



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών**  
**Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος**  
**Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων**

## **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ**

**Διάσπαση ατμοσφαιρικού αέρα σε ανομοιογενές πεδίο  
με εναλλασσόμενη τάση**

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

## **Εισαγωγή**

Η μελέτη της διάσπασης των αερίων είναι πολύ σημαντική και για την κατανόηση του μηχανισμού διάσπασης τόσο στα υγρά όσο και στα στερεά μονωτικά υλικά. Τα αέρια μονωτικά έχουν ευρεία χρήση ως μονωτικά μέσα, ειδικά μάλιστα ο ατμοσφαιρικός αέρας. Τα κύρια σημεία τα οποία πραγματεύεται αυτή η εργαστηριακή άσκηση είναι συνοπτικά:

- ο μηχανισμός εκκενώσεως κατά Townsend,
- ο μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους (streamers),
- τα μονωτικά αέρια.

Κρίνεται απαραίτητο για τους φοιτητές να έχουν κάποιες βασικές γνώσεις σχετικά με:

- τους μηχανισμούς της ηλεκτρικής διάσπασης των αερίων, και
- τους τρόπους παραγωγής και μέτρησης εναλλασσόμενης υψηλής τάσης.

## **Η αγωγιμότητα των αερίων**

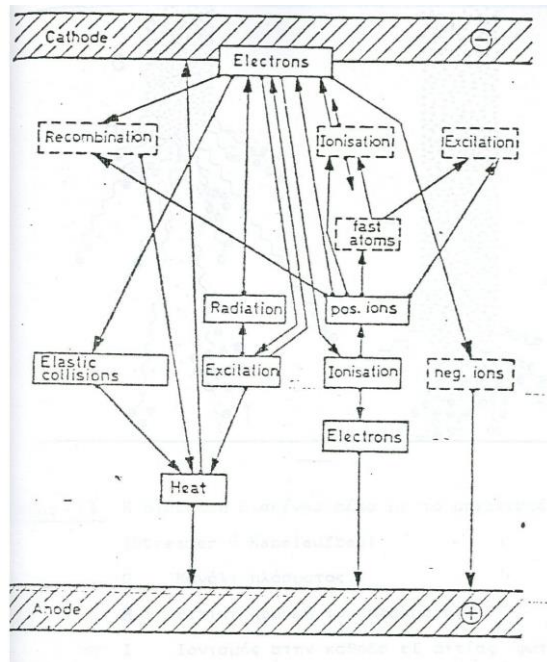
Στα αέρια τα μόρια και τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα άτομα αποτελούνται από θετικούς πυρήνες και από ηλεκτρόνια τα οποία δεν κυκλοφορούν ελεύθερα, άλλα συνδέονται μέσω ισχυρών δυνάμεων με τους πυρήνες. Έτσι όταν το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του αερίου έχει μικρή τιμή, δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και το αέριο συμπεριφέρεται ως τέλειος μονωτής.

Για να απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από την στοιβάδα του και να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, χρειάζεται την επίδραση ενός πολύ ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Στα αέρια δεν είναι μόνο τα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, αλλά και τα θετικά ιόντα τα οποία δεν έχουν σταθερή θέση όπως στα μέταλλα. Έτσι στη δημιουργία αγωγίμου δρόμου μέσα στο αέριο λαμβάνουν μέρος δυο ρεύματα με αντίθετες κατευθύνσεις. Το ρεύμα των ελεύθερων ηλεκτρονίων και το ρεύμα των θετικά φορτισμένων ιόντων.

