



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Διδάσκοντες

- Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Καθηγητής.
Γραφείο: 1.2.10 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων
- Ιωάννης Φ. Γκόνος, Αναπληρωτής Καθηγητής.
Γραφείο: 2.2.12 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων
- Νικολέτα Χ. Ηλία, ΕΔΙΠ.
Γραφείο: 1.2.11 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων
- Βασιλική Θ. Κονταργύρη, ΕΔΙΠ.
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων: 1.2.16 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων



Διδασκαλία του μαθήματος

Θεωρία

- Πέμπτη: 10:45 - 14:30
- Εξ αποστάσεως μέσω MS Teams
<https://teams.microsoft.com/l/team/19%3a6a4f93cbc2b642e5a714063894eab515%40thread.tacv2/conversations?groupId=68f0e21e-ae87-4329-be6a-18e0c4983e41&tenantId=075e0cb3-752a-4320-b367-6d08b7918c40>
- Λογιστικές ασκήσεις

Εργαστήριο

- Πέμπτη: 15:00 - 19:30 (σε ομάδες)
- Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων)

Πληροφορίες για το μάθημα

- http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php?cidReq=ECE1109

Εξέταση - Βαθμολογία

- Η τελική βαθμολογία του μαθήματος θα διαμορφωθεί από:
 - το βαθμό της Γραπτής Εξέτασης (βαρύτητα 70%)
 - το βαθμό του Εργαστηρίου (βαρύτητα 15%)
 - το βαθμό σε σειρές ασκήσεων (βαρύτητα 15%).

Προϋπόθεση: Ο τελικός βαθμός μπορεί να είναι προβιβάσιμος μόνο αν ο βαθμός της Γραπτής Εξέτασης είναι μεγαλύτερος από 3 στα 7.
- Η εξέταση του μαθήματος πραγματοποιείται με ανοικτά βιβλία και σημειώσεις.
- Η συμμετοχή στη γραπτή εξέταση του μαθήματος προϋποθέτει την επιτυχή παρακολούθηση του εργαστηρίου.
- Ο βαθμός του εργαστηρίου συνυπολογίζεται μόνο κατά το έτος παρακολούθησης του εργαστηρίου. Για τους φοιτητές παλαιότερων ετών ο τελικός βαθμός προκύπτει μόνο από το βαθμό του γραπτού και τις σειρές ασκήσεων.

Βιβλιογραφία

■ Επιλογές Συγγραμμάτων :

- Βιβλίο [50659285]: Υψηλές τάσεις Ι, Σταθόπουλος Ι. [Λεπτομέρειες](#)
- Βιβλίο [50656002]: Υψηλές Τάσεις, 3η Έκδοση, Οικονόμου Λ., Χριστοδούλου Χ., Φώτης Γ. [Λεπτομέρειες](#)
- Βιβλίο [86198405]: Στοιχεία υψηλών τάσεων, Μιχαήλ Γ. Δανίκας [Λεπτομέρειες](#)

■ Πρόσθετο Διδακτικό Υλικό:

- Βιβλίο [73270178]: High voltage engineering [electronic resource], Kuffel, E. / Zaengl, W. S. / Kuffel, J. [Λεπτομέρειες](#)
- Βιβλίο [91680592]: High Voltage Engineering [electronic resource], Andreas Küchler [Λεπτομέρειες](#)

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (1)

- Το εργαστήριο είναι υποχρεωτικό για το μάθημα. Απαιτούνται:
 - παρουσία των φοιτητών σε όλες τις εργαστηριακές ασκήσεις που διεξάγονται στη διάρκεια του εξαμήνου και
 - παράδοση γραπτής εργασίας. Η εργασία πρέπει να παραδοθεί την ημέρα διεξαγωγής της επόμενης εργαστηριακής άσκησης από τον καθένα φοιτητή.
- Οι φοιτητές, κατά την προσέλευσή τους στο εργαστήριο για την παρακολούθηση εργαστηριακής άσκησης, πρέπει να είναι προετοιμασμένοι ως προς το θεωρητικό μέρος της αντίστοιχης εργαστηριακής άσκησης.
- Τις εκφωνήσεις των εργαστηριακών ασκήσεων μπορείτε να τις βρείτε στην ιστοσελίδα του μαθήματος στο mycourses.
- Συμμετοχή στο εργαστήριο μία φορά μόνο, την πρώτη φορά που δίνεται το μάθημα.

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (1)

- Οι εργαστηριακές ασκήσεις θα διεξάγονται ημέρα Πέμπτη κατά τις εξής ώρες:
 - Τμήμα Α στις 15:00-16:30
 - Τμήμα Β στις 16:30-18:00
 - Τμήμα Γ στις 18:00-19:30
- Για την εγγραφή σας σε ομάδα απαιτείται:
 - να έχετε πρώτα εγγραφεί ως χρήστης του μαθήματος στο mycourses και
 - μετά να εγγραφείτε σε βάρδια στην ενότητα Εργαλεία-Ομάδες.
- Οι φοιτητές μπορούν να επιλέξουν, εφ' όσον αυτό καθίσταται δυνατόν, την ώρα που επιθυμούν να παρακολουθήσουν τις εργαστηριακές ασκήσεις. Είναι αυτονόητο ότι, όσο πιο γρήγορα κάνετε την εγγραφή σας, τόσο πιο εύκολο θα είναι να επιλέξετε ωράριο της αρεσκείας σας.

Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων

■ Εργαστηριακές ασκήσεις

- Μετρητικό σύστημα γεννήτριας υψηλών κρουστικών τάσεων
- Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών λαδιών - Διάσπαση ατμοσφαιρικού αέρα σε ανομοιογενές πεδίο με εναλλασσόμενη τάση
- Απώλειες CORONA σε γραμμές υψηλής τάσης

■ Σειρές ασκήσεων

■ Δυνατότητα εργαστηριακής εμπάθυνσης

■ Λογιστικές ασκήσεις

Μετρητικό σύστημα γεννήτριας υψηλών κρουστικών τάσεων

Η έννοια της αβεβαιότητας

Ανάγκη για έγκυρο τρόπο «μέτρησης» της ποιότητας μέτρησης.



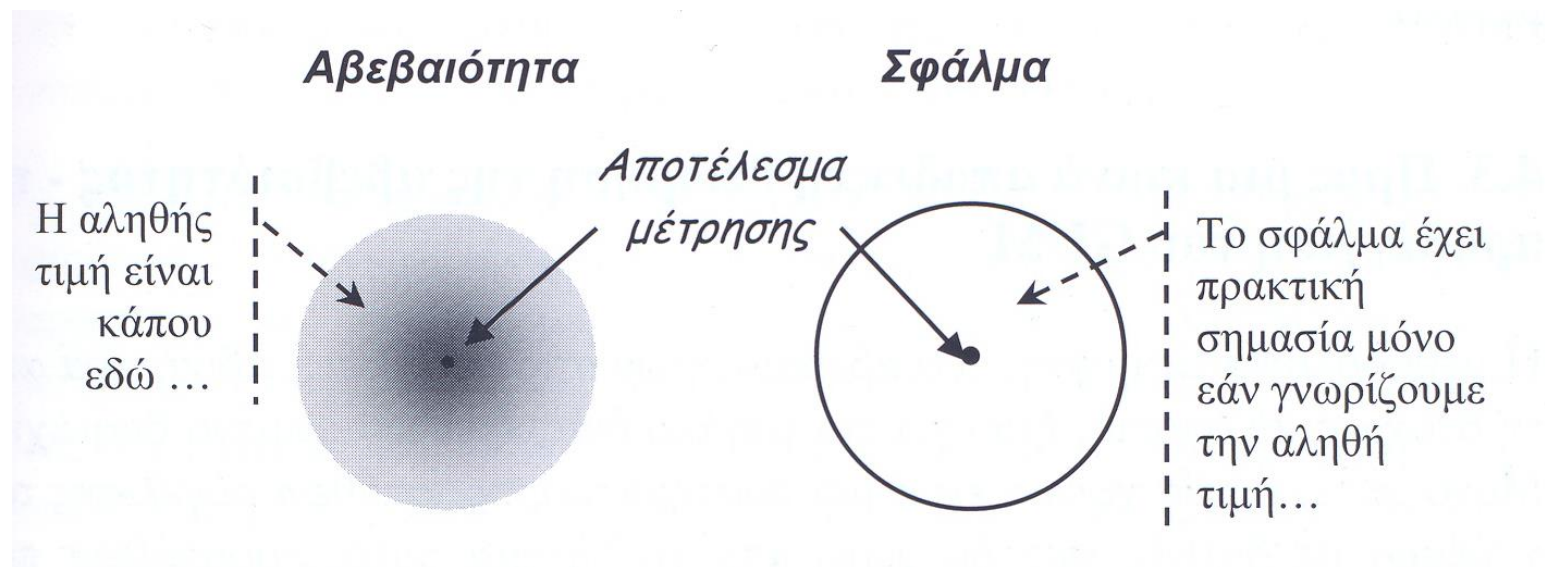
Αβεβαιότητα

Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μιας αληθούς τιμής του μετρούμενου μεγέθους.

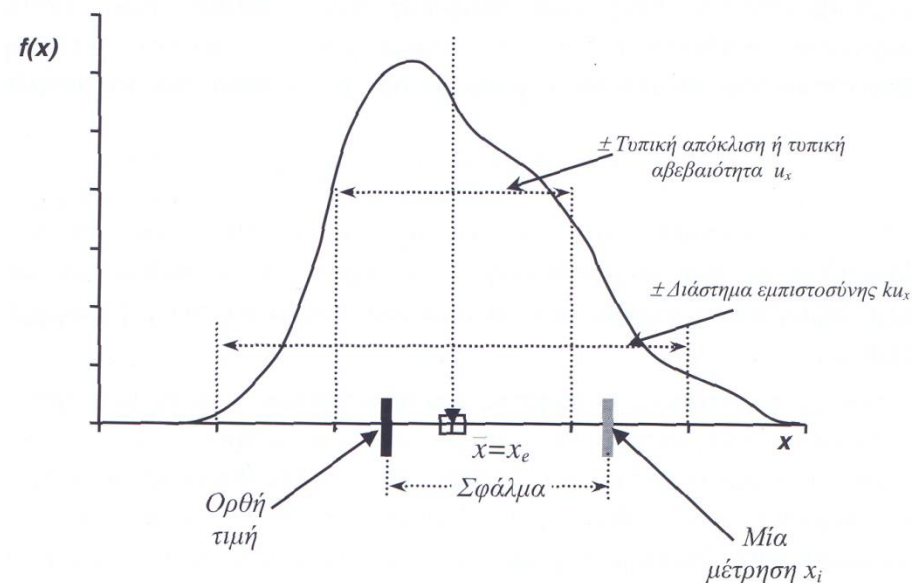
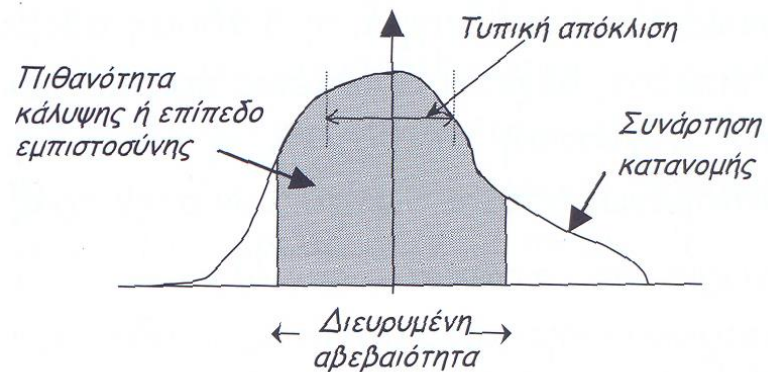
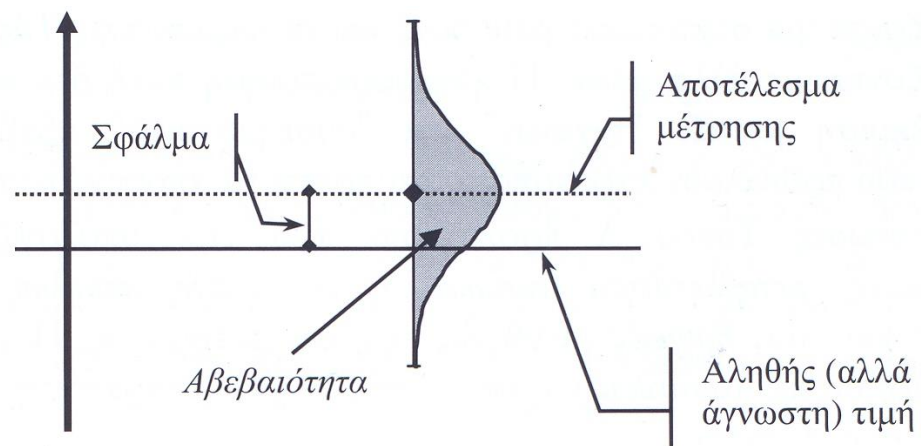
Η αβεβαιότητα ορίζεται πρακτικά ως παράμετρος συνδεδεμένη με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος (ISO/IEC Guide 98).

Το σφάλμα αποτελεί μια αφηρημένη έννοια σχετική με ένα σημείο, ενώ η αβεβαιότητα περιγράφει ένα εύρος τιμών

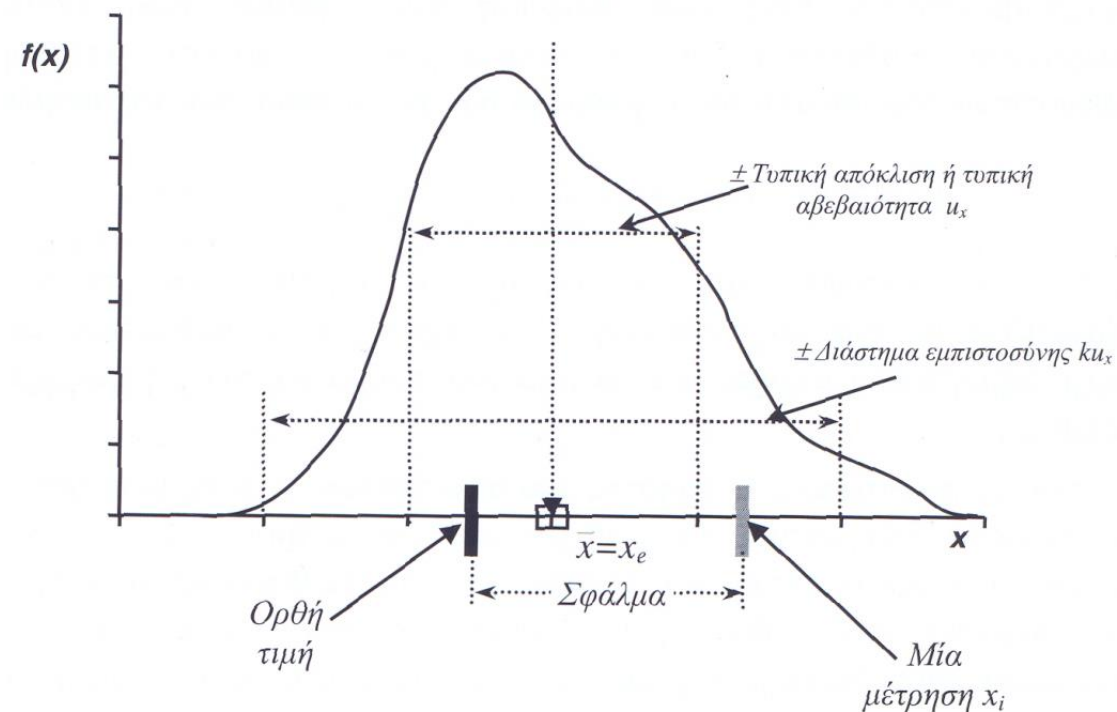
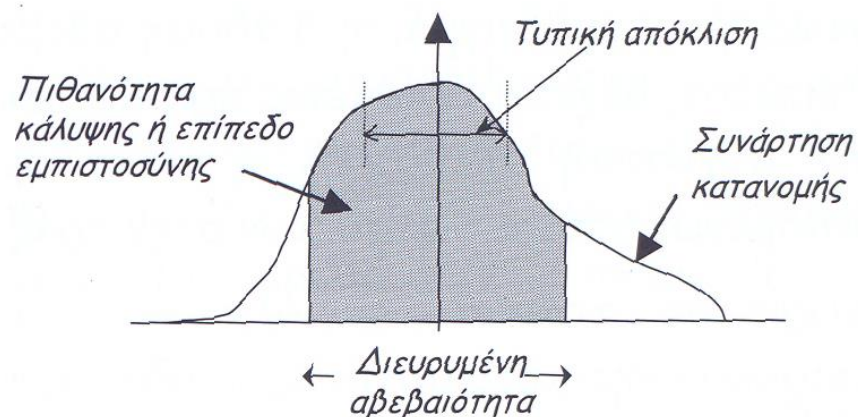
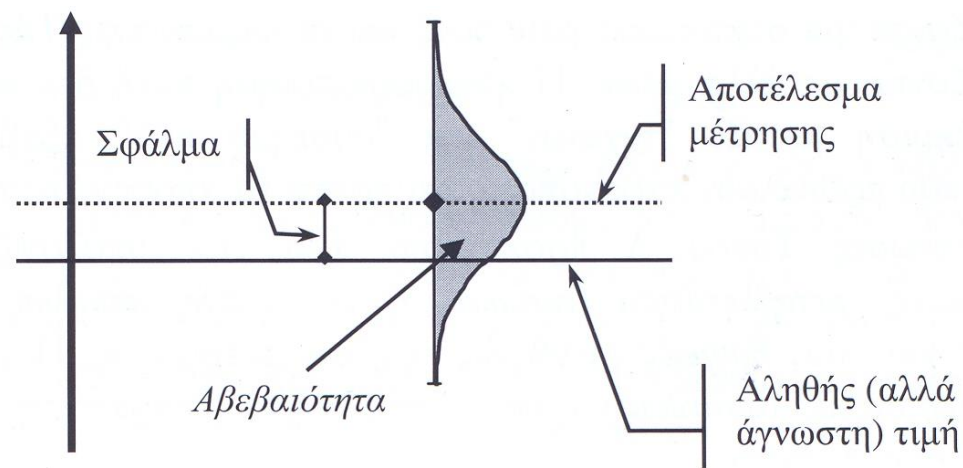
Η έννοια της αβεβαιότητας



Η έννοια της αβεβαιότητας



Η έννοια της αβεβαιότητας



Κατηγοριοποίηση της αβεβαιότητας

Αβεβαιότητα τύπου A

Η αβεβαιότητα τύπου A (random uncertainty, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60-2) 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.

