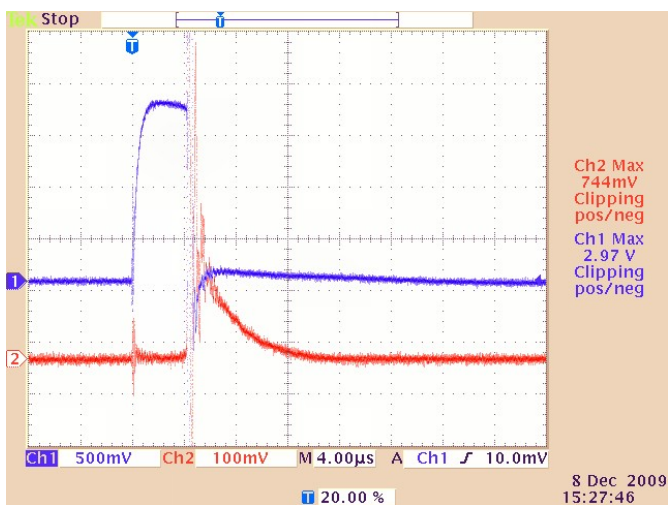


Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 992mbar Υγρασία: 49%

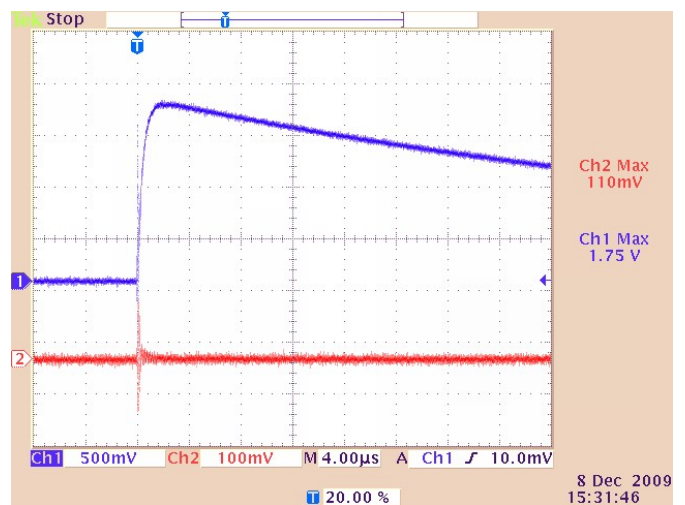


Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 992mbar Υγρασία: 49%

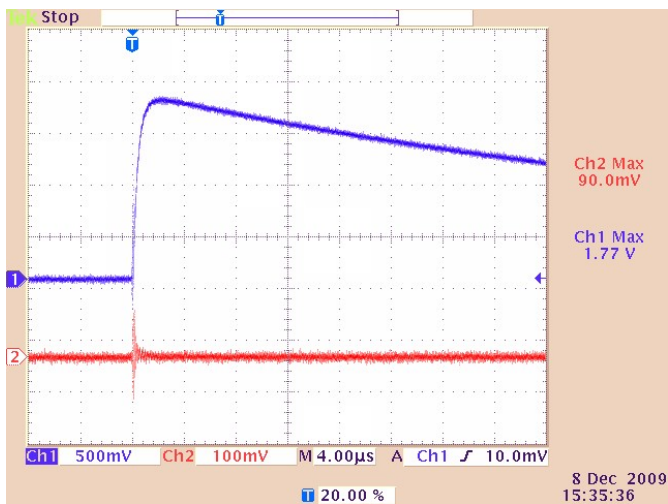
Π.1.6.5 Διάκενο σπινθηριστή: 3,2cm.



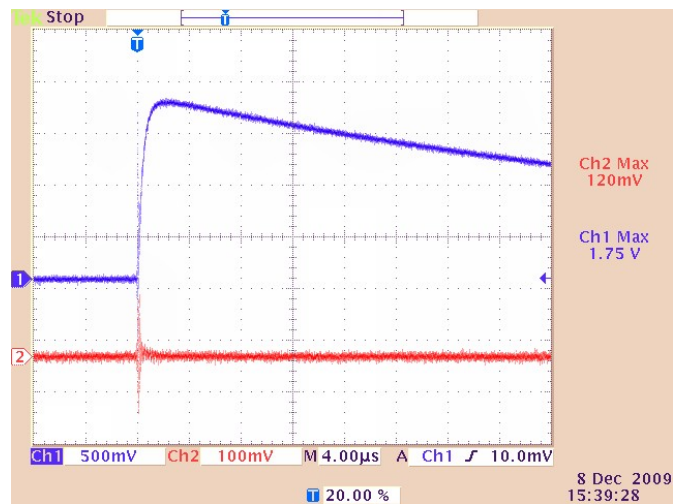
Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 992mbar Υγρασία: 49%