Η ταχύτητα που αποκτούν τα θετικά ιόντα είναι πολύ μικρότερη απ' αυτή των ελεύθερων ηλεκτρονίων, λόγω της πολύ μεγαλύτερης μάζας τους. Έτσι αν οι αριθμοί των θετικών ιόντων και των ηλεκτρονίων είναι ίσοι, τα θετικά ιόντα θα παραμείνουν για πολύ μεγαλύτερο χρόνο στην περιοχή του αερίου το οποίο διασπάται, προσδίδοντας σε αυτή θετικό φορτίο. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ ανόδου και καθόδου και έτσι το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι σταθερό κατά μήκος του δρόμου διάσπασης. Εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια κινούνται και συγκρούονται ελαστικά με τα ελεύθερα άτομα με συνέπεια την διάδοσή τους προς όλες τις κατευθύνσεις. Συνέπεια αυτών των ελαστικών συγκρούσεων, είναι η διέγερση των ηλεκτρονίων στα άτομα και σε μερικές περιπτώσεις ο ιονισμός αυτών, ο οποίος είναι υπεύθυνος για δευτερογενή αποτελέσματα.

Ηλεκτρόνια από την κάθοδο μπορούν να συναντήσουν θετικά ιόντα, προσδίδοντας σε αυτά κινητική ενέργεια που τα κάνει αρκετά γρήγορα. Αυτά αν συναντήσουν ουδέτερα άτομα, τους προσδίδουν ταχύτητα ή αν έχουν επαρκή ενέργεια τα διεγείρουν, δημιουργώντας νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα. Τέλος, μπορεί τα κινούμενα θετικά ιόντα, να συναντήσουν ελεύθερα ηλεκτρόνια και να επανασυνδεθούν, δημιουργώντας έτσι ουδέτερα άτομα και έκλυση ακτινοβολίας.

Κατά τη διαδικασία της διάσπασης, μέρος της ενέργειας των ηλεκτρονίων, ιόντων και ταχέως κινούμενων μορίων ή ατόμων, θα εκδηλωθεί σαν θερμότητα, στο αέριο και στα ηλεκτρόδια και ένα άλλο μέρος σαν ακτινοβολία. Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Εξέλιξη της διάσπασης ενός αερίου:

• Αρχή εξέλιξης ή μετάβασης.

→: Τέλος εξέλιξης ή μετάβασης.

□: Εξελίξεις σημαντικές στα αδρανή αέρια.

□: Εξελίξεις ασήμαντες στα αδρανή αέρια.

### Η ηλεκτρική διάσπαση του αέρα

Ο μηχανισμός της διάσπασης του ατμοσφαιρικού αέρα χρήζει ενδελεχούς μελέτης λόγω της συχνής εφαρμογής του αέρα ως μονωτικού και του σχετικού τεχνικού ενδιαφέροντος.

Χαρακτηριστικό της διάσπασης είναι ότι η τάση κατά μήκος του διακένου, μειώνεται εξελικτικά, πράγμα που τελικά προξενεί πλήρη αγώγιμη σύνδεση μεταξύ ανόδου και

καθόδου. Αυτό λαμβάνει χώρα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η χωρητικότητα του διακένου να μην μπορεί να επαναφορτιστεί γρήγορα και συνεπώς η διάσπαση του διακένου είναι αναπόφευκτο επακόλουθο.

Η παρατήρηση της διάσπασης του ατμοσφαιρικού αέρα υπό στατικό ηλεκτρικό πεδίο σε τάσεις σχετικά μικρές, αποκάλυψε δύο βασικούς μηχανισμούς της διάσπασης.

- i. Σε διάκενα αέρα μέχρι 5cm, έχει ισχύ ένας σχετικά αργός μηχανισμός, ο οποίος ονομάζεται μηχανισμός εκκενώσεως κατά Townsend.
- ii. Σε διάκενα αέρα μεγαλύτερα από 5cm, οι διασπάσεις εκδηλώνονται μέσω ενός γρήγορου μηχανισμού, που από τη μορφή του σχετού εκκένωσης, ονομάζεται μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους (streamers). Χαρακτηριστικό αυτού του μηχανισμού είναι η παρουσία αρνητικών ιόντων στο διάκενο.