Αβεβαιότητα τύπου B

Η Αβεβαιότητα τύπου B (systematic uncertainty) 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

Συνιστώσα τύπου A

- Προσδιορισμός με στατιστικές μεθόδους (π.χ. ελάχιστα τετράγωνα)
- Όταν υπάρχει τυχαία διακύμανση του αποτελέσματος ή διακύμανση για τυχαίους λόγους:
 - Αστάθεια του οργάνου μέτρησης
 - Διακύμανση του μετρούμενου μεγέθους
 - Τυχαίες επιδράσεις μη ελεγχόμενων συνθηκών
 - Σφάλματα χειριστή
 -
- Χαρακτηρίζει τη διακύμανση αυτή
- Τύπου A: καμία πληροφορία για το εάν το όργανο μετράει σωστά!

Συνιστώσα τύπου Α

Ανεξάρτητες επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε ελεγχόμενες συνθήκες επαναληψιμότητας

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$$

Μέση τιμή

$$\bar{x} = \sum x_i / N$$

Τυπική απόκλιση

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

Τυπική αβεβαιότητα μέσης τιμής

$$u_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N(N - 1)}}$$

Στα π.χ. 95% των περιπτώσεων (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%), το διάστημα $[\bar{x} - 2u, \bar{x} + 2u]$ θα περιέχει τη **μέση τιμή** επαναλαμβανόμενων παρατηρήσεων.

Στα 95% των περιπτώσεων, το διάστημα $[\bar{x} - 2s, \bar{x} + 2s]$ θα περιέχει την κάθε **ατομική παρατήρηση**.

Η αβεβαιότητα τύπου Α χαρακτηρίζει τη μέση τιμή.

Δεν χαρακτηρίζει το δείγμα τιμών, δεν χαρακτηρίζει την κάθε παρατήρηση.

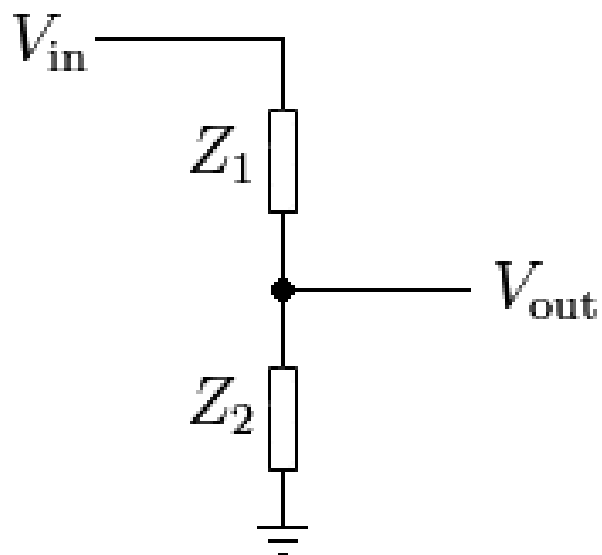
Συνιστώσα τύπου B

- Διατάξεις μέτρησης:

- Πιστοποιητικό διακρίβωσης
- Από χαρακτηριστικά ακρίβειας (Accuracy) $\longrightarrow \frac{accuracy}{\sqrt{3}}$
- Δεδομένα από προηγούμενες μετρήσεις
- Περιβαλλοντικές συνθήκες
- Εμπειρία, επιστημονική γνώση (το πιο σημαντικό)
- Εισαγόμενες τιμές που προσδιορίστηκαν κάπου, κάποτε (Handbook, ...)
-

Συνδυασμένη (συνολική) αβεβαιότητα: $u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$

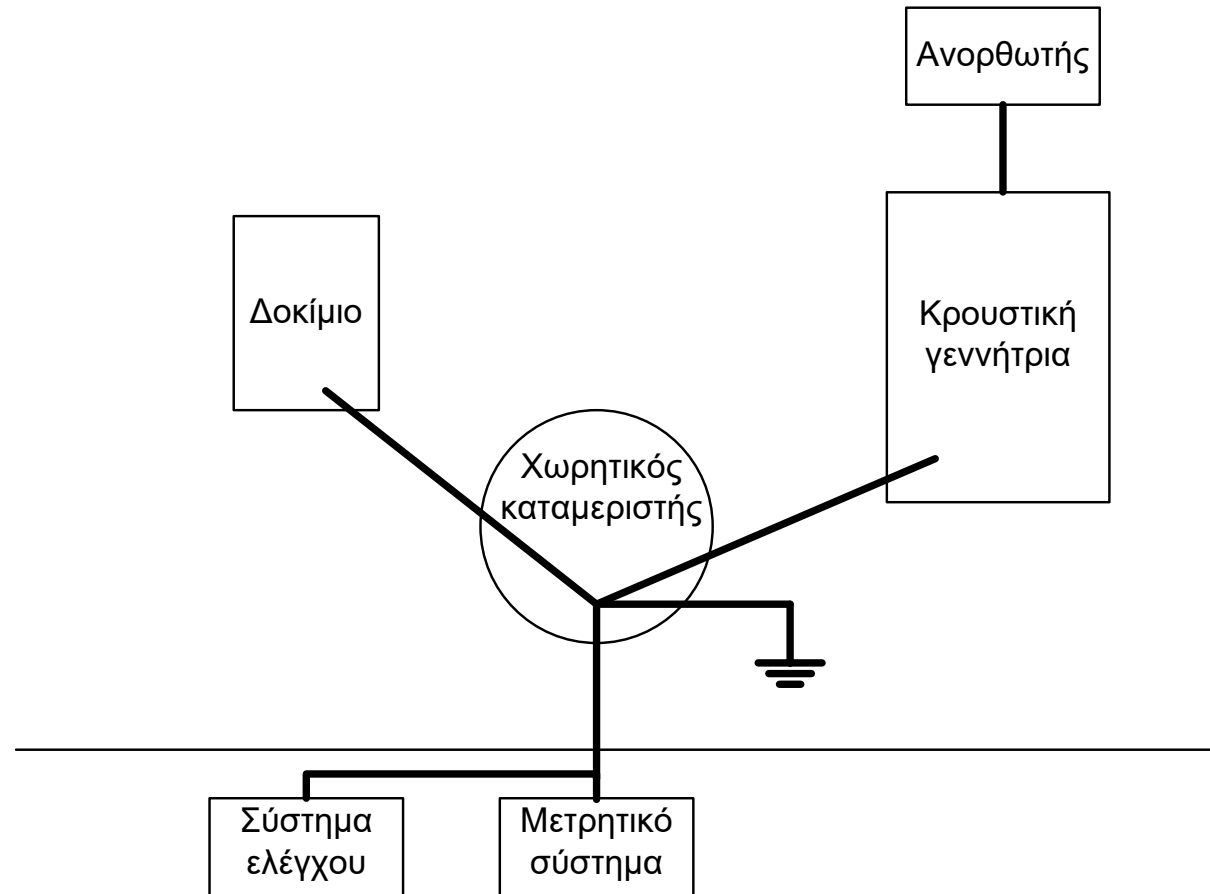
Καταμεριστής



$$\kappa = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_{out} = I \cdot Z_2 = V_{in} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = V_{in} \cdot \kappa$$

Διαδικασία επαλήθευσης καταμεριστών υψηλής τάσης



Για τη διακρίβωση ενός καταμεριστή σε κρουστική τάση πρέπει να εφαρμοστούν 10 θετικές και κατόπιν 10 αρνητικές κρουστικές τάσεις 1,2/50μs στον παράλληλο συνδυασμό δύο καταμεριστών.

Διαδικασία επαλήθευσης καταμεριστών υψηλής τάσης - Πειραματική διάταξη

Μετρητικό σύστημα γεννήτριας
υψηλών κρουστικών τάσεων



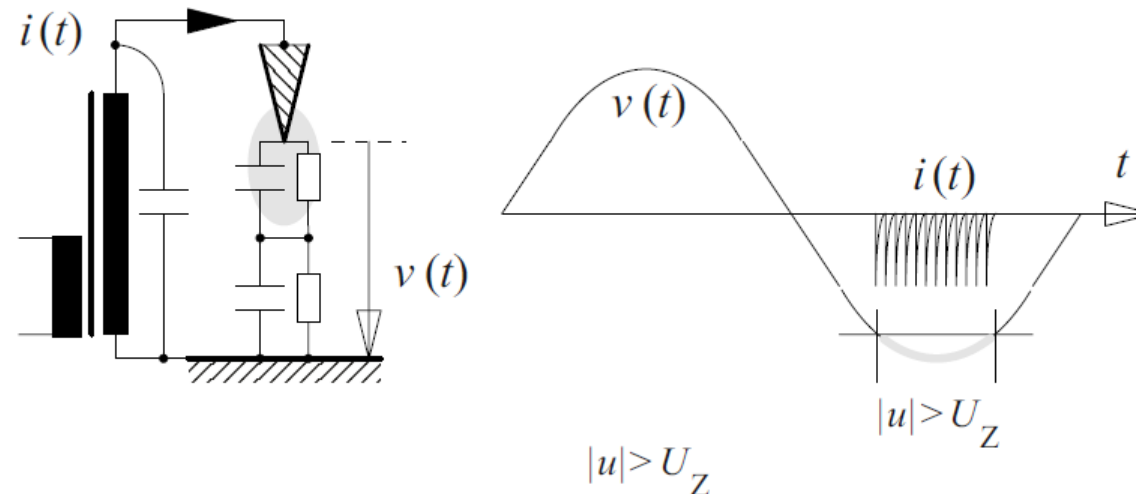
Απώλειες CORONA σε γραμμές υψηλής τάσης



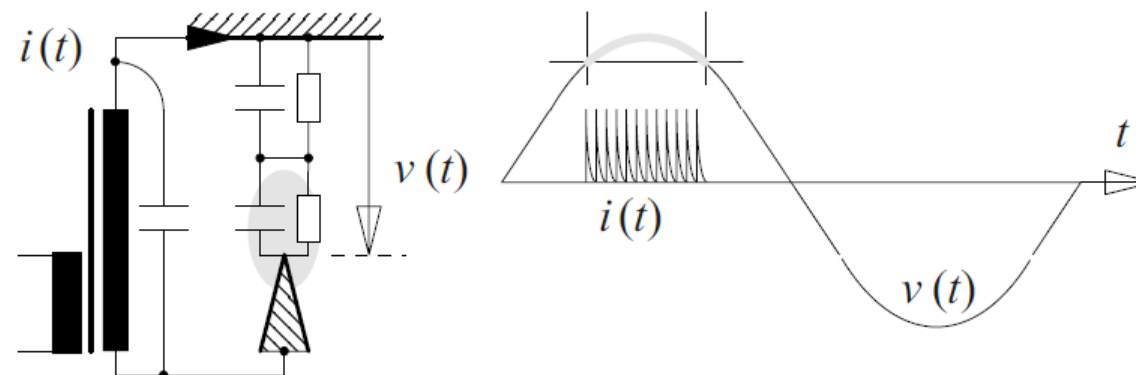
Εκκενώσεις Corona

Λαμβάνουν χώρα σε ισχυρά ανομοιογενές πεδίο, δημιουργούμενο από διάταξη ηλεκτροδίων με αέριο μονωτικό, όταν η τάση αυξάνεται πάνω μία τιμή.

Ακίδα υπό υψηλή τάση,
πλάκα γειωμένη



Ακίδα γειωμένη,
πλάκα υπό υψηλή τάση



Εκκενώσεις Corona σε γραμμές υψηλής τάσης

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των αγωγών μιας εναέριας γραμμής, στην οποία γίνεται έναρξη των ηλεκτρικών εκκενώσεων, εξαρτάται από:

- τη μορφή της τάσεως (συνεχής ή εναλλασσόμενη)
- τις επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες
- την κατάσταση της επιφάνειας των αγωγών
- την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια των αγωγών
- τη διάμετρο των αγωγών

Εκκενώσεις Corona σε γραμμές υψηλής τάσης

Συνέπειες:

- παράσιτα στους γειτονικούς ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς δέκτες
- πρόσθετες απώλειες στη μεταφορά της ενέργειας
- χαρακτηριστικό τριγμό, ο οποίος ακούγεται εύκολα
- θυσανοειδείς εκκενώσεις κατά μήκος των αγωγών, ορατές κατά τη διάρκεια της νύχτας
- παραμόρφωση των επί της γραμμής οδευόντων κυμάτων



<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.flickr.com%2Fphotos%2Frowdey%2F6097456172%2F&psig=AOvVaw3LLf71UGL7aQBJPcXqigJ8&ust=1583398584193000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCLjl58K5gOgCFQAAAAAdAAAAABAT>

Εκκενώσεις Corona σε γραμμές υψηλής τάσης

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E επί του αγωγού της γραμμής σε συνάρτηση με την τάση U της γραμμής δίδεται από τη σχέση:

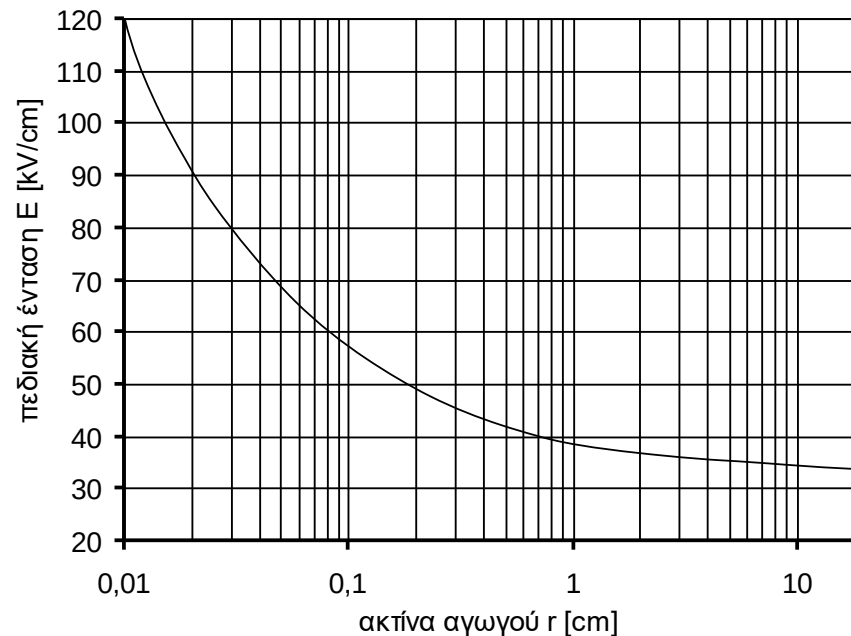
$$E = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{2H}{r}\right)}$$

όπου r η ακτίνα του αγωγού και H το ύψος του από την επιφάνεια του εδάφους.