Θερμοκρασία: 21°C Πίεση: 992mbar Υγρασία: 49%

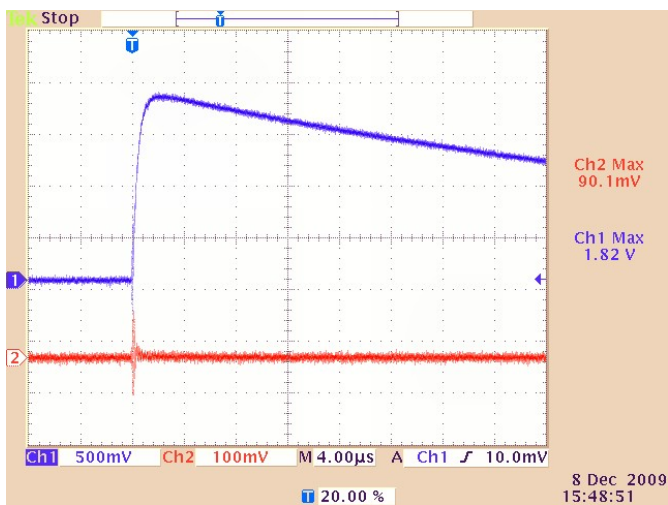


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%

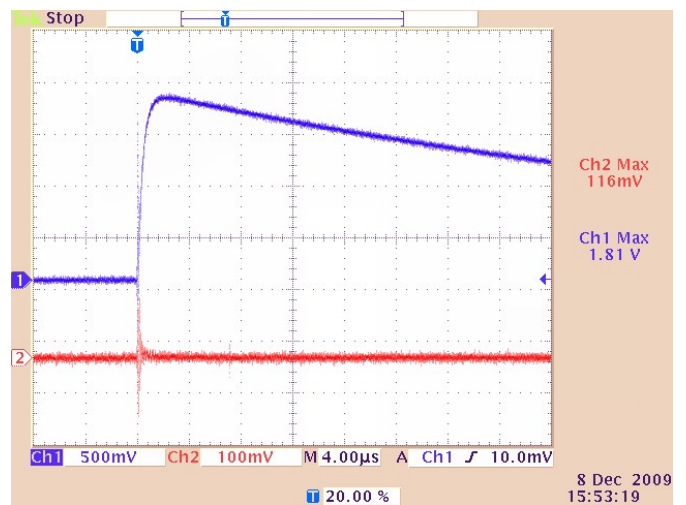


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%

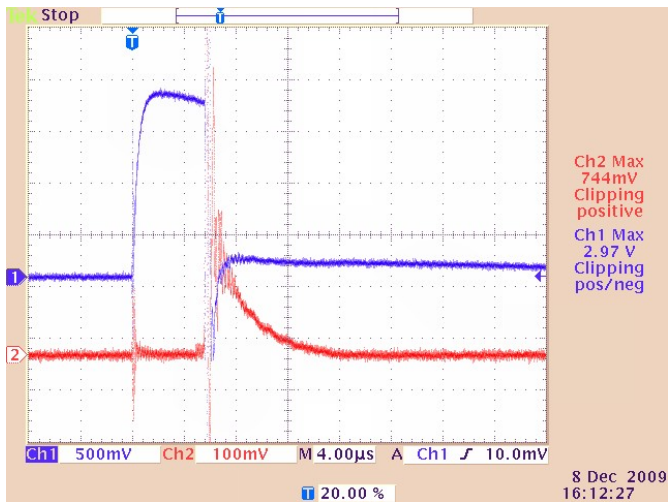
Π.1.6.6 Διάκενο σπινθηριστή: 3,25cm.



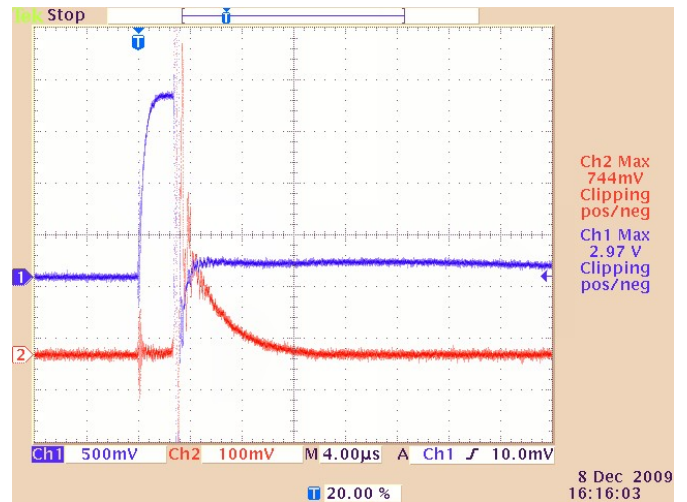
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