### Μηχανισμός εκκενώσεως κατά Townsend

Οι διασπάσεις των αερίων σε χαμηλές πιέσεις και μικρά διάκενα μπορούν να περιγραφούν με το μηχανισμό εκκενώσεως κατά Townsend. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που υπάρχουν μέσα στο αέριο επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο και αυτά συγκρούονται με τα μόρια του αερίου. Από τις συγκρούσεις αυτές νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια παράγονται, ενώ το αέριο ιονίζεται. Με αυτό τον τρόπο ένα σμήνος ελεύθερων ηλεκτρονίων δημιουργείται, το οποίο μετακινείται από την κάθοδο προς την άνοδο. Αυτό είναι το γνωστό φαινόμενο της χιονοστιβάδας, στην οποία όταν ένας επαρκής αριθμός νέων ιόντων δημιουργηθεί κοντά στην κάθοδο, τότε η διάσπαση του αερίου λαμβάνει χώρα.

Γι' αυτόν τον τύπο εκκένωσης η στατική τάση διάσπασης  $U_d$  σε ένα ομογενές πεδίο σταθερής θερμοκρασίας εξαρτάται μόνο από το γινόμενο της πίεσης  $p$  και το μήκος του διακένου  $s$ .

Η σταθερά ιονισμού  $\alpha$  του αέρα και η εξάρτησή της από την ένταση του πεδίου  $E$  περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{B}{E}} \quad (1)$$

όπου  $A$  και  $B$  είναι εμπειρικές σταθερές.

Για το μηχανισμό εκκενώσεως κατά Townsend σε ομογενές πεδίο, ισχύει η ακόλουθη συνθήκη διάσπασης:

$$\alpha \cdot s = k = const \quad (2)$$

Όταν η παραπάνω συνθήκη ικανοποιείται, τότε

$$E = E_d = \frac{U_d}{s} \quad (3)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις και λύνοντας ως προς  $U_d$ , προκύπτει ο νόμος του Paschen:

$$U_d = B \cdot \frac{p \cdot s}{\ln\left(\frac{A}{k} \cdot p \cdot s\right)} = U_d(p \cdot s) \quad (4)$$

Δηλαδή ο νόμος του Paschen ουσιαστικά δείχνει ότι η τάση διάσπασης  $U_d$  στα αέρια εξαρτάται τόσο από την πίεση  $p$ , όσο και από το μήκος του διακένου  $s$ .

Αν οι συνθήκες αυτού του νόμου ικανοποιούνται, τότε η εκκένωση πραγματοποιείται σύμφωνα με το μηχανισμό εκκενώσεως κατά Townsend.

### Μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους (streamers)

Σε υψηλότερες πιέσεις και μεγαλύτερα διάκενα, η εκκένωση πραγματοποιείται ακολουθώντας το μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους. Ο μηχανισμός αυτός χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι η εκπομπή φωτονίων από την άκρη του σμήνους ελεύθερων ηλεκτρονίων, παράγει νέα ελεύθερα ηλεκτρόνια προκαλώντας τη δημιουργία ενός θυσάνου με πολύ γρήγορο και απότομο ρυθμό, σε σχέση με το μέγεθος που είχε αρχικά το σμήνος των ελεύθερων ηλεκτρονίων.

Η έναυση του φωτοϊονισμού, ο οποίος είναι πολύ αποτελεσματικός για την ανάπτυξη της εκκένωσης, πρέπει να αναμένεται όταν ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας του φαινομένου της χιονοστιβάδας  $e^{ax}$ , έχει αποκτήσει την κρίσιμη τιμή περίπου  $e^{20} \approx 5 \cdot 10^8$ .

Η μετάβαση μιας εκκένωσης από τον μηχανισμό εκκενώσεως κατά Townsend στον μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους (streamers), για ένα συγκεκριμένο διάκενο, μπορεί να εξαρτάται από αρκετές παράγοντες.