Σε συνθήκες πίεσως και θερμοκρασίας αποκλίνουσες από τις κανονικές η U πρέπει να πολλαπλασιάζεται με τη σχετική πυκνότητα του αέρα δ , όπου

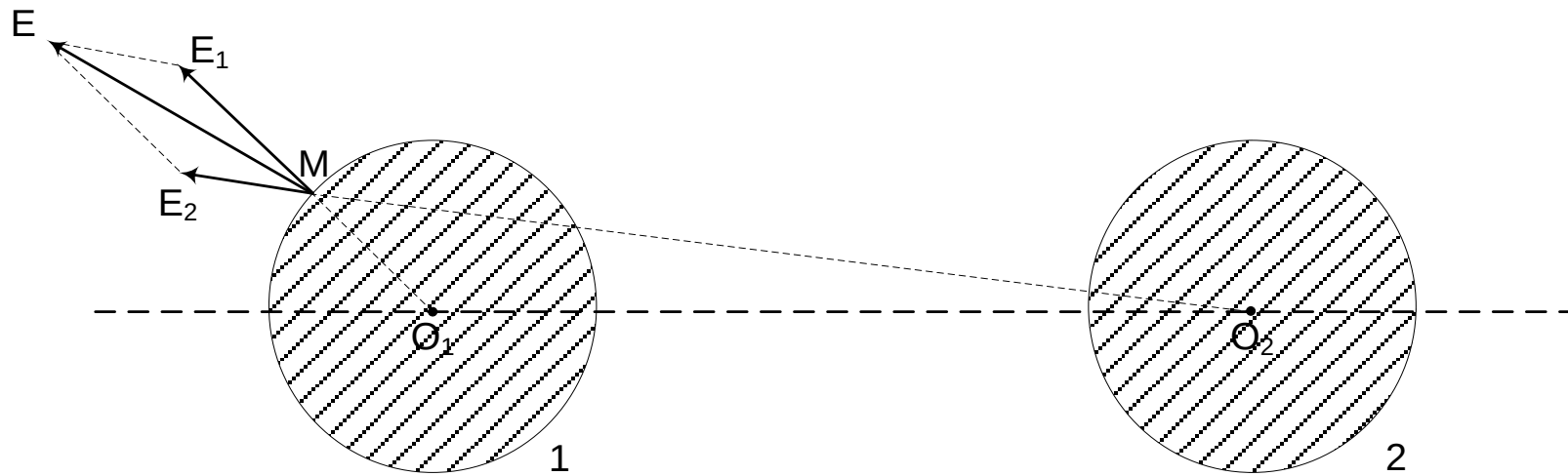
$$\delta = \frac{p}{1013} \cdot \frac{293}{273 + \theta}$$

(p και θ είναι οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας εκφρασμένες σε mbars και βαθμούς Κελσίου αντίστοιχα)



Εκκενώσεις Corona σε γραμμές υψηλής τάσης – Πολλαπλοί αγωγοί

Αποτελούνται από δύο ή περισσότερους απλούς αγωγούς ανά φάση, οι οποίοι είναι διατεταγμένοι στις κορυφές ενός αντίστοιχου κανονικού n -πλεύρου σε μικρές μεταξύ τους αποστάσεις. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση της επιφανειακής πεδιακής εντάσεως, χωρίς την ανάγκη αύξησης της διαμέτρου των αγωγών.



Εκκενώσεις Corona σε γραμμές υψηλής τάσης – Πολλαπλοί αγωγοί



Εκκενώσεις Corona σε γραμμές υψηλής τάσης – Πολλαπλοί αγωγοί

$$S = 3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{r}{\sqrt{3}} \right)^2 = \pi \cdot r^2$$

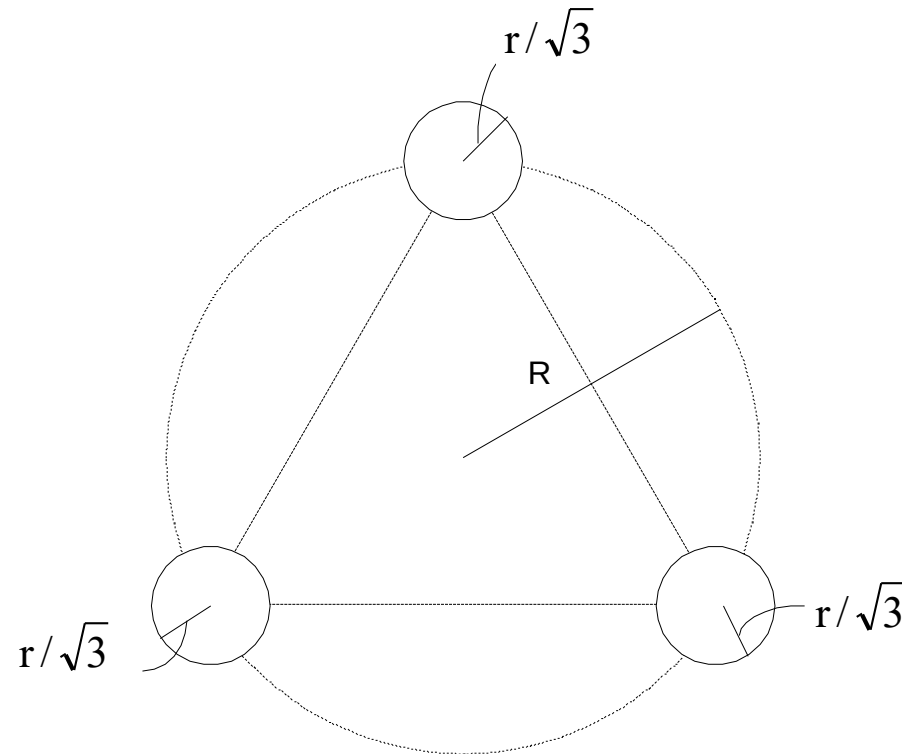
$$r_{\text{ισ}} = \left[r' N R^{(N-1)} \right]^{\frac{1}{N}}$$

N : το πλήθος των αγωγών

R : η ακτίνα του περιγεγραμμένου κύκλου στον οποίο είναι τοποθετημένοι οι αγωγοί

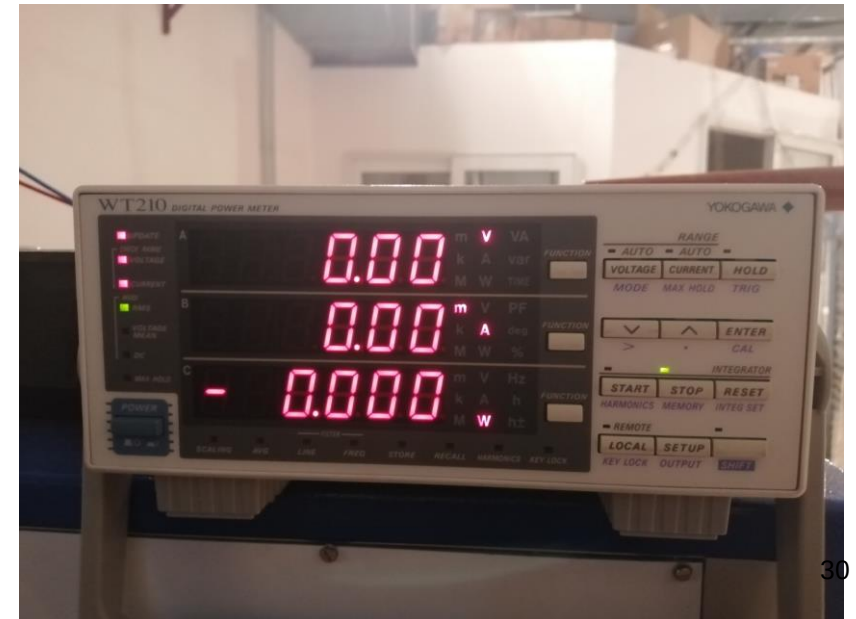
r' : η ακτίνα υποθετικού αγωγού

$$r' = \left(r / \sqrt{3} \right) \cdot e^{-\frac{1}{4}} = 0.7788 \cdot \left(r / \sqrt{3} \right)$$



Απώλειες CORONA σε γραμμές υψηλής τάσης

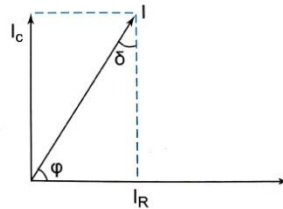
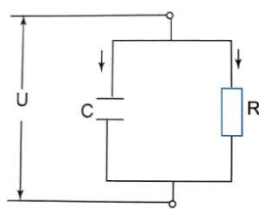
Πειραματική διάταξη



Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών λαδιών
&
Διάσπαση ατμοσφαιρικού αέρα σε ανομοιογενές
πεδίο με εναλλασσόμενη τάση

Κριτήρια αξιολόγησης μονωτικών υλικών

- Διηλεκτρική αντοχή
- Ειδική αντίσταση
- Αντίσταση μόνωσης
- Επιφανειακή αντίσταση
- Σχετική διηλεκτρική σταθερά
- Συντελεστής απωλειών

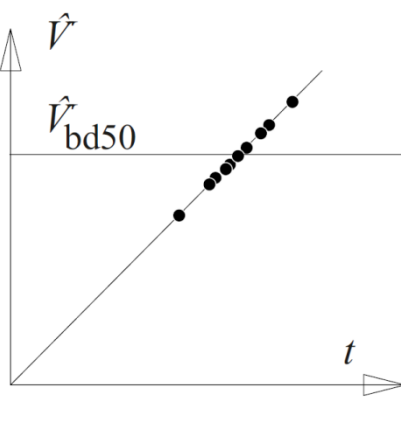
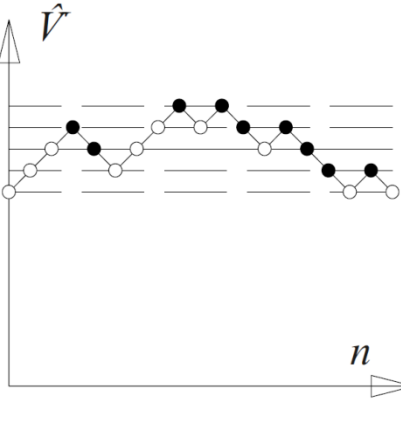
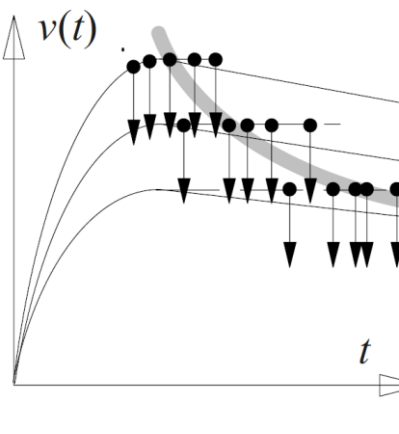
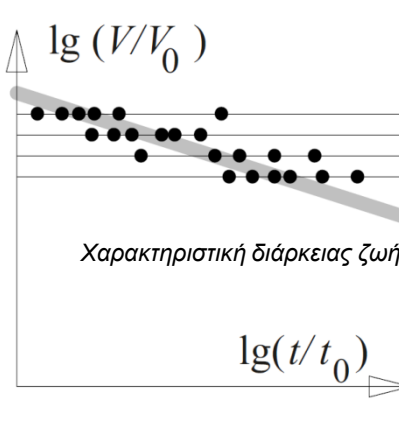


$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC}$$

- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Μηχανική αντοχή

Διηλεκτρική αντοχή

Η διηλεκτρική αντοχή είναι ένα μέγεθος με έντονο στοχαστικό χαρακτήρα.

			 Χαρακτηριστική διάρκεια ζωής
Δοκιμές με αυξανόμενη τάση	Μέθοδος up-and-down • διάσπαση ○ μη διάσπαση	Δοκιμή υπό κρουστική τάση, χρόνος διάσπασης (Διάκενα με αέρια μονωτικά)	Δοκιμή υπό σταθερή τάση, χρόνος μέχρι τη διάσπαση (Στερεά μονωτικά)

Διηλεκτρική σταθερά

Υλικό	Σχετική διηλεκτρική σταθερά	Υλικό	Σχετική διηλεκτρική σταθερά
Αέρας (υπό ΚΣ)	1,000594	Πυρόλιθος	4,3 – 4,7
Υγρός αέρας	1,5	Plexiglass	2,6 – 3,5
Βακελίτης	3,5 – 8,2	PVC	4 – 6
Γυαλί	2 – 16	Pertinax	4,8 – 5,4
Πορσελάνη	4,5 – 6	Teflon	2,1
Μονωτικό λάδι	2 – 2,5	Mikanit	4 – 6
Χαρτί	1,8 – 2,6	Σκληρό ελαστικό	3 – 5
Χαρτί-λάδι	3 – 4,5	Ρητίνη	2,2
Χαρτί-αέρας	1,6 – 2	Στεατίτης	6,4

Υψηλές Τάσεις, Λ. Οικονόμου, Γ. Φώτης, Χ. Χριστοδούλου

Διάσπαση μονωτικών

Διάσπαση

αέριων
μονωτικών

υγρών
μονωτικών

στερεών
μονωτικών

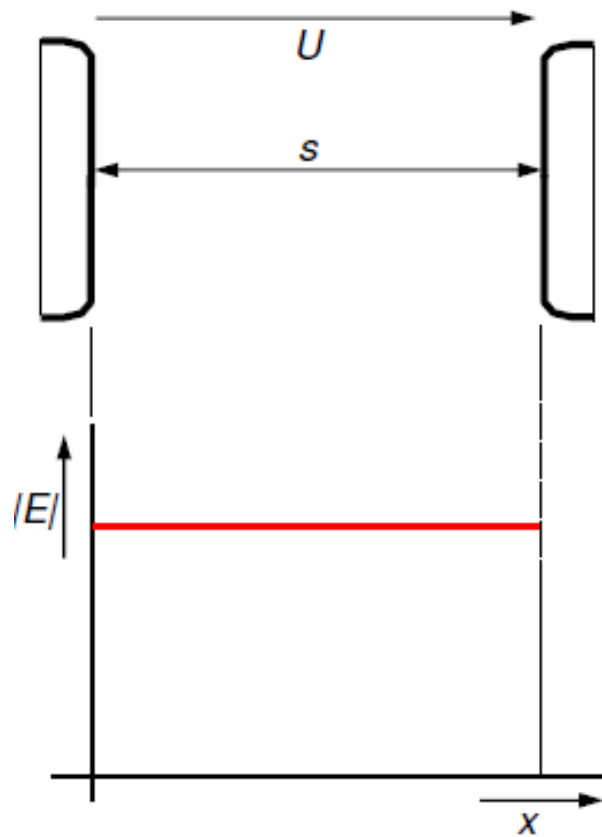
κενού

Η διάσπαση στα αέρια μονωτικά διαφέρει σημαντικά απ' ότι στα υπόλοιπα διηλεκτρικά.

Εκκενώσεις, οι οποίες δεν οδηγούν απ' ευθείας σε διάσπαση είναι γνωστές ως μερικές εκκενώσεις.

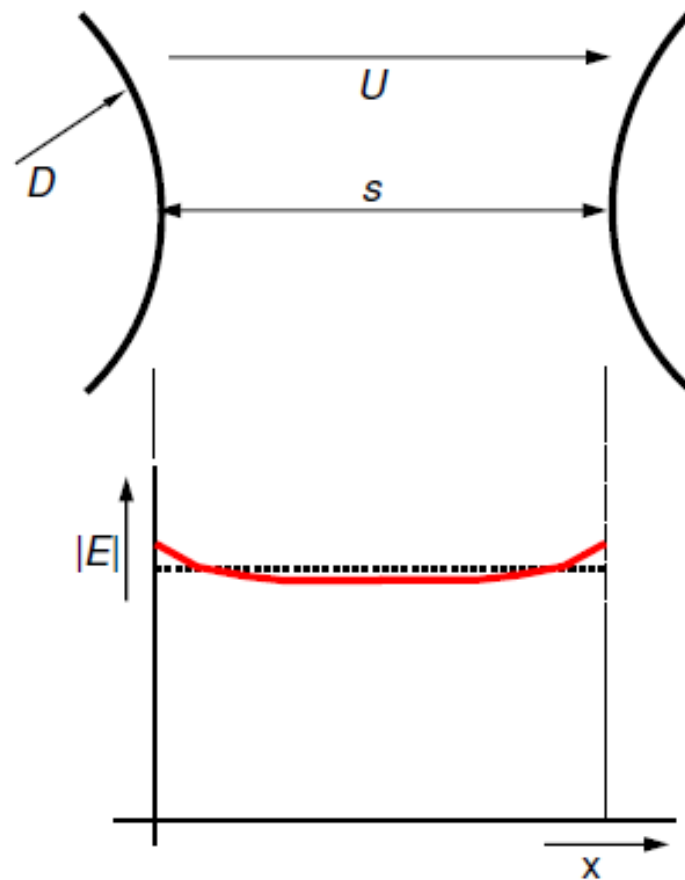
Διάσπαση αέριων μονωτικών

Πλάκα – πλάκα, 'Ομογενές πεδίο'



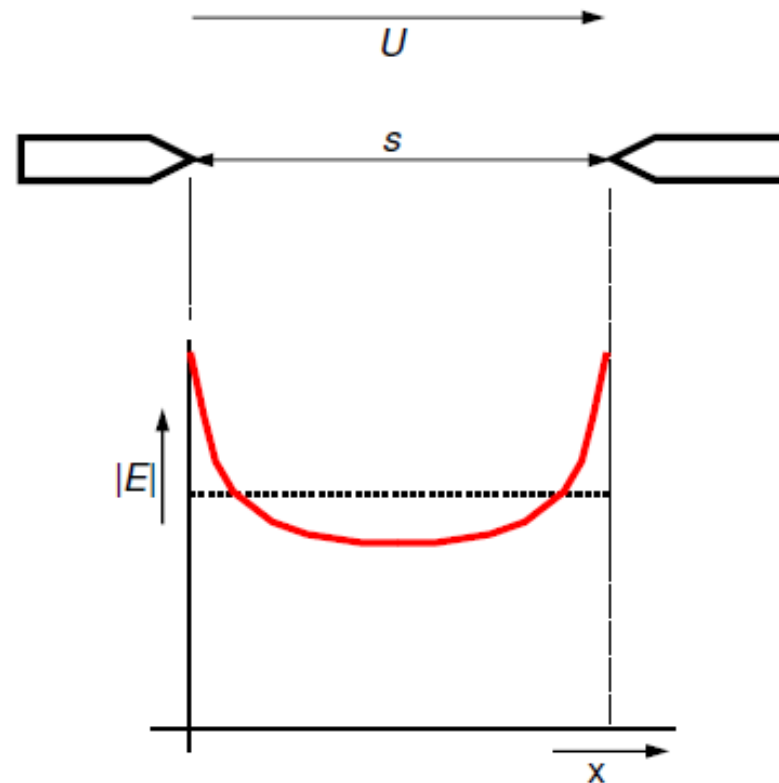
Διάσπαση αέριων μονωτικών

Σφαίρα – σφαίρα ($s \ll D$), 'Ελαφρώς ανομοιογενές πεδίο', 'Συμμετρικό'



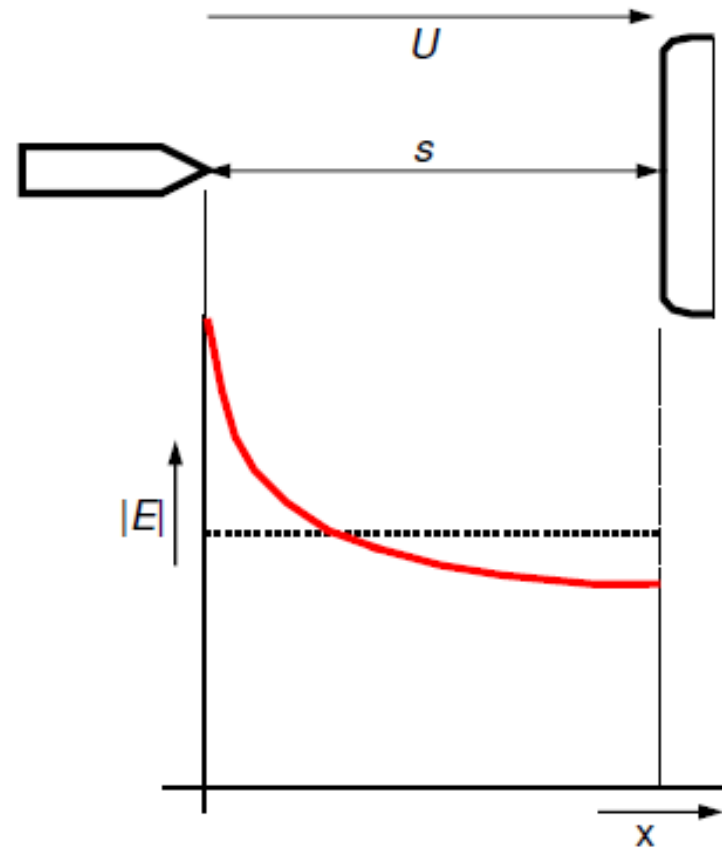
Διάσπαση αέριων μονωτικών

Ακίδα – ακίδα, 'Ισχυρά ανομοιογενές πεδίο', 'Συμμετρικό'



Διάσπαση αέριων μονωτικών

Ακίδα – πλάκα, 'Ισχυρά ανομοιογενές πεδίο', 'Μη συμμετρικό'



Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

(Σχεδόν) ομογενές πεδίο.
Η επίδραση των χωρικών φορτίων αγνοείται.