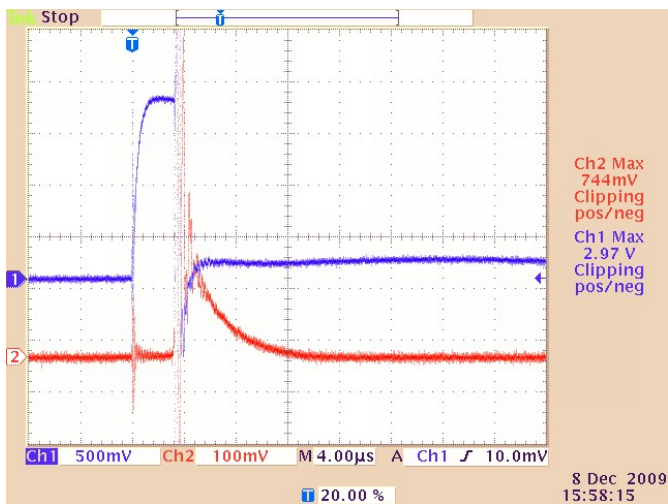
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



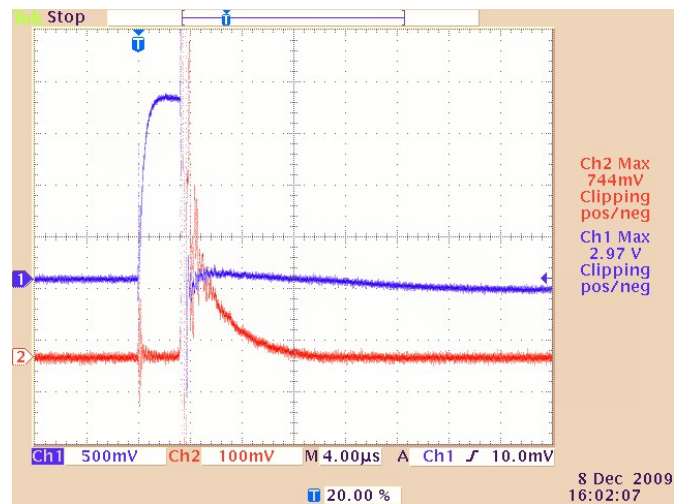
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



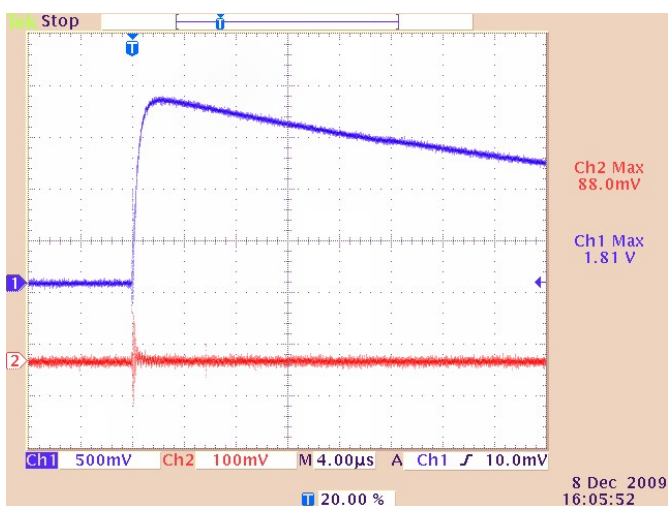
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



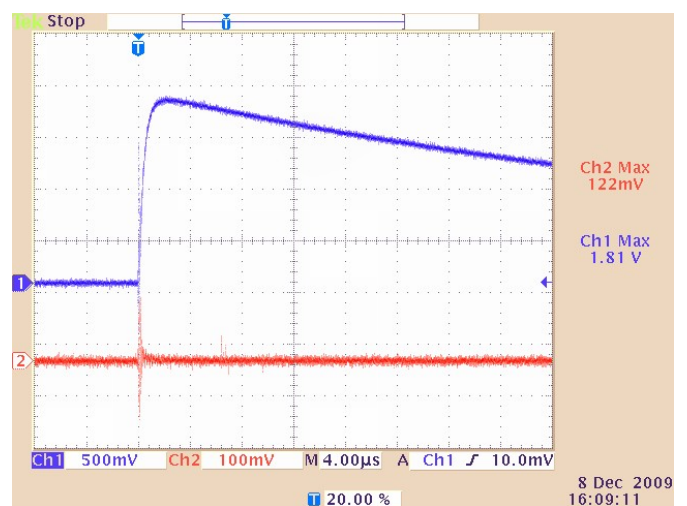
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