Όσο μεγαλύτερο είναι το γινόμενο  $p \cdot s$ , τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα ένα σμήνος ελεύθερων ηλεκτρονίων να διασχίσει το διάκενο της εκκένωσης πριν ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας αποκτήσει την κρίσιμη τιμή του ( $e^{20}$ ). Για υπερτάσεις με τιμή μεγαλύτερη κατά περίπου 5% πάνω από τη τιμή της τάσης διάσπασης  $U_d$ , πρέπει να αναμένεται μια εκκένωση στον αέρα, η οποία εξηγείται με τον μηχανισμό εκκενώσεως κατά Townsend και όταν ισχύει:

$$ps \leq 10 \text{ bar} \cdot \text{mm} \quad (5)$$

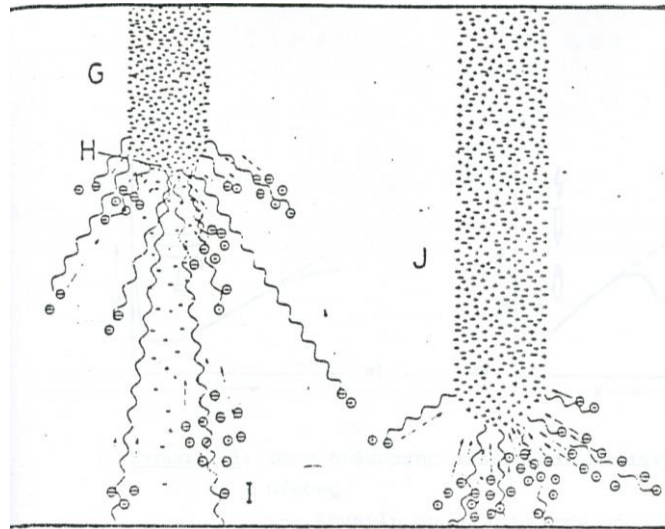
Σε υψηλότερες τιμές η διάσπαση συμβαίνει σύμφωνα με το μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους (streamers).

Για απότομες κρουστικές τάσεις, μπορούν να εμφανιστούν, τοπικά, υψηλές πεδιακές εντάσεις, οι οποίες παίρνουν τιμές πάνω από τη στατική τιμή της  $E_d$ . Οι πεδιακές αυτές εντάσεις εξαρτώνται από την κυματομορφή της κρουστικής τάσης στη διάταξη. Το  $\alpha$  αυξάνει ισχυρά με το  $E$  (ένταση του πεδίου) και συνεπώς ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας  $e^{\alpha x}$ , μπορεί να αποκτήσει την κρίσιμη τιμή ακόμα και σε ένα σμήνος ηλεκτρονίων μικρού μήκους.

Η πιθανότητα ιονισμού λόγω της εκπομπής φωτονίων είναι σχεδόν ανάλογη της πυκνότητας του αερίου. Συνεπώς όσο μεγαλύτερα είναι το μοριακό βάρος  $M$  και η πίεση  $p$ , τόσο μικρότερος είναι ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας βάσει του οποίου η ανάπτυξη του θυσάνου λαμβάνει χώρα.

Υψηλές πεδιακές εντάσεις ήδη επικρατούν σε ισχυρά ανομοιογενή πεδία – κοντά σε ηλεκτρόδια έντονης καμπυλότητας – πριν την έναυση μιας αυτοσυντηρούμενης εκκένωσης. Έτσι αποδεικνύεται ότι για μεγάλης καμπυλότητας ηλεκτρόδια, σφαιρικά ή κυλινδρικά, η πεδιακή ένταση διάσπασης  $E_d$ , αυξάνει ταχύτατα με την ελάττωση της ακτίνας καμπυλότητας  $r$ . Τούτο συνεπάγεται ότι το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, μόλις ξεκινήσει, γρήγορα φτάνει στην κρίσιμη τιμή του πολλαπλασιαστικού παράγοντα ( $e^{20}$ ).

Ο μηχανισμός εκκενώσεως με θυσάνους φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Η διάσπαση διακένου αέρα με το μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους  
 G: Κανάλι πλάσματος.

H: Θετική κορυφή του πλάσματος.