Δημιουργία χιονοστιβάδων, Μηχανισμός Townsend

Νόμος Paschen

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

Ελεύθερα φορτισμένα σωματίδια υπάρχουν πάντα

Η δύναμη που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Η ενέργεια μετά από απόσταση s είναι:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \int_0^s F ds = q \cdot \int_0^s E ds = q \cdot U$$

Η ταχύτητα είναι:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{m} \cdot U}$$



Ιονισμός

Μηχανισμός
χιονοστιβάδας

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

Διαδικασίες ιονισμού:

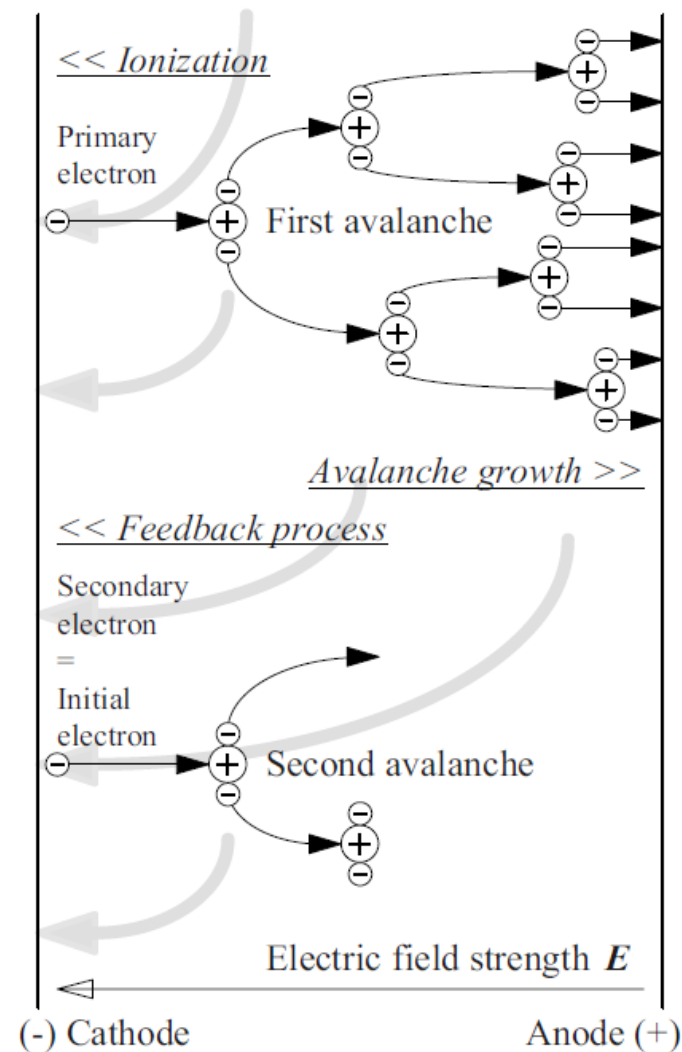
Στον όγκο του αερίου:

- Σύγκρουση ηλεκτρονίων (α -διαδικασία)
- Σύγκρουση ιόντων (β -διαδικασία)
- Φωτο-ιονισμός
- Θερμικός ιονισμός

Στην επιφάνεια των ηλεκτρονίων (κάθοδος):
Σύγκρουση θετικών ιόντων (γ -
διαδικασία)

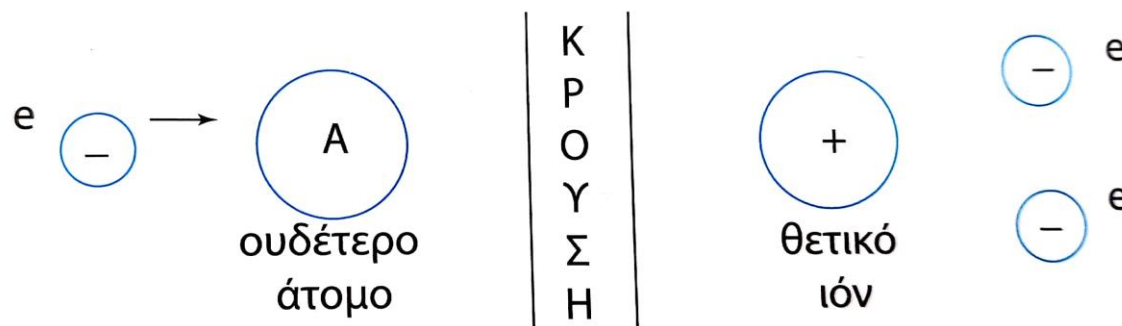
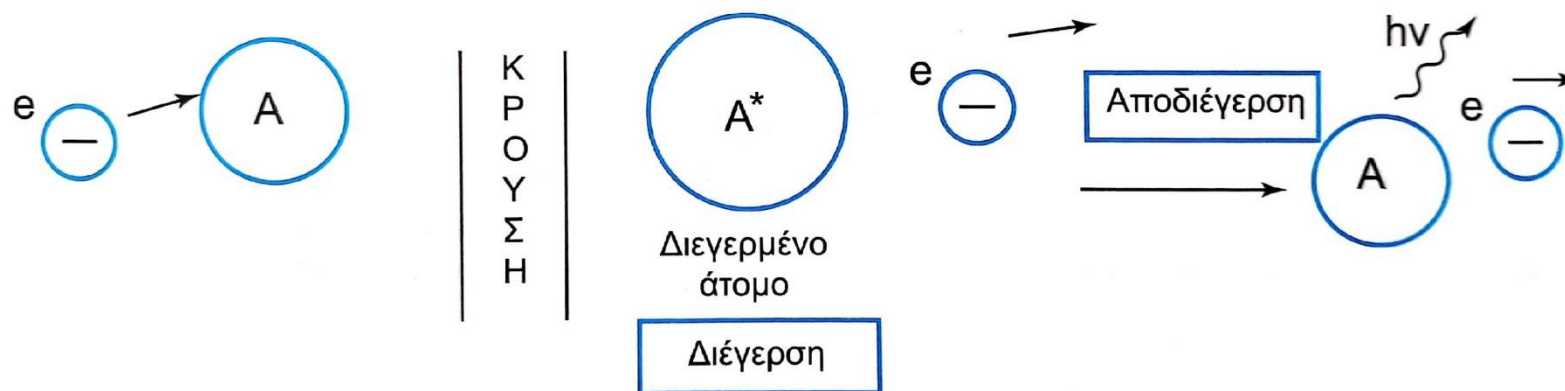
Φωτοηλεκτρική εκπομπή

Ανάπτυξη χιονοστιβάδας



Μηχανισμός
χιονοστιβάδας

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο



Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

- Συντελεστής ιονισμού α (πρώτος συντελεστής ιονισμού Townsend)
Περιγράφει τον αριθμό των ηλεκτρονίων, ο οποίος δημιουργείται ανά μονάδα μήκους από ένα ηλεκτρόνιο (σύγκρουση ηλεκτρονίων)
- Συντελεστής ιονισμού β
Περιγράφει τον αριθμό των ηλεκτρονίων ανά μονάδα μήκους, ο οποίος δημιουργείται από ένα θετικό ιόν. Ισχύει $\beta \ll \alpha$, γι' αυτό μπορεί και να αγνοηθεί.
- Συντελεστής ιονισμού επιφανείας γ (συντελεστής ανάδρασης ή δεύτερος συντελεστής ιονισμού Townsend)
Περιγράφει την ανάδραση των ιόντων στην κάθοδο (δευτερογενή ιονισμό).

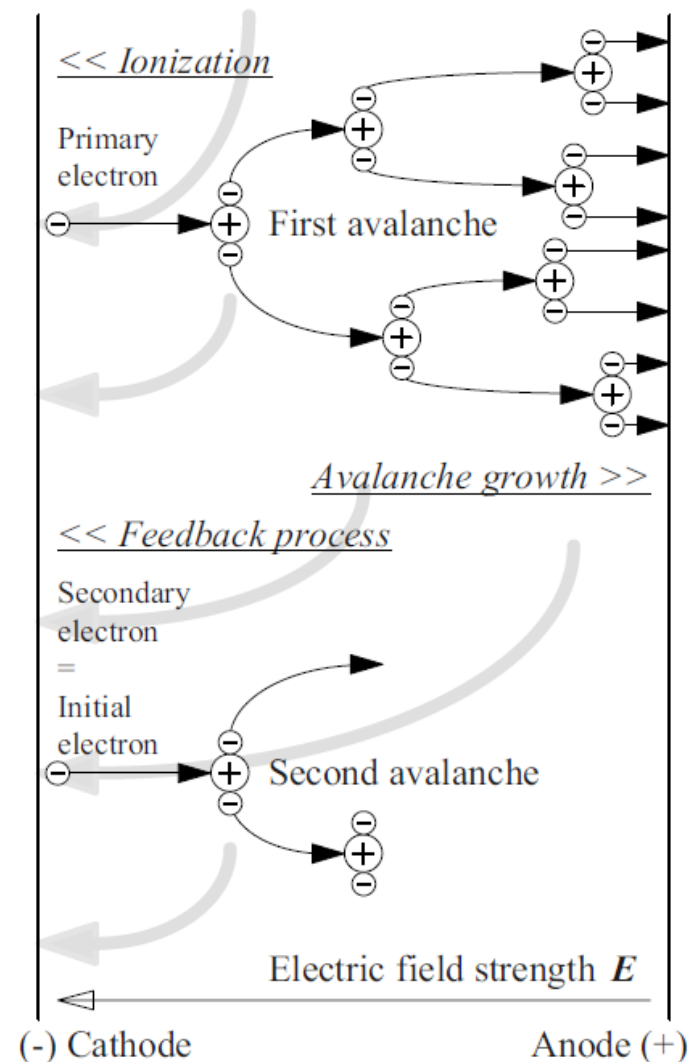
Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

Συνθήκες διάσπασης:

Υπερβαίνοντας την κρίσιμη ενίσχυση, π.χ. κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο δημιουργεί περισσότερα από ένα νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Ο χρόνος διάσπασης είναι της τάξεως των μς για διάκενα μερικών εκατοστών.

Σε μεγαλύτερα διάκενα και με υψηλότερες τιμές της έντασης ηλεκτρικού πεδίου:
Μηχανισμός 'streamer'



Μηχανισμός
χινοστιβάδας

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

$$V_{bd} = B \frac{p \cdot d}{\ln \left[\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} = f(p \cdot d)$$

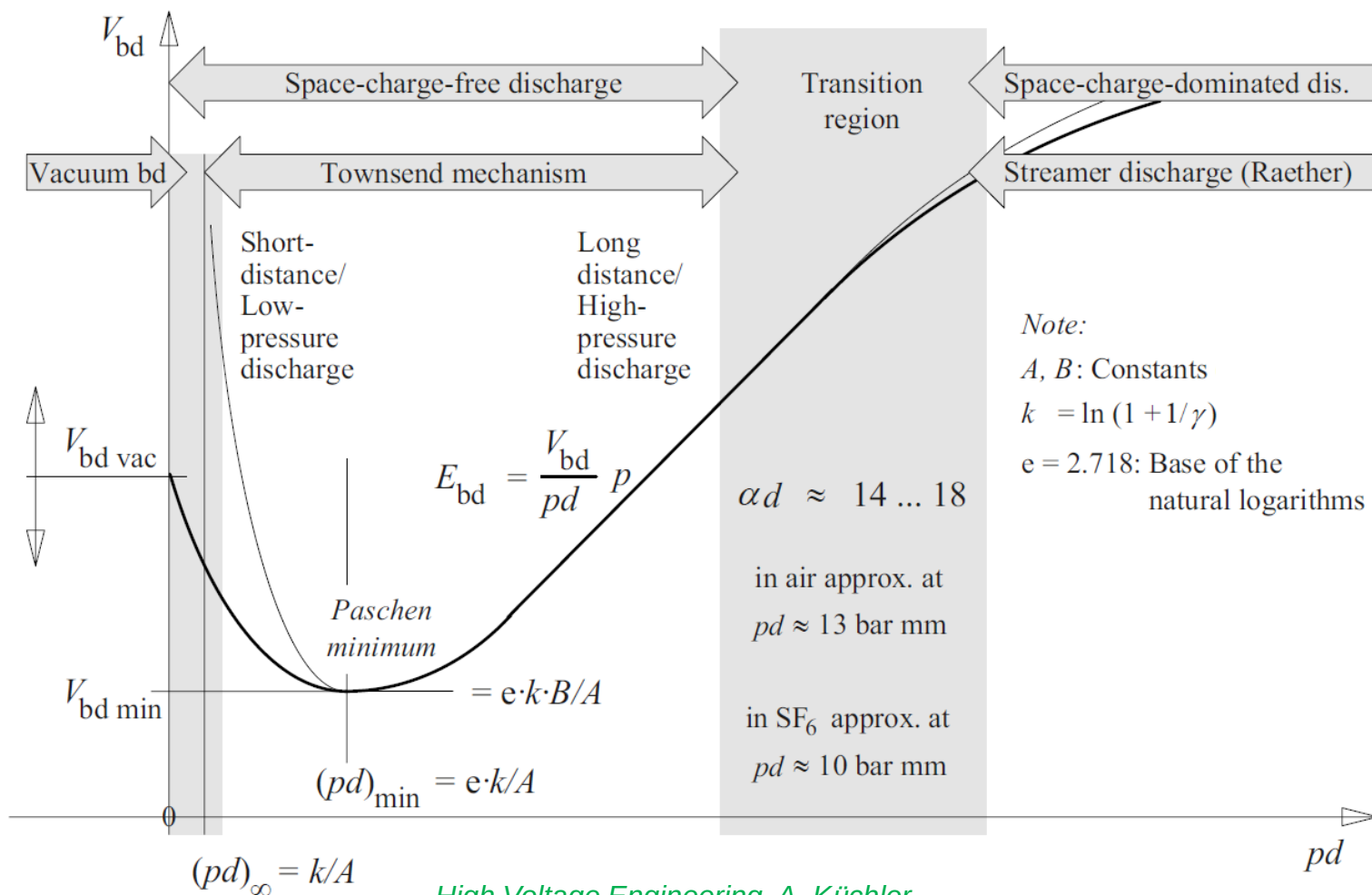
Οι συντελεστές A, B και γ είναι σταθεροί και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το είδος του αερίου και του υλικού των ηλεκτροδίων.

Η τάση διάσπασης ενός διακένου ομοιογενούς πεδίου είναι μία μοναδική συνάρτηση του γινομένου πίεσης και απόστασης διαχωρισμού των ηλεκτροδίων, για ένα συγκεκριμένο αέριο και υλικό ηλεκτροδίου.

Η παραπάνω εξίσωση δεν υποδηλώνει ότι η τάση διάσπασης αυξάνει γραμμικά με το γινόμενο pd , αν και διαπιστώνεται στην πράξη ότι είναι σχεδόν γραμμική κατά μήκος ορισμένων περιοχών.