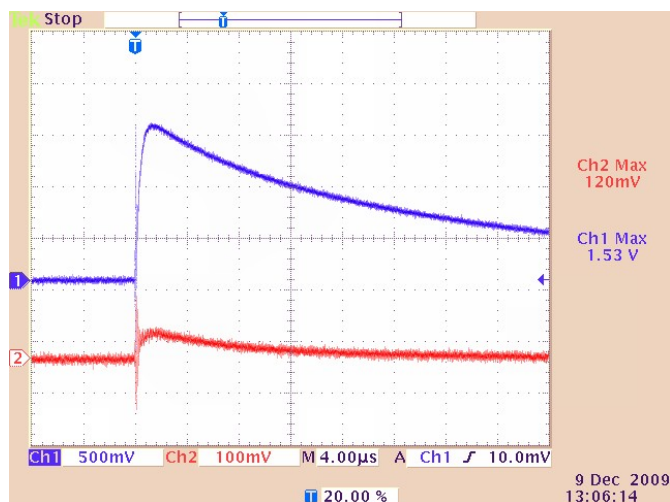
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%



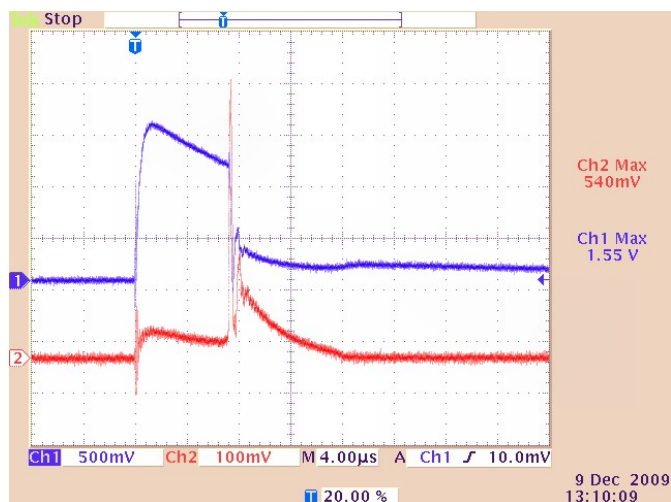
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:992mbar Υγρασία:49%

Π.1.7 Παλμογραφήματα για δείγμα χώματος B, υγρασία 5% και θετική πολικότητα.

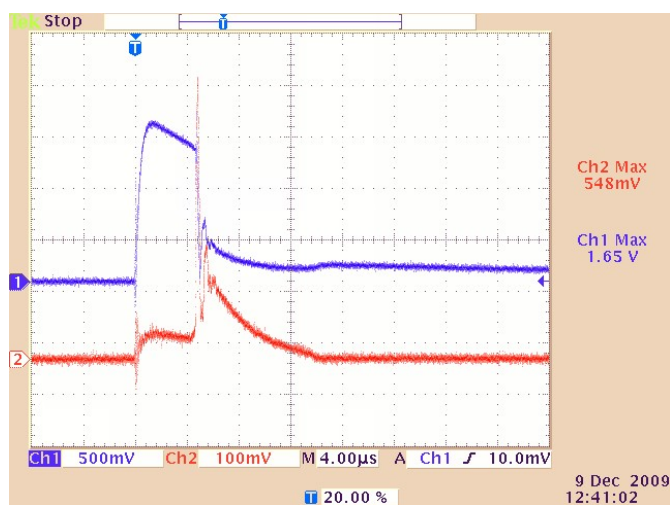
Π.1.7.1 Διάκενο σπινθηριστή: 3,25cm



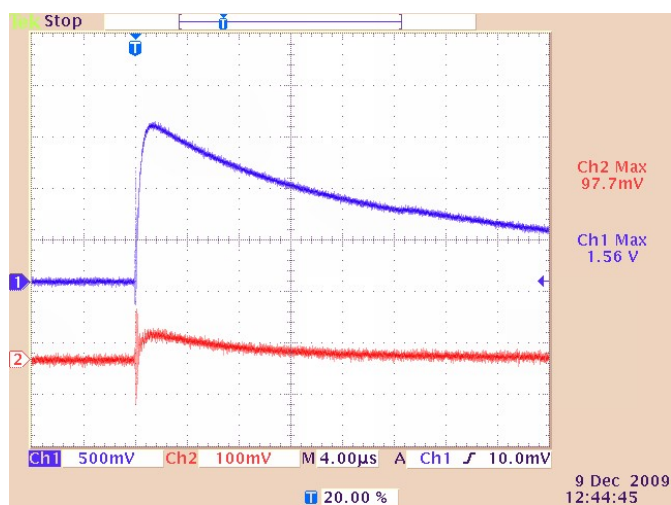
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:985mbar Υγρασία:51%