I: Ιονισμός στην κάθοδο εξαιτίας φωτοϊονισμού της κορυφής του πλάσματος.

J: Ο θύσανος του πλάσματος πλησιάζει την κάθοδο. Φαίνεται επίσης ο ισχυρός φωτοϊονισμός και η φωτοηλεκτρική απελευθέρωση από την κάθοδο.

### Τύποι των εκκενώσεων των αερίων

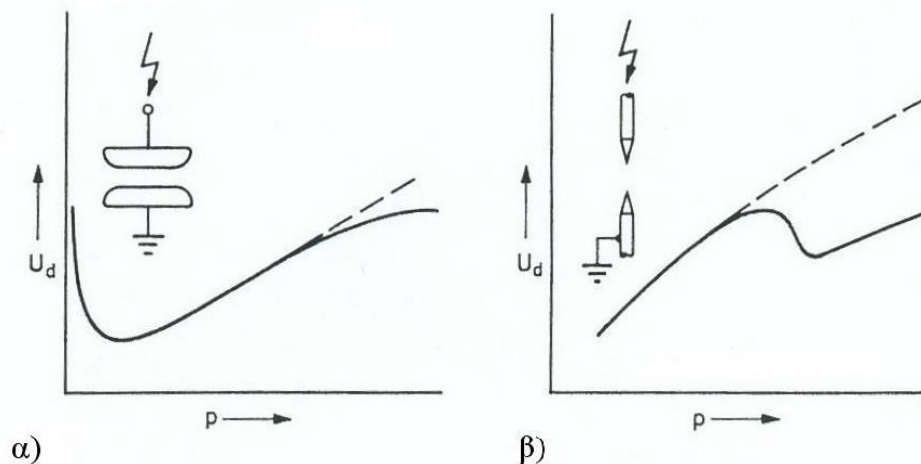
Ο τύπος καθώς και η διάρκεια της εκκένωσης ενός αερίου, εξαρτάται από την ενεργοποιημένη πηγή ρεύματος. Όταν ρεύματα της τάξης 1 Ampere ή περισσότερο, ρέουν στο δρόμο της εκκένωσης, δηλαδή στον οχετό, πρέπει να περιμένουμε τοξοειδείς εκκενώσεις (εμφάνιση τόξων). Στην περίπτωση αυτή, λόγω του θερμοϊονισμού αναπτύσσεται ένα καλά-αγώγιμο πλάσμα, η τάση του οποίου ελαττώνεται με την αύξηση του ρεύματος.

Αν το ρεύμα που ρέει μετά τη διάσπαση έχει τιμή της τάξης milliamperes (mA), πρέπει να περιμένουμε φωτεινές εκκενώσεις (glow discharges) ειδικά σε χαμηλές πιέσεις π.χ. 100mbar. Σε αυτό τον τύπο εκκένωσης οι φορείς φορτίου σχηματίζονται από δευτερογενή εκπομπή στην κάθοδο.

Η ασυνεχής μετάβαση σε μία εκκένωση με υψηλότερο ρεύμα αποδίδεται ως σπινθήρας (spark discharge). Στην πορεία της διάσπασης, αυτή είναι συνήθως η μετάβαση σε τοξοειδή εκκένωση (arc discharge), η οποία διαρκεί μόνο για ένα μικρό χρονικό διάστημα, κατά την εφαρμογή της τάσης. Σε δίκτυα παροχής ισχύος, η εξάλειψη των εγκατεστημένων τόξων είναι συνήθως αποτελεσματική μόνο μετά τη διακοπή.

### Αέρια με υψηλή διηλεκτρική αντοχή

Ο ξηρός αέρας ή το άζωτο είναι φθηνά μονωτικά υλικά με υψηλή διηλεκτρική αντοχή – ειδικά σε υψηλές πιέσεις – και γι' αυτό βρίσκουν μεγάλες τεχνικές εφαρμογές, όπως σε διακόπτες ή σε εφαρμογές στη Φυσική. Σε όλες τις περιπτώσεις, πάντως, και λόγω των ισχυρών καταπονήσεων των μεταλλικών μερών, στα οποία περιέχονται αυτά τα αέρια, πρέπει να λαμβάνονται τα κατάλληλα κατασκευαστικά μέτρα ασφαλείας.