Νόμος
Paschen

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο



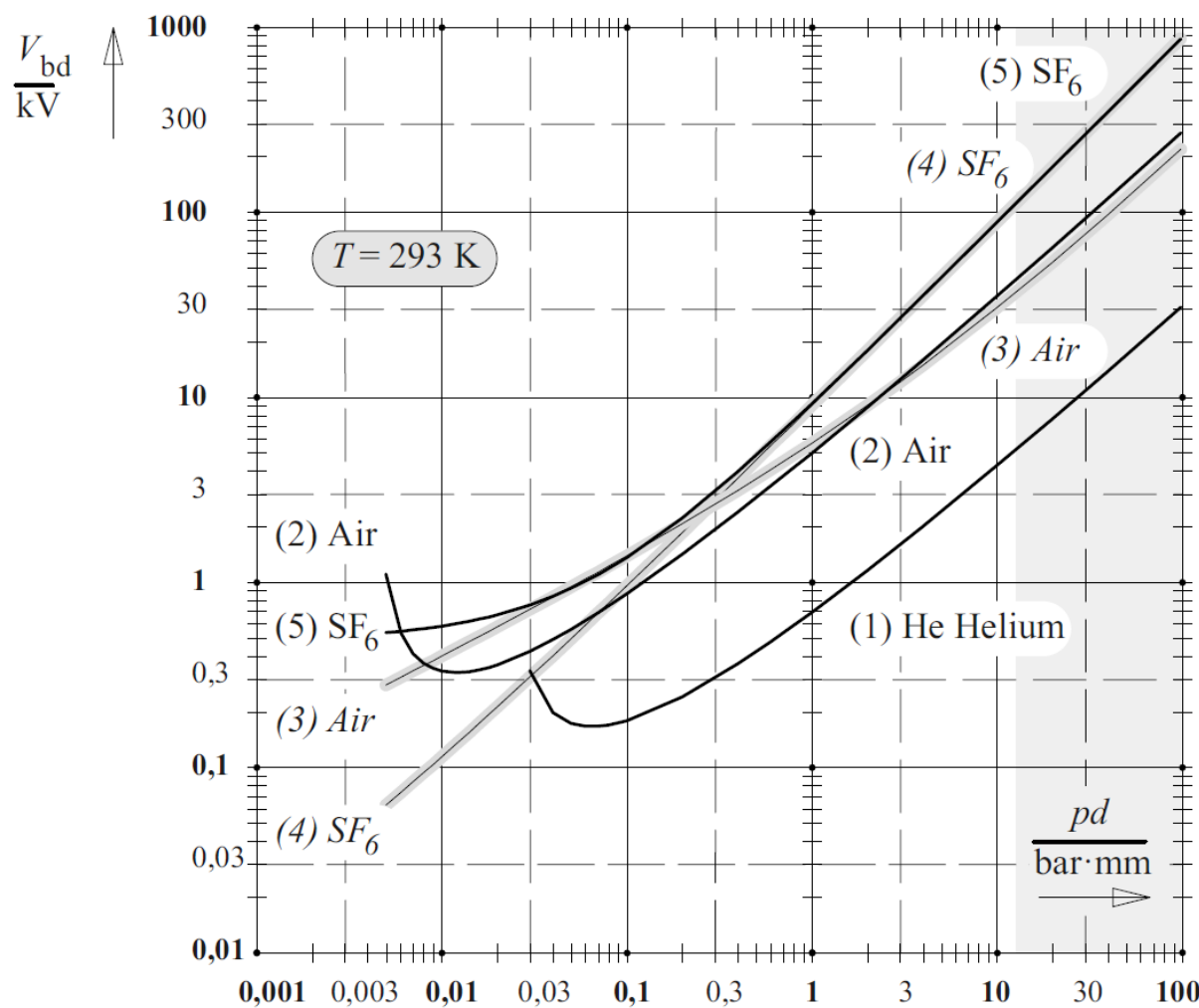
Καμπύλη
Paschen

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

Gas	$V_{bd \text{ min}} / \text{V}$	$(pd)_{\text{min}} / \text{bar} \cdot \mu\text{m}$
SF_6	507	3.5
O_2	450	9.3
CO_2	420	6.8
<i>Air</i>	330 350	7.3
N_2	240 250	8.6
H_2	230 270	14
<i>Ne</i>	129 245	53.2
<i>Ar</i>	94 265	-
<i>He</i>	155	53.2

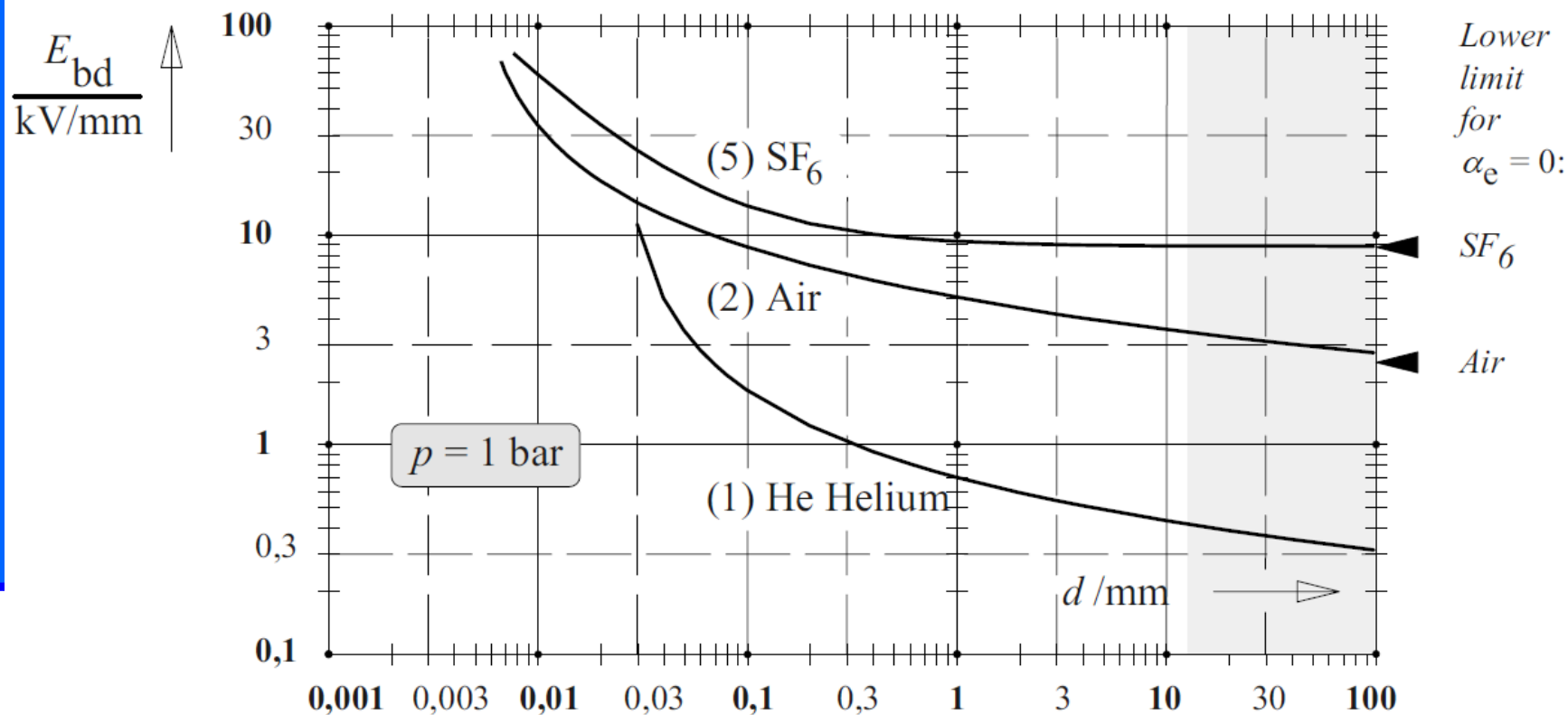
Ελάχιστες τάσεις
διάσπασης για
διάφορα αέρια

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο



Τάσεις διάσπασης
συναρτήσει pd για
διάφορα αέρια

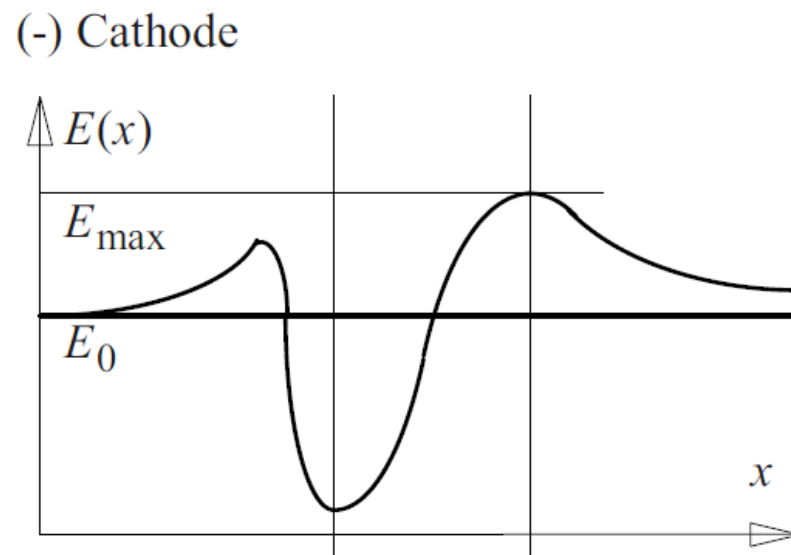
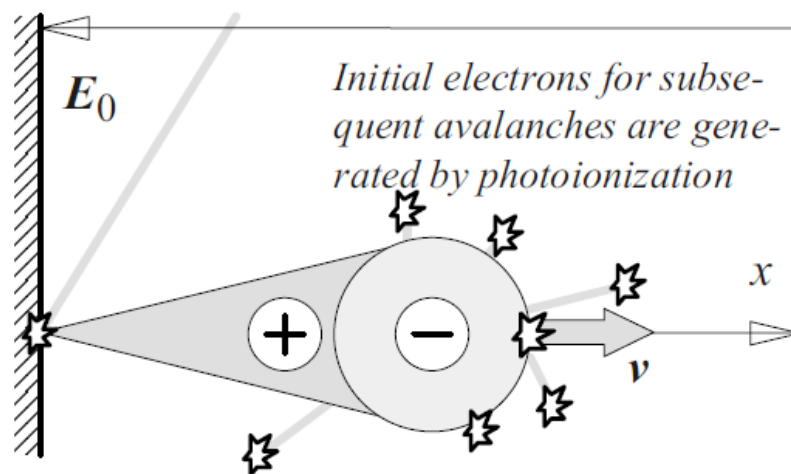
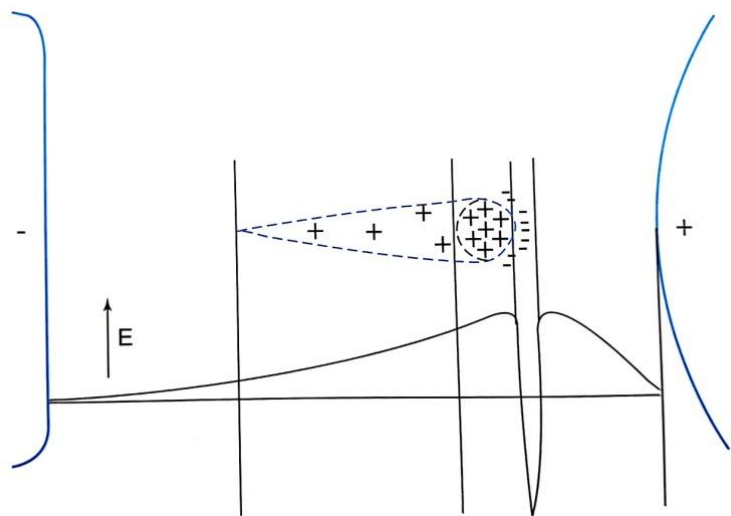
Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο



Διηλεκτρική αντοχή ως
συνάρτηση της απόστασης
των ηλεκτροδίων για
διάφορα αέρια σε πίεση
1bar και θερμοκρασία 293K.

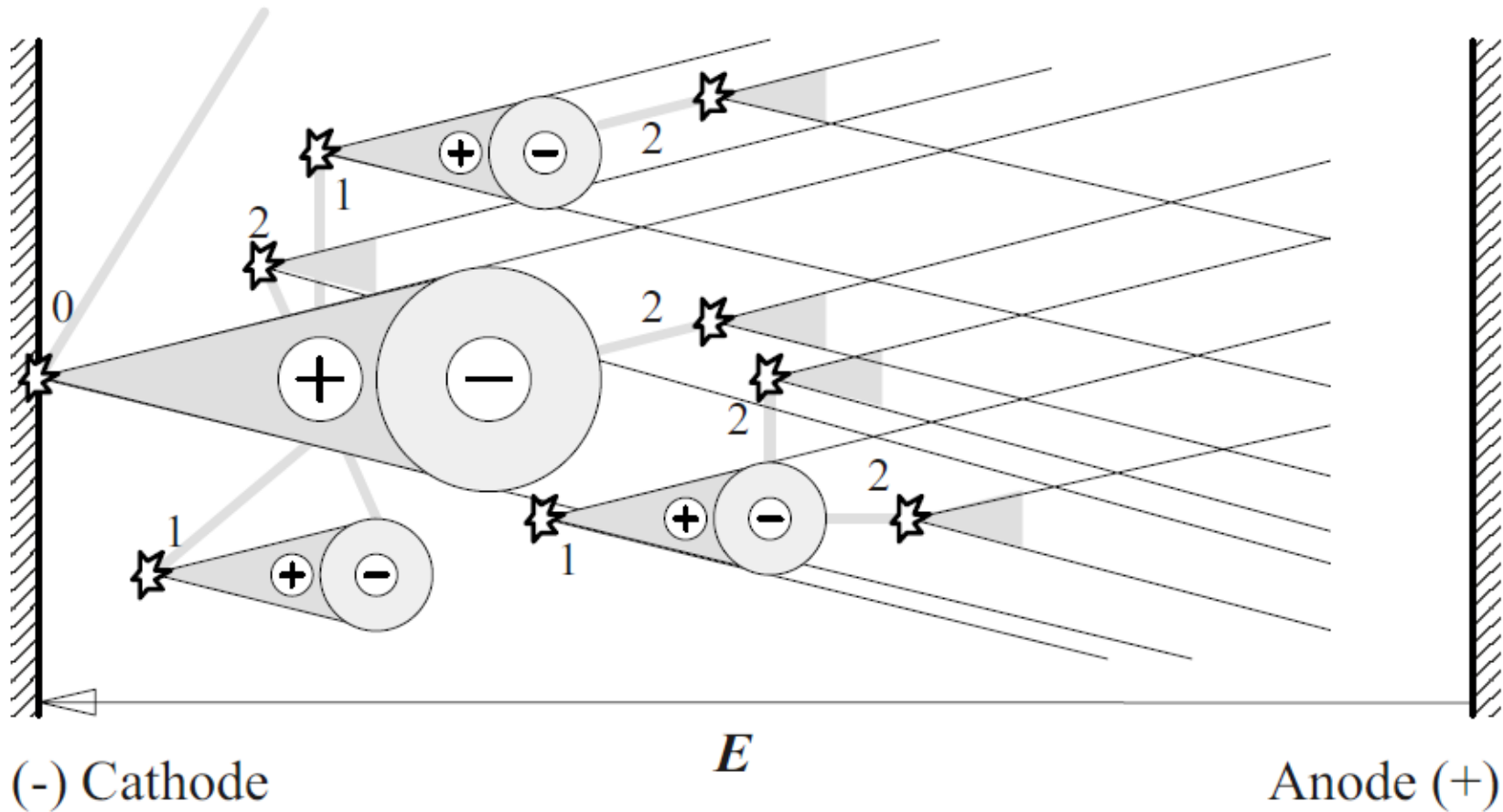
Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

Εάν η χιονοστιβάδα, η οποία δημιουργείται από ένα αρχικό ηλεκτρόνιο, μεγαλώσει μέχρι 10^6 έως 10^8 ηλεκτρόνια, το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται σημαντικά από τα χωρικά φορτία.