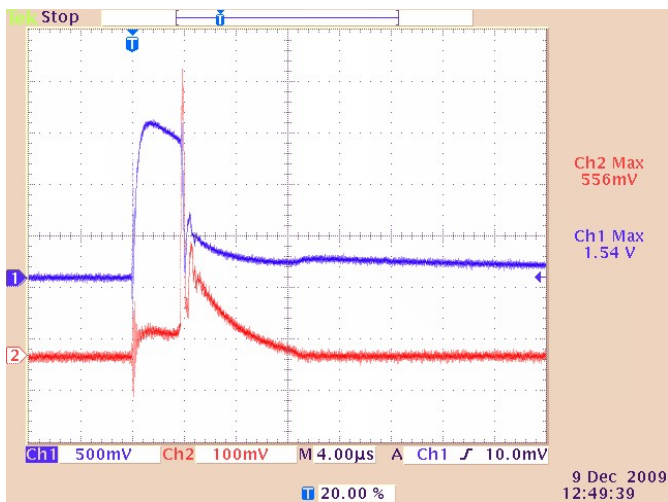
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:985mbar Υγρασία:51%



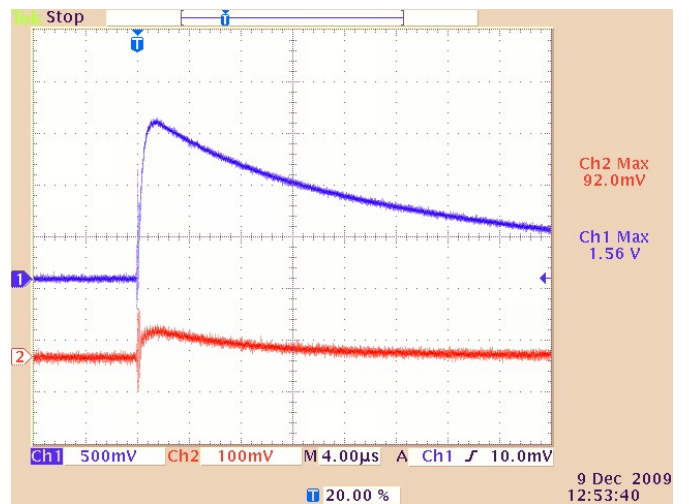
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%



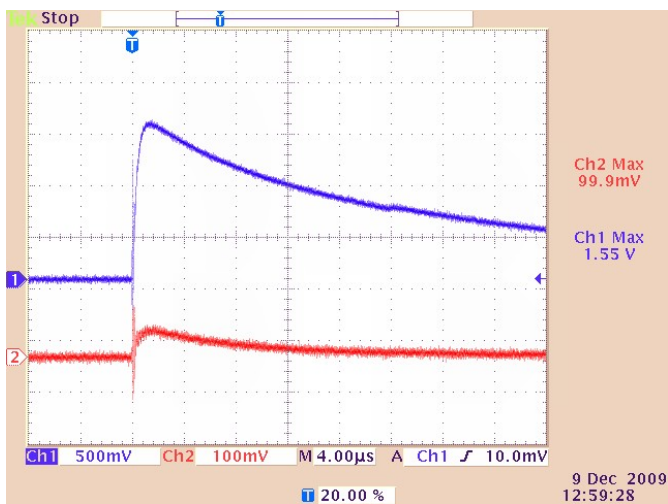
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%



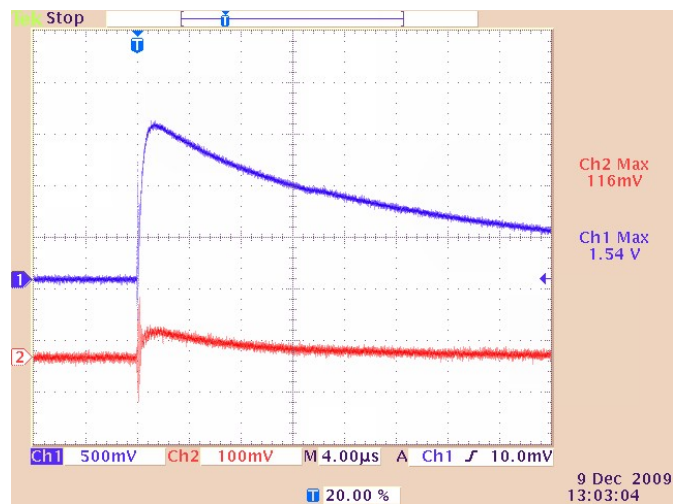
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%