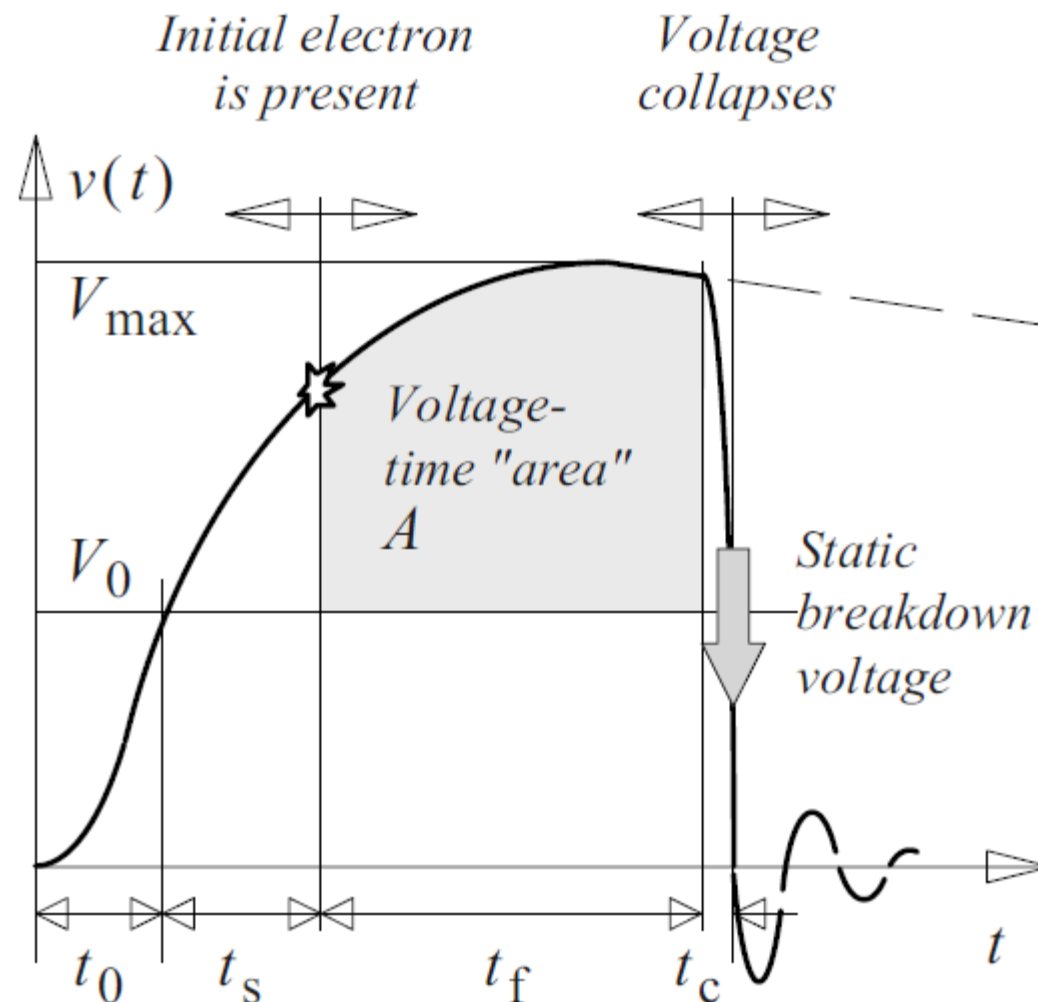
Εκκένωση 'streamer'

Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο



Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

Η διάσπαση δεν μπορεί να συμβεί απευθείας για $t=t_0$ όταν η τάση ξεπερνά τη στατική τάση διάσπασης V_0 . Η διάσπαση δεν αναπτύσσεται πριν υπάρξει ένα αρχικό ηλεκτρόνιο μετά τη στατιστική χρονική καθυστέρηση t_s και πριν αναπτυχθεί ένας αγωγίμος 'streamer' κατά τη διάρκεια της χρονικής καθυστέρησης t_f .

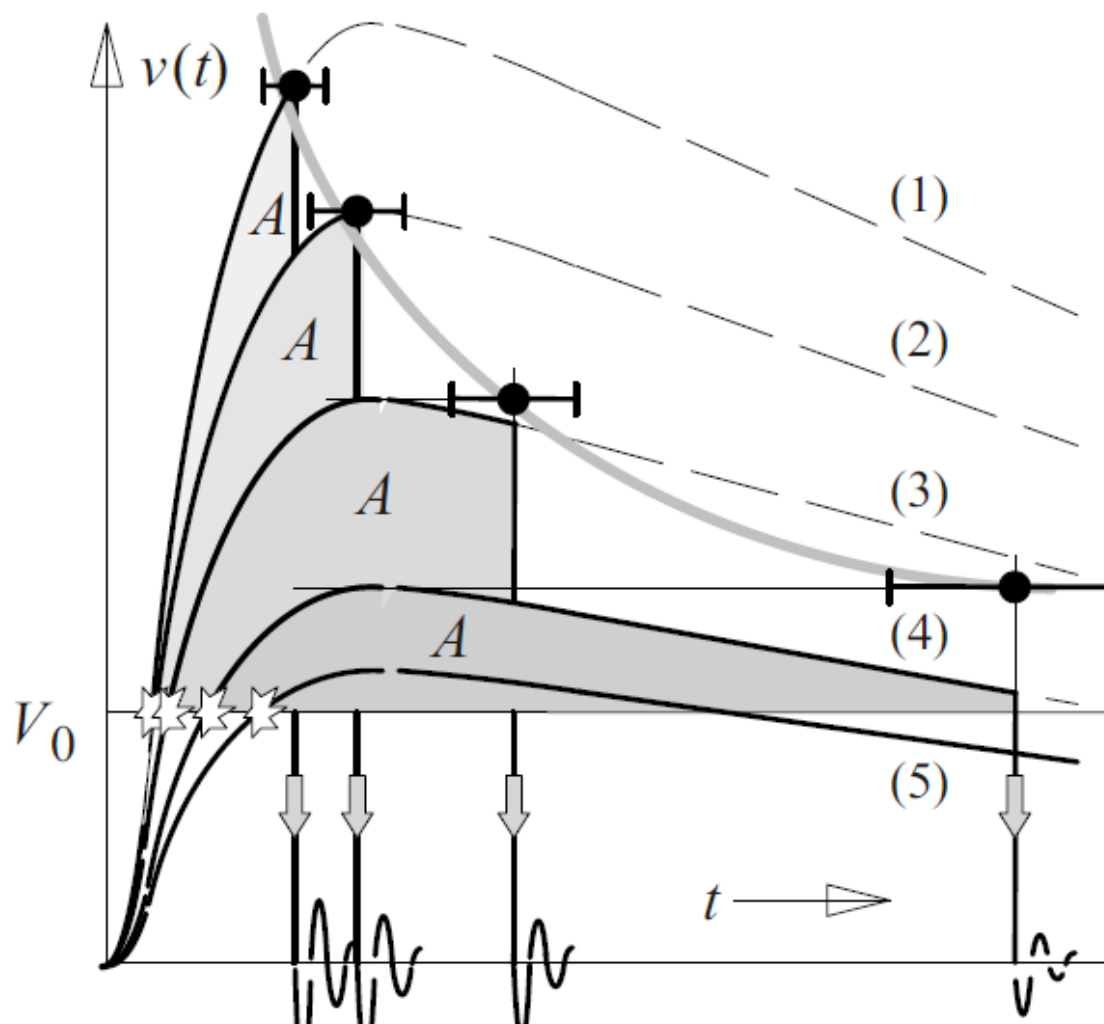


Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ομογενές πεδίο

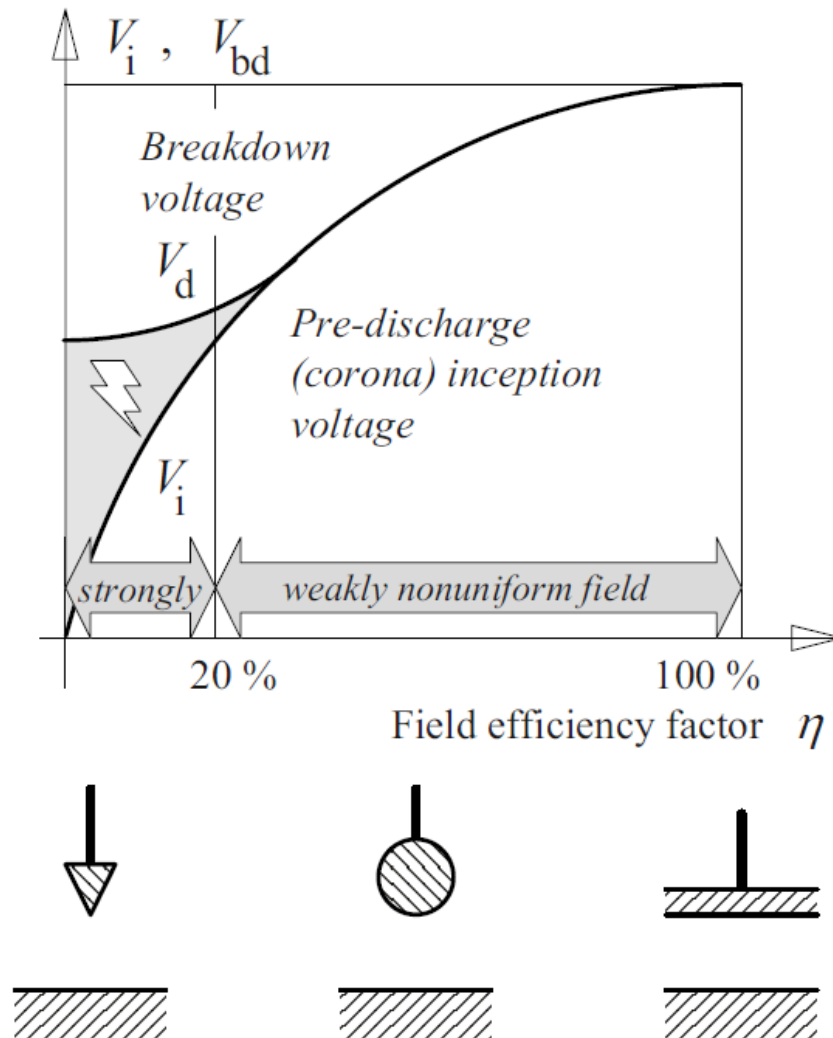
Χαρακτηριστικές τάσης – χρόνου

Κριτήριο ίσων περιοχών

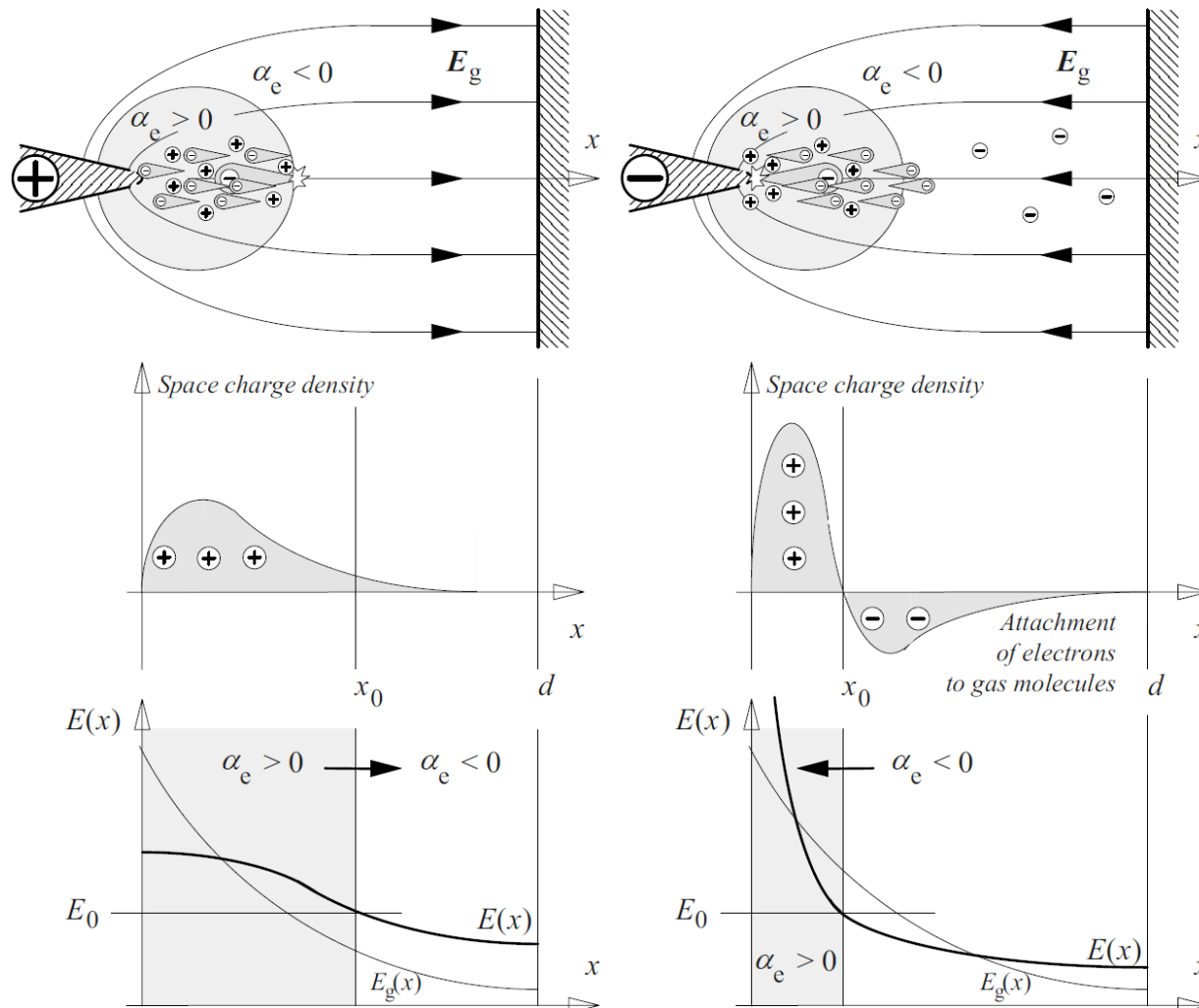
Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου
αυξάνεται, εάν η διάρκεια της
διαταραχής μειώνεται.



Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ανομοιογενές πεδίο

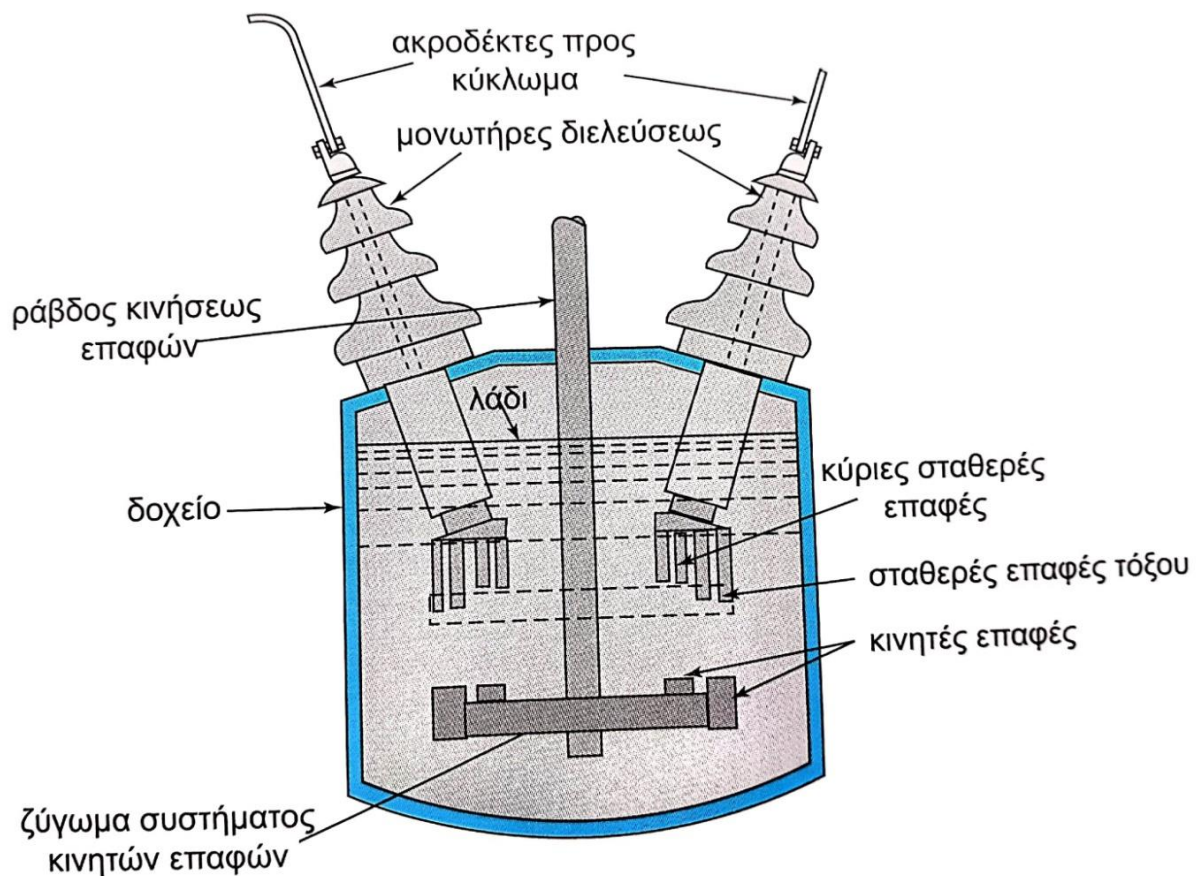


Διάσπαση αέριων μονωτικών – Ανομοιογενές πεδίο



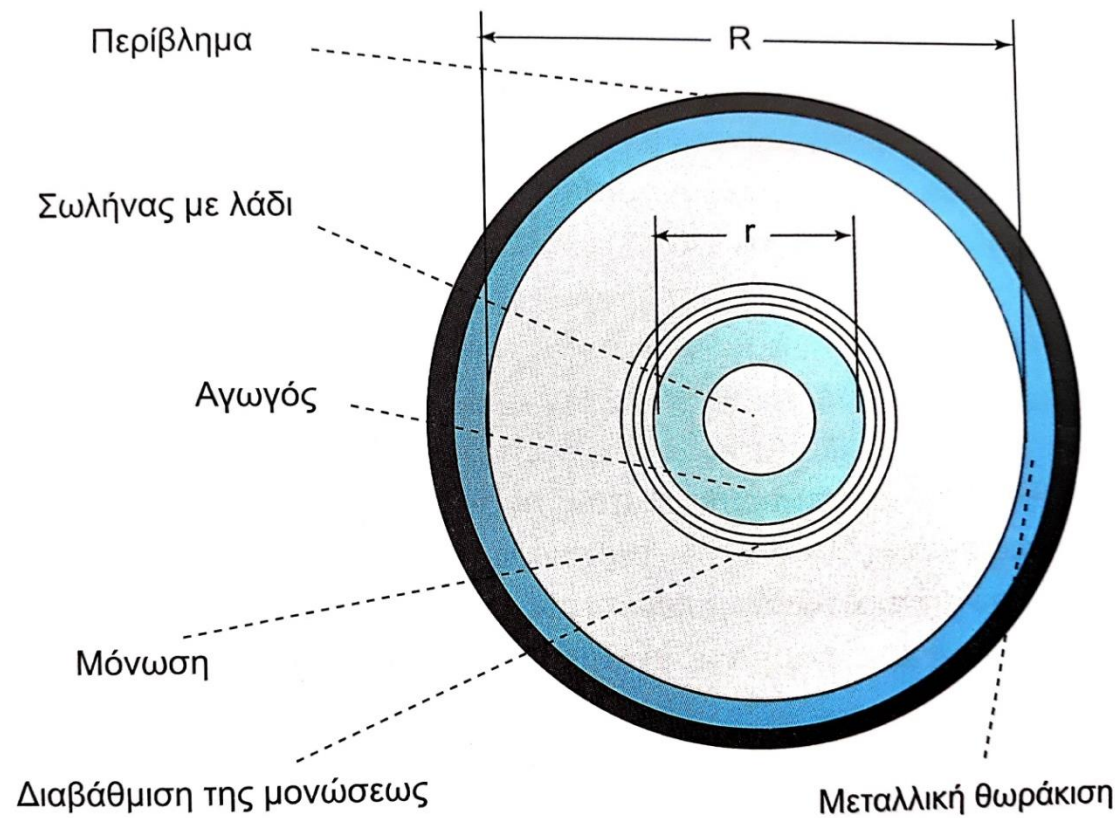
Επίδραση της
πολικότητας

Υγρά μονωτικά – Μονωτικά λάδια



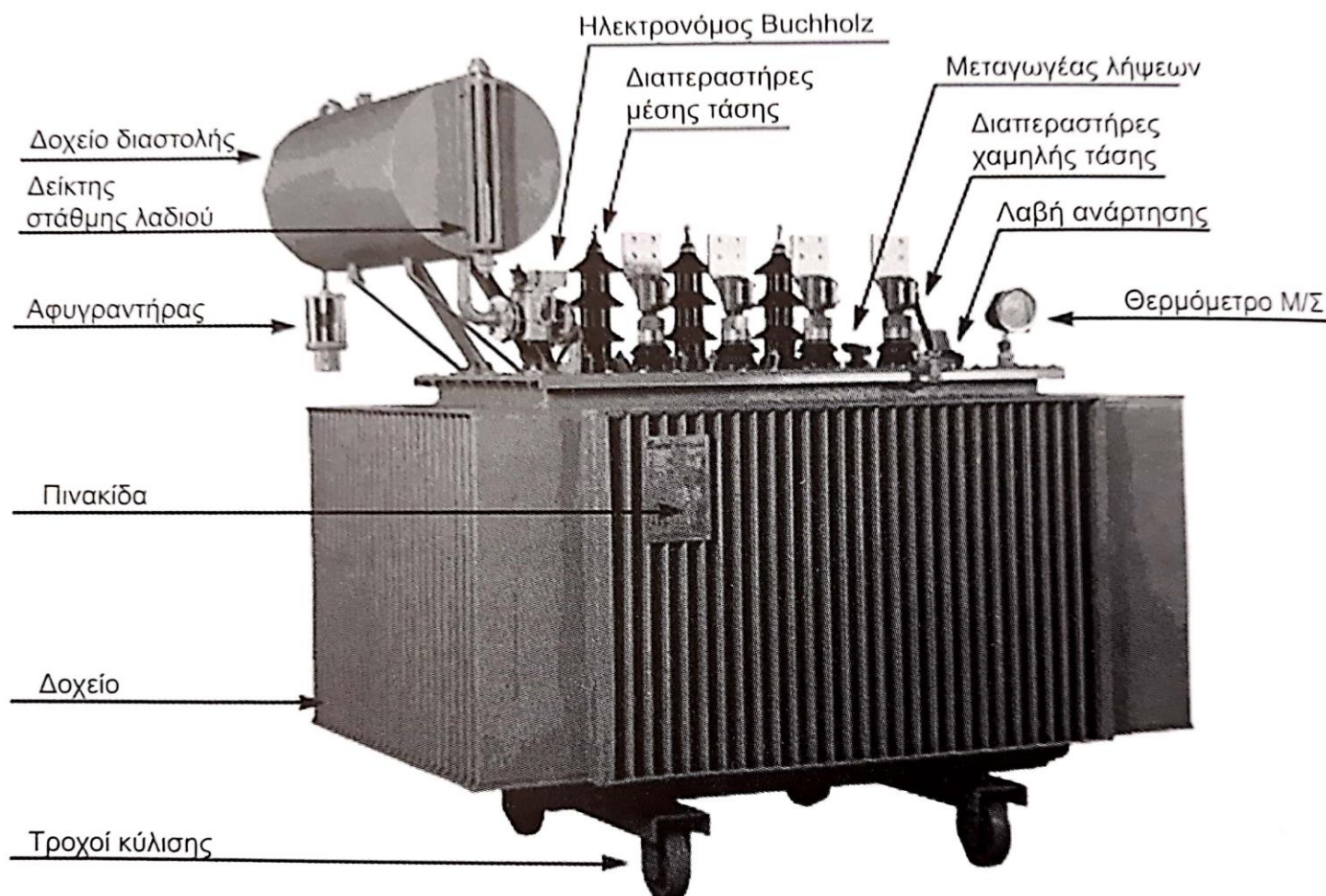
Διακόπτης λαδιού

Υγρά μονωτικά – Μονωτικά λάδια



Διακόπτης λαδιού

Υγρά μονωτικά – Μονωτικά λάδια



Μ/Σ διανομής

Διάσπαση υγρών μονωτικών – Μονωτικά λάδια

Παράγοντες που επηρεάζουν τη διηλεκτρική αντοχή των υγρών μονωτικών:

- Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων
- Το εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίων
- Το υλικό των ηλεκτροδίων
- Η γεωμετρία των ηλεκτροδίων
- Το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης
- Η θερμοκρασία
- Η πίεση (εξωτερική ή υδροστατική)
- Η παρουσία υγρασίας, ξένων σωματιδίων και φυσαλίδων αέρα

Διάσπαση υγρών μονωτικών – Μονωτικά λάδια

Μηχανισμοί διάσπασης:

■ Ηλεκτρονική (ή ενδογενής) διάσπαση

Η ηλεκτρονική διάσπαση βρίσκει εφαρμογή σε υγρά διηλεκτρικά, τα οποία είναι καθαρά, δηλαδή δεν είναι μίξεις, είναι διηθημένα και απιονισμένα, ενώ έχουν απομακρυνθεί φυσαλίδες αέρα ή άλλα ξένα σωματίδια.

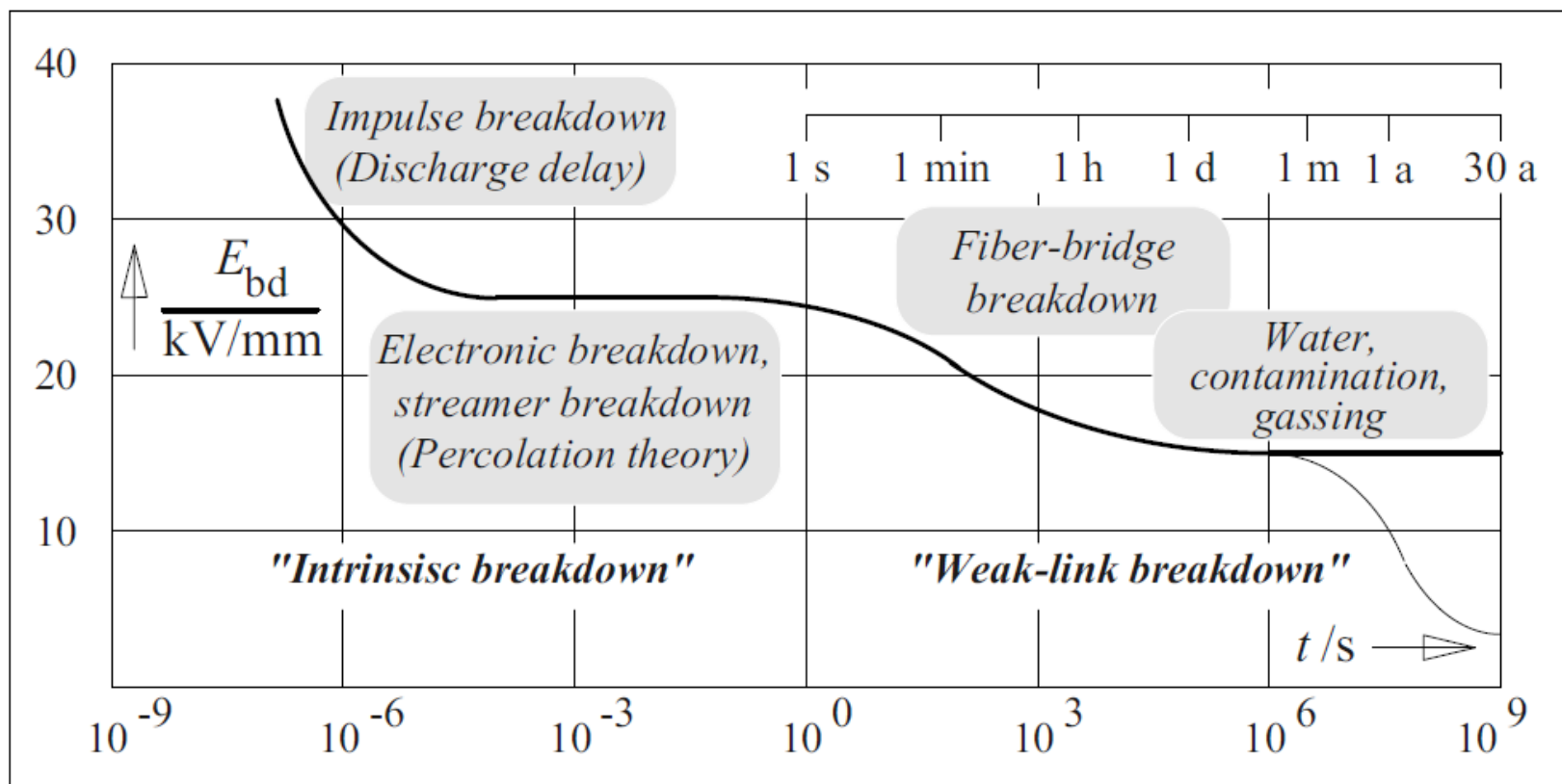
■ Διάσπαση μέσω αιωρούμενων σωματιδίων

Σε ένα υγρό διηλεκτρικό υπάρχουν συνήθως σωματίδια σκόνης, ίνες, μεταλλικά σωματίδια, σωματίδια από στερεά μονωτικά κ.α. Υπό την επίδραση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου και επειδή η διηλεκτρική σταθερά των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική σταθερά του υγρού τα σωματίδια πολώνονται και οδηγούνται προς την περιοχή της υψηλότερης πεδιακής έντασης.

■ Διάσπαση διά φυσαλίδων

Η παρουσία φυσαλίδων αερίου μέσα σε ένα υγρό διηλεκτρικό μειώνει τη διηλεκτρική αντοχή του και οδηγεί στη διάσπασή του.

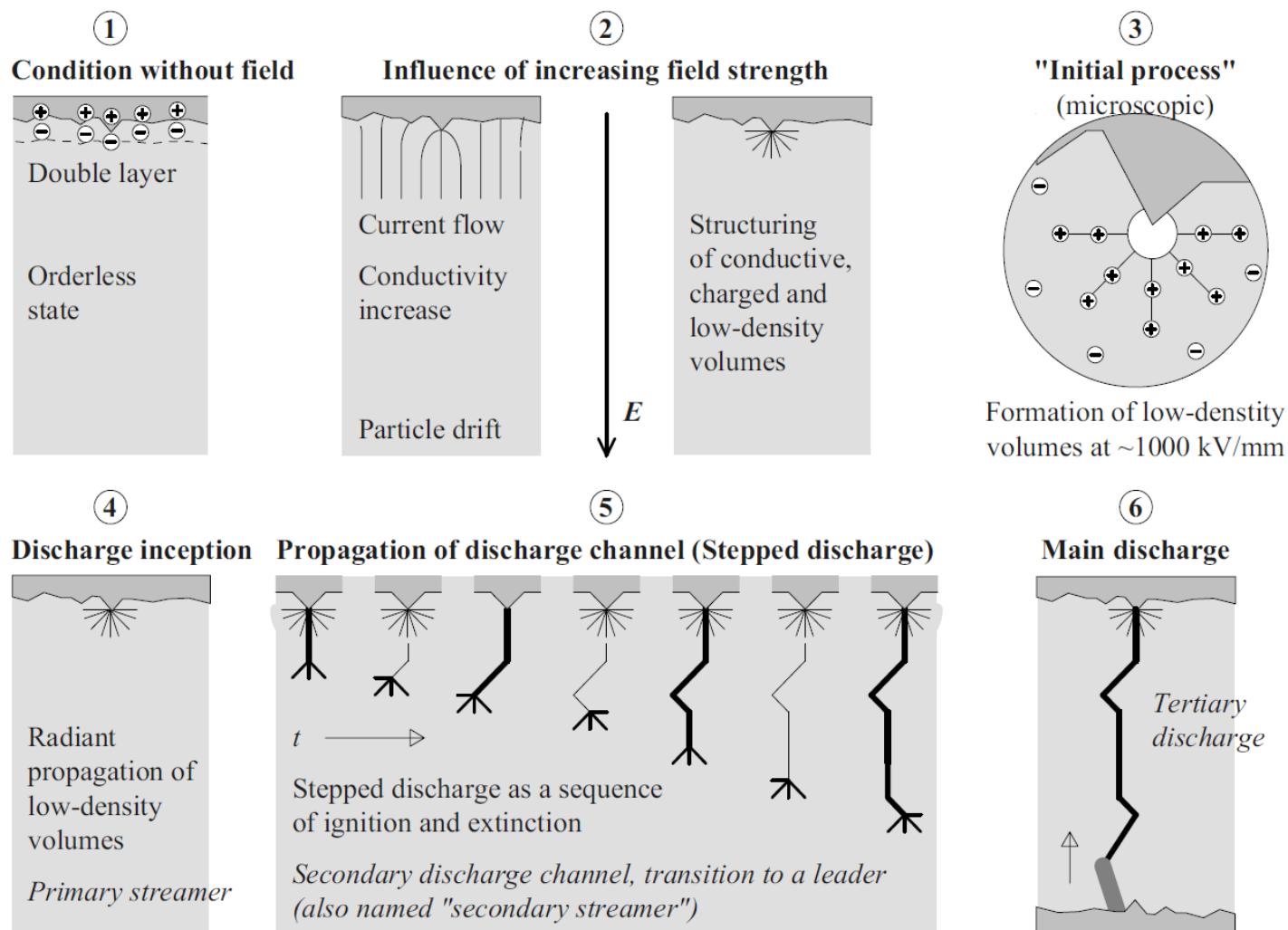
Διάσπαση υγρών μονωτικών – Μονωτικά λάδια



Λάδι M/Σ ($d=2,5\text{mm}$, $V=200\text{mm}^3$)

Διηλεκτρική αντοχή
ενός υγρού μονωτικού

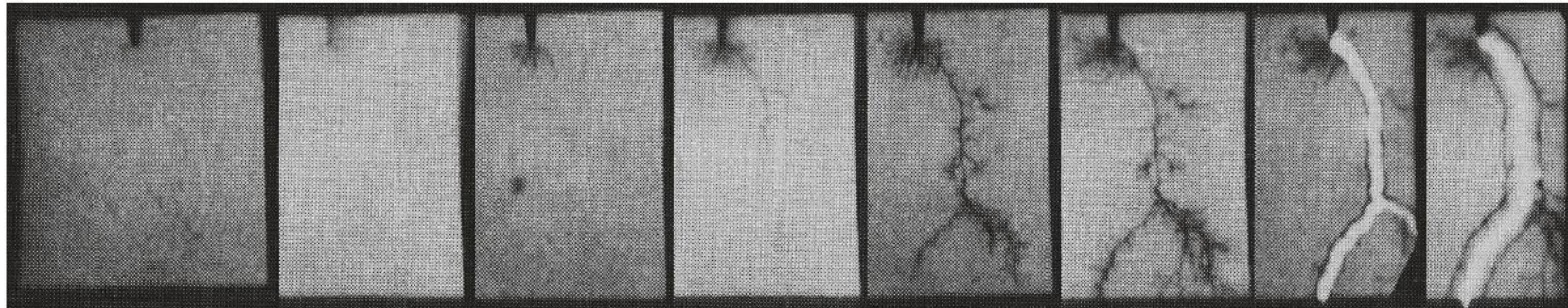
Διάσπαση υγρών μονωτικών – Μονωτικά λάδια



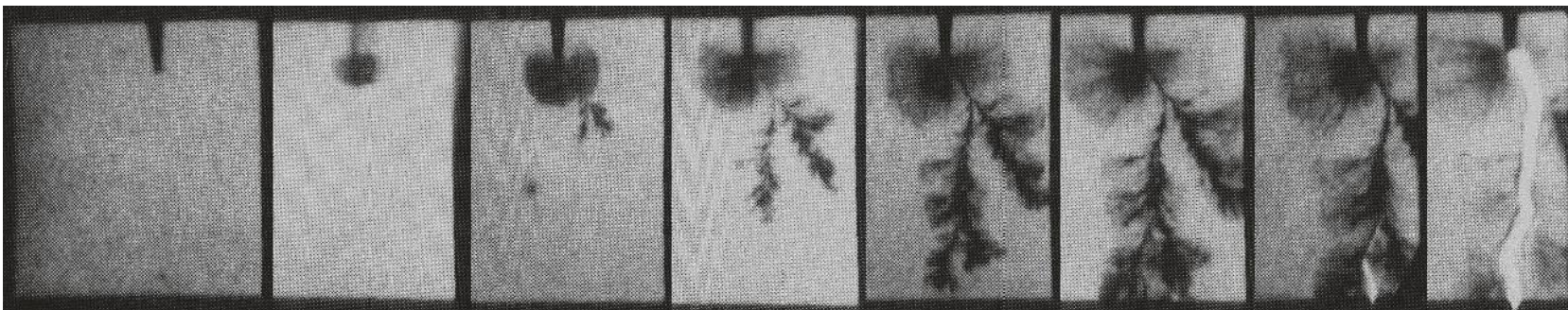
Τα στάδια της
διάσπασης στο
μονωτικό λάδι

Διάσπαση υγρών μονωτικών – Μονωτικά λάδια

Ακίδα – πλάκα σε μονωτικό λάδι.

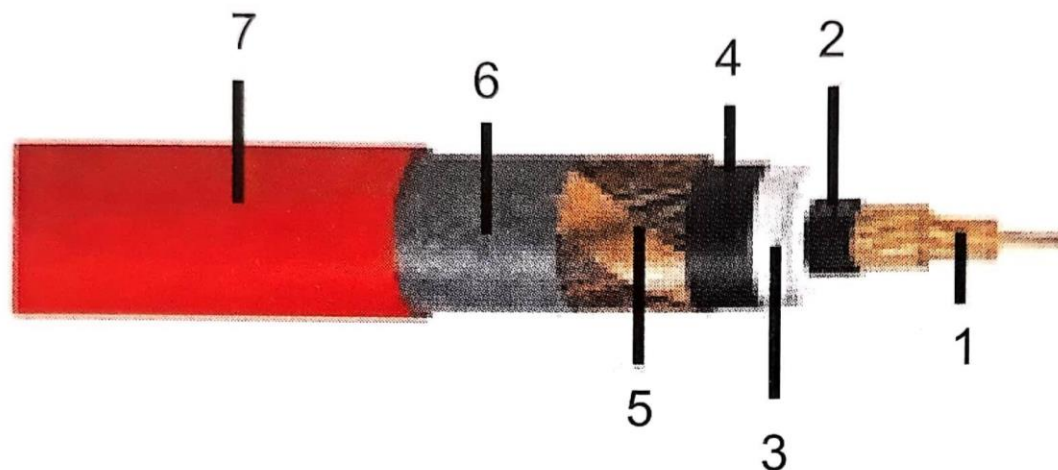


Διάδοση αρνητικής εκκένωσης



Διάδοση θετικής εκκένωσης

Στερεά μονωτικά

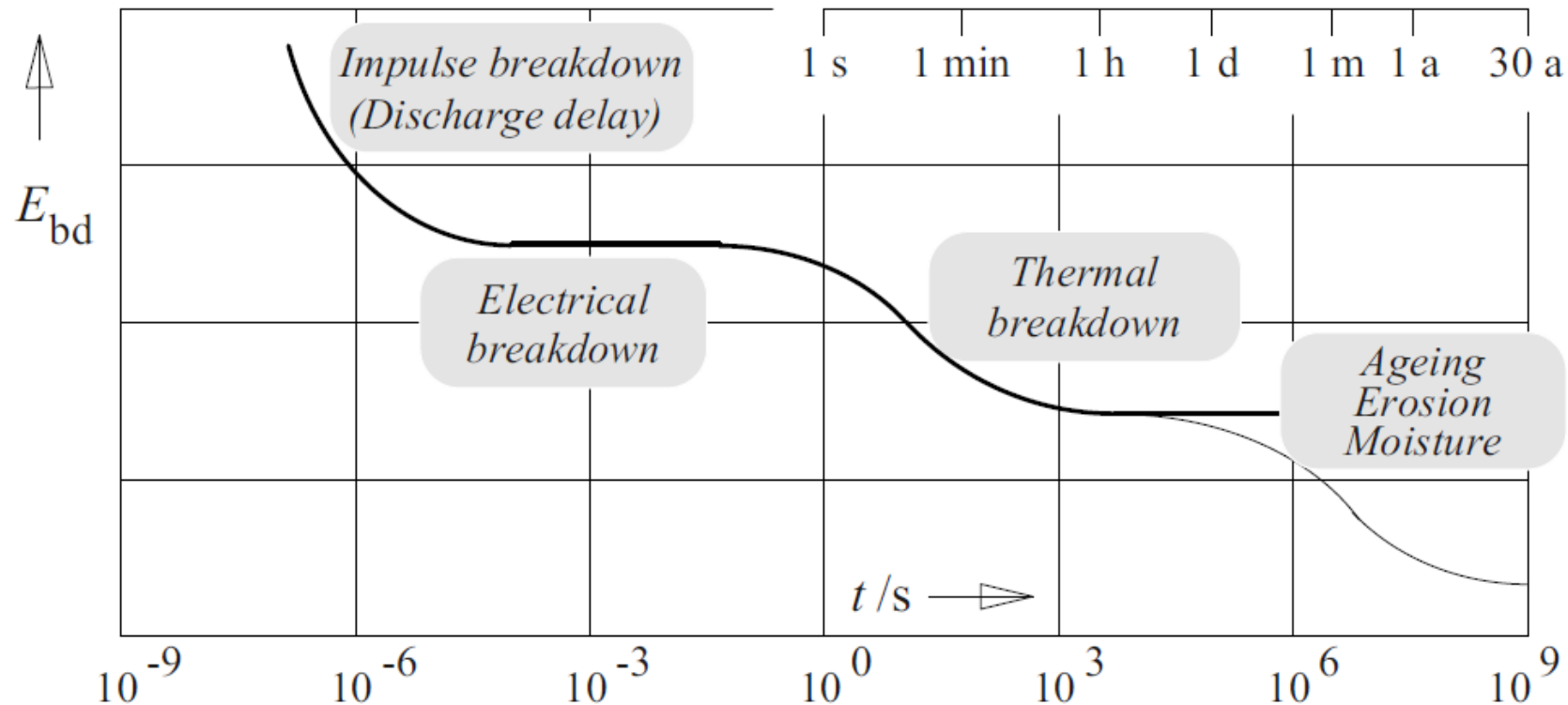


Τομή καλωδίου μέσης τάσης με πλαστική μόνωση: 1) πολύκλωνος στρογγυλός αγωγός χαλκού (ή αλουμινίου), 2) εσωτερικό ημιαγώγιμο στρώμα XLPE, 3) μόνωση XLPE, 4) εξωτερικό ημιαγώγιμο στρώμα XLPE, 5) ηλεκτρική θωράκιση αποτελούμενη από σύρματα χαλκού τυλιγμένα ελικοειδώς (χάλκινη ταινία προαιρετική κατόπιν παραγγελίας), 6) πλαστική ταινία (προαιρετική), 7) εξωτερικός μανδύας PVC.

Στερεά μονωτικά



Διάσπαση στερεών μονωτικών



Διηλεκτρική αντοχή ενός
στερεού μονωτικού

Διάσπαση στερεών μονωτικών

Μικρής διάρκειας καταπονήσεις – Σύγκρουση
ηλεκτρονίων – Διαδικασίες ιονισμού

Ηλεκτρική διάσπαση

Στην περίπτωση μεγαλύτερης διάρκειας καταπόνησης, η
παραγωγή θερμότητας στο διηλεκτρικό μπορεί να οδηγήσει σε
θερμική καταστροφή του μονωτικού υλικού

Θερμική διάσπαση

Μετά από μακρά περίοδο χρήσης του μονωτικού

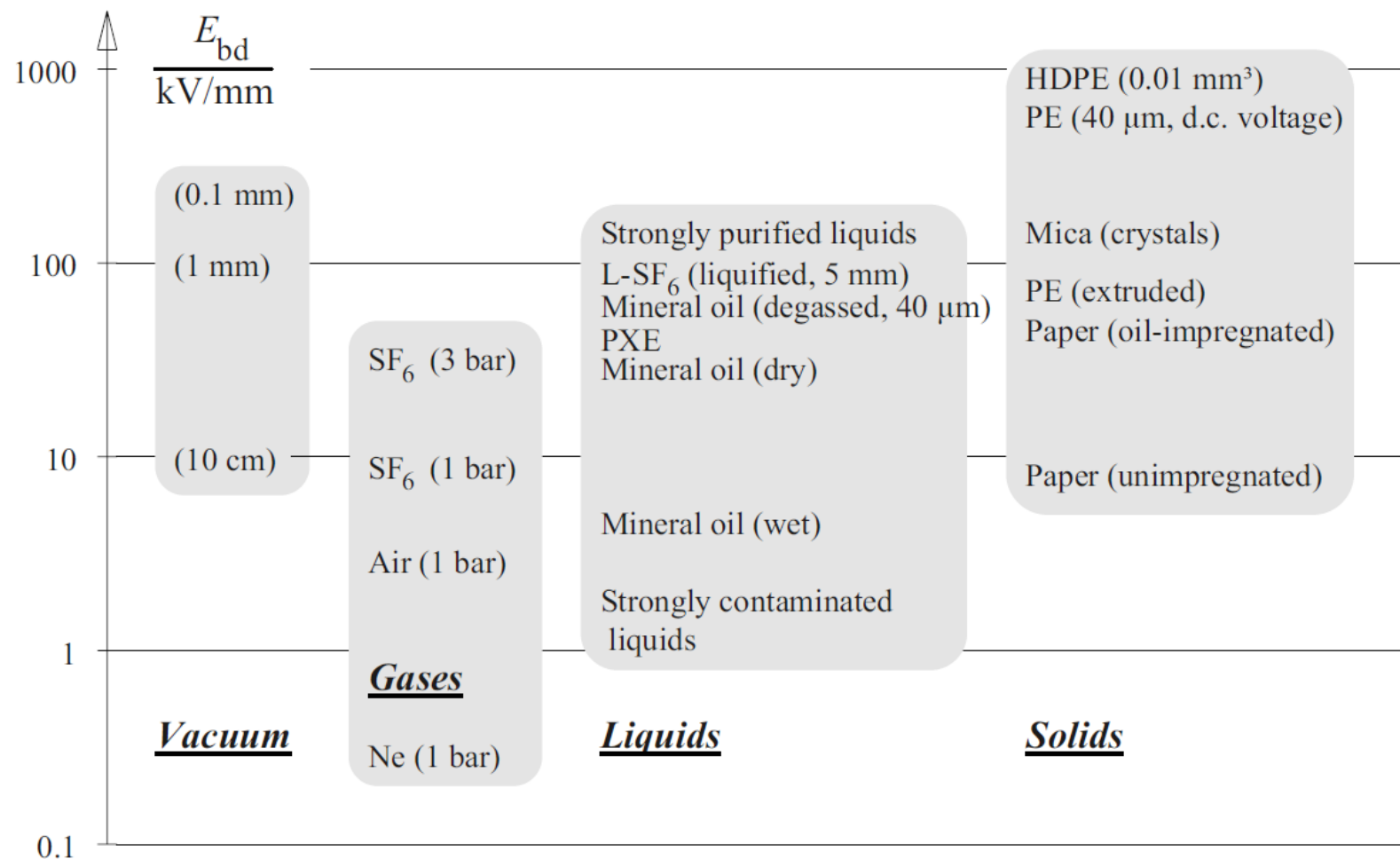
Γήρανση - Διάβρωση

Διάσπαση στερεών μονωτικών

Μηχανισμοί διάσπασης στερεών μονωτικών:

- Ηλεκτρονική διάσπαση
- Θερμική διάσπαση
- Δενδροειδής διάσπαση
- Ηλεκτρομηχανική διάσπαση
- Επιφανειακή διάσπαση και υπερπήδηση
- Μερικές εκκενώσεις

Διάσπαση διηλεκτρικών



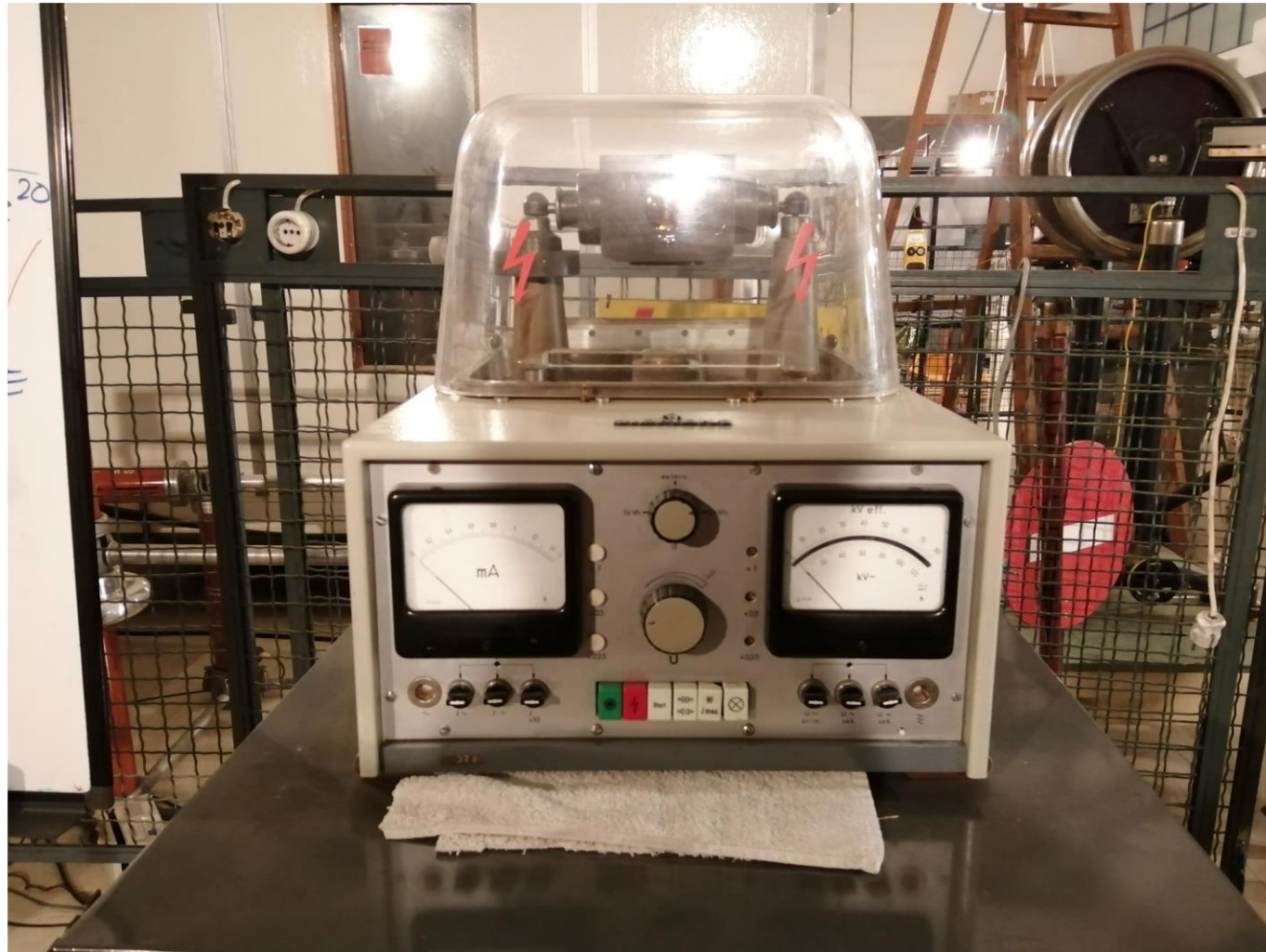
Διηλεκτρική αντοχή
(AC, 50Hz, πάχος
μόνωσης της τάξης
των cm)

Μερικές εκκενώσεις

- Επηρεάζουν μόνο ένα τμήμα της απόστασης μόνωσης και, συνεπώς, δεν οδηγούν άμεσα σε διάσπαση.
- Λαμβάνουν χώρα σε όλους τους τύπους μόνωσης.
- Αιτία: Η τοπική αύξηση ή η τοπική μείωση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.
- Συχνά, δεν επηρεάζουν βραχυπρόθεσμα τη διηλεκτρική αντοχή.
- Στην περίπτωση οργανικών μονωτικών υλικών, οι μερικές εκκενώσεις προκαλούν διάβρωση, η οποία οδηγεί συνήθως στη δραστική μείωση της διάρκειας ζωής του μονωτικού.
- Η ύπαρξη μερικών εκκενώσεων είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση της ποιότητας του μονωτικού.

Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών λαδιών

Πειραματική διάταξη



Διάσπαση ατμοσφαιρικού αέρα σε ανομοιογενές πεδίο με εναλλασσόμενη τάση - Πειραματική διάταξη