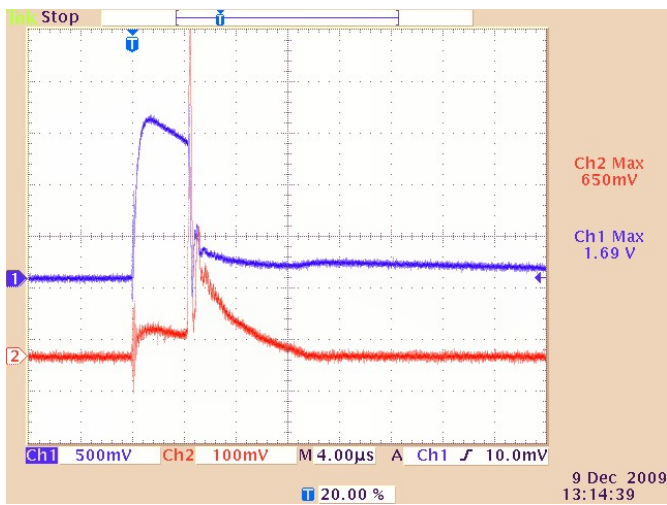


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:985mbar Υγρασία:51%

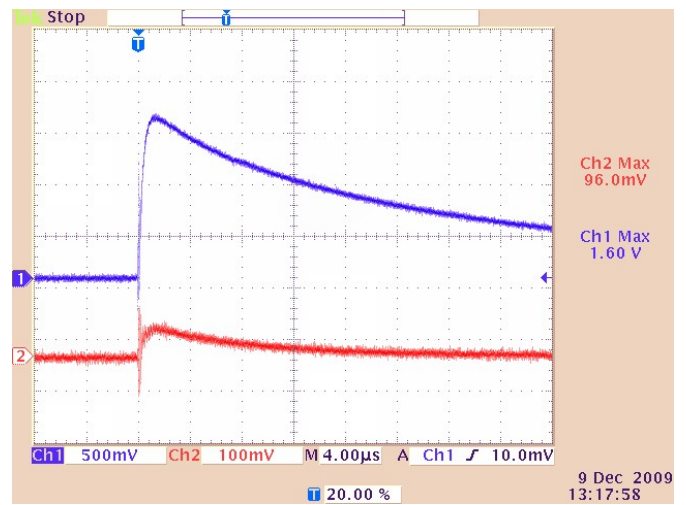


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:985mbar Υγρασία:51%

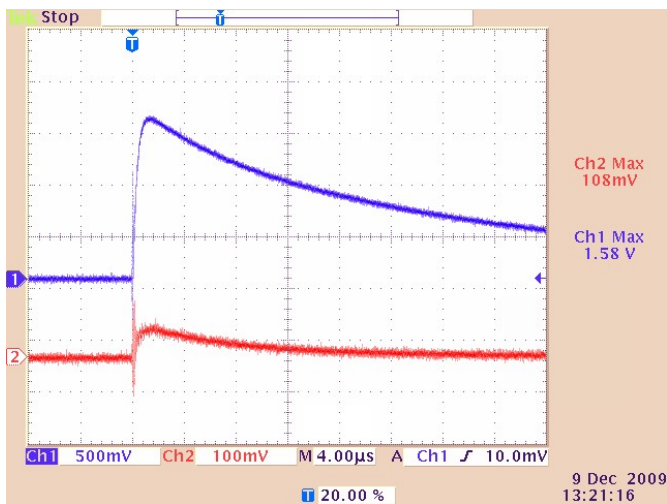
Π.1.7.2 Διάκενο σπινθηριστή: 3,4cm



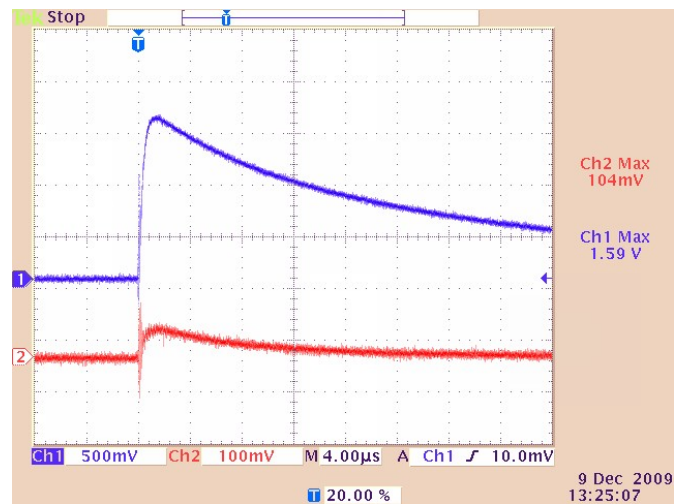
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%

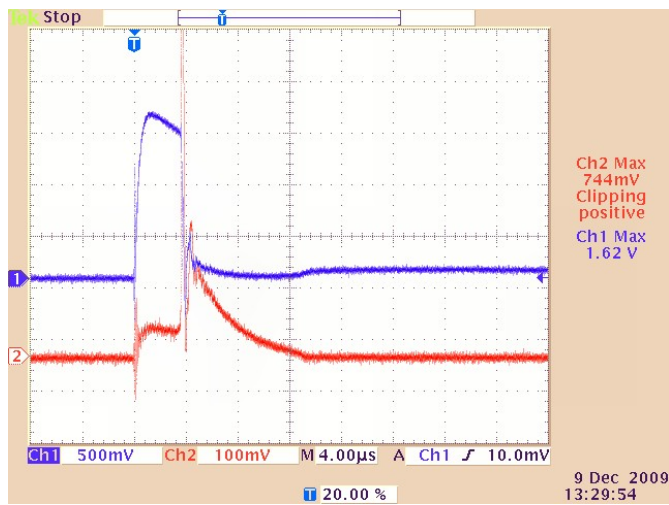


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%

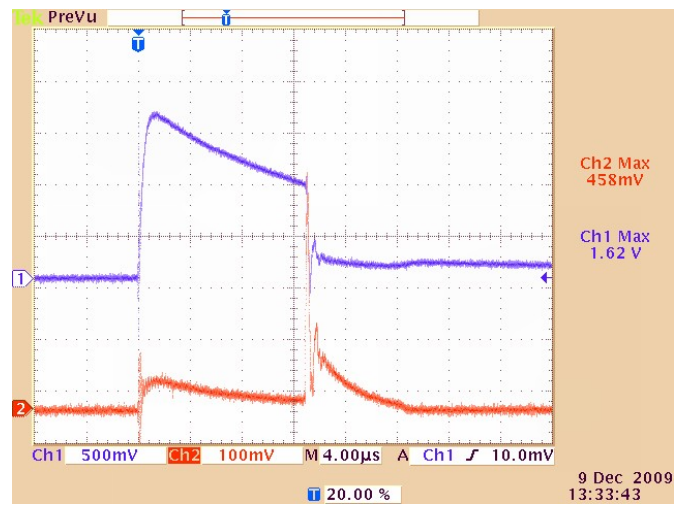


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:51%

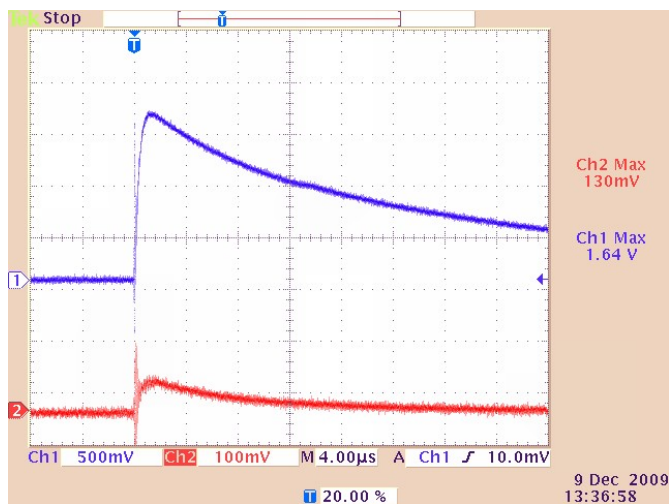
Π.1.7.3 Διάκενο σπινθηριστή: 3,6cm



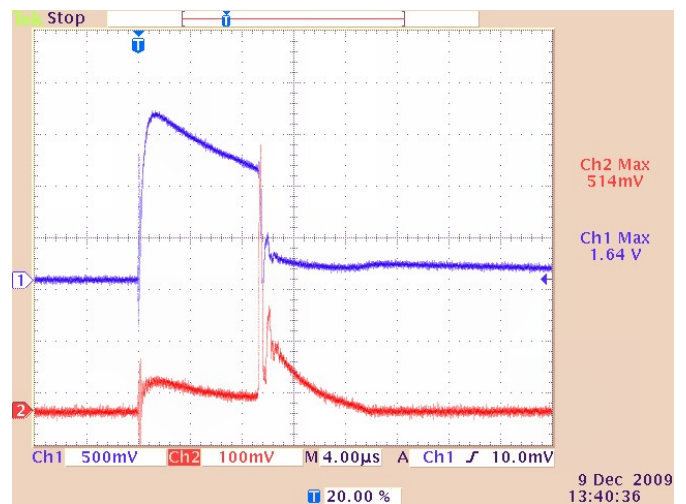
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%

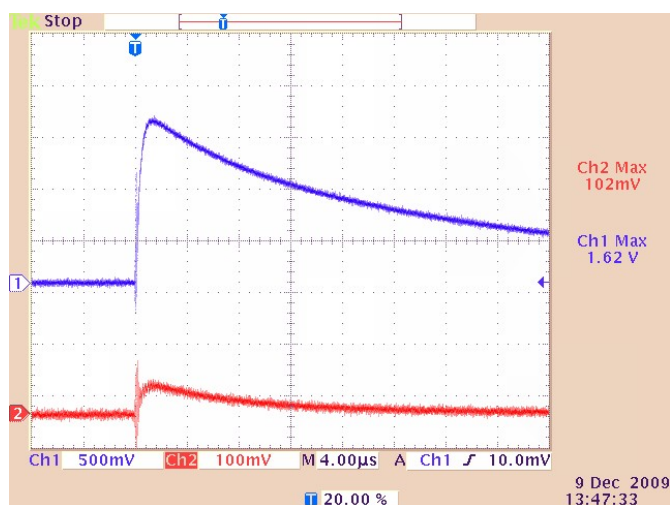


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%

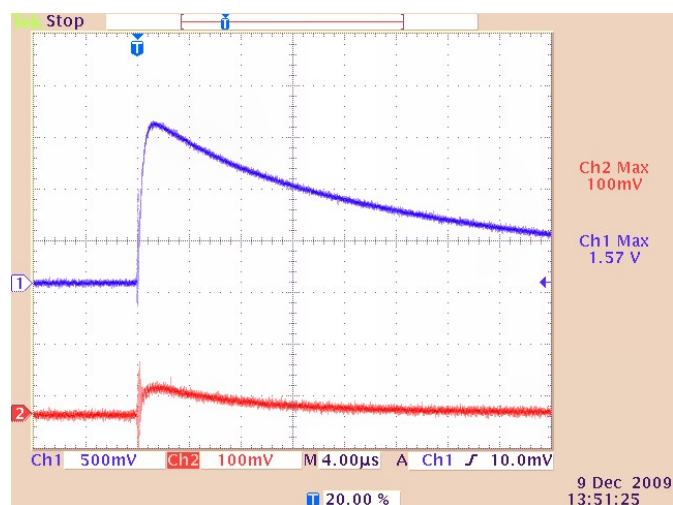


Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%

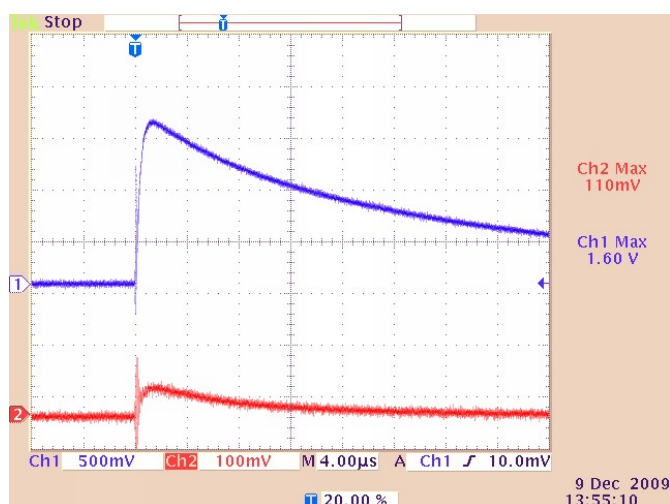
Π.1.7.4 Διάκενο σπινθηριστή: 3,45cm.



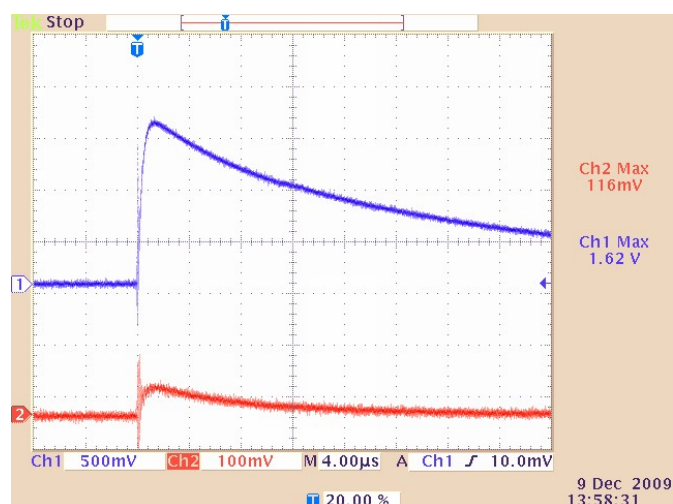
Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%



Θερμοκρασία:21°C Πίεση:984mbar Υγρασία:50%

Στις μετρήσεις θετικής πολικότητας παρατηρείται από την κυματομορφή της επιβαλλόμενης στο δοκίμιο τάσης ότι αυτή λαμβάνει αρνητικές τιμές, γεγονός που οφείλεται στο διαφορικό καταμεριστή. Το συμπέρασμα αυτό εξήχθηκε μέσω καταγραφής της κυματομορφής της τάσης μέσω του μετρητικού συστήματος DIAS, για 10 συνεχόμενες κρούσεις στο δείγμα χώματος A με 0% υγρασία και θετική πολικότητα στο σημείο πριν το διαφορικό καταμεριστή. Η κυματομορφές που λήφθηκαν από το DIAS δεν λάμβαναν αρνητικές τιμές πέραν μερικών παρασίτων.