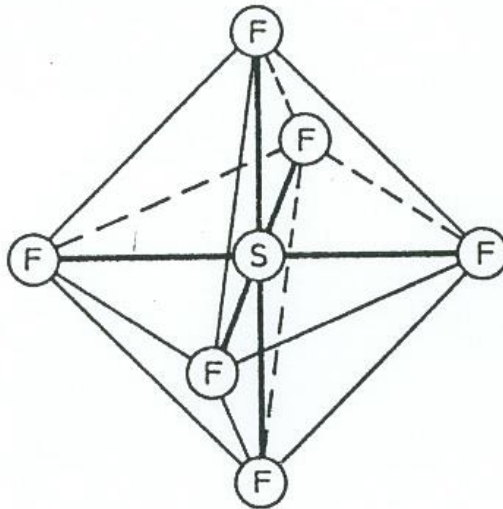
Σχήμα 3: Τάση διάσπασης ενός αερίου συναρτήσεως της πίεσης.

Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη συμπεριφορά βάσει του νόμου του Paschen για ομοιογενές (α) και ανομοιογενές πεδίο (β) ενώ η συνεχής γραμμή έχει χαραχθεί χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα.

Σε ομοιογενή ή ελαφρώς ανομοιογενή ηλεκτρόδια στον αέρα ή στο άζωτο και στο

σύνηθες εύρος των διακένων (της τάξης cm), μια αύξηση της πίεσης πάνω από τα 10 bar, έχει σαν αποτέλεσμα τη βαθμιαία απόκλιση από το νόμο του Paschen. Η τάση διάσπασης  $U_d$  δεν αυξάνεται ανάλογα με την πίεση  $p$  όπως φαίνεται στο σχήμα 3α. Ο λόγος για την απόκλιση αυτή οφείλεται στο μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους που περιγράφηκε πριν. Για εξαιρετικά ανομοιογενή πεδία η αύξηση της πίεσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της τάσης διάσπασης  $U_d$ . Σε αυτήν την περίπτωση η ανάπτυξη της εκκένωσης λόγω εκπομπής φωτονίων επικρατεί έναντι του ιονισμού λόγω κρούσεων, εξαιτίας της αυξημένης πίεσης. Στο σχήμα 3β φαίνεται μια σχηματική απεικόνιση μιας τέτοιας πιθανής καμπύλης.

Ένα άλλο αέριο που έχει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες και εξασφαλίζει αποτελεσματική σβέση τόξων, είναι το εξαφθοριούχο θείο ( $SF_6$ ). Παρ' όλο που αυτό είναι γνωστό εδώ και δεκαετίες η ευρεία χρήση του ξεκίνησε μόλις από το 1960. Χρησιμοποιείται για τη μόνωση διακοπών υψηλής τάσης, καλωδίων μεγάλης ισχύος, μετασχηματιστών και πολλών άλλων εξαρτημάτων. Το  $SF_6$  έχει μοριακό βάρος 146 και το βάρος του είναι 22% θείο και 78% φθόριο. Η μοριακή δομή του  $SF_6$  όπως φαίνεται στο σχήμα 4 είναι σαν ένα κανονικό οκτάεδρο στο κέντρο του οποίου βρίσκεται το άτομο του θείου, ενώ σε κάθε μια από τις έξι γωνίες τα άτομα του φθορίου. Η ενέργεια ιονισμού που απαιτείται για τη διάσπαση του  $SF_6$  είναι 19,3 eV. Στη διάσπαση λαμβάνει χώρα η αντίδραση:



Σχήμα 4: Η δομή του μορίου του  $SF_6$ .

Το  $SF_6$  με πυκνότητα 6,139 gr/lit στους 20 °C και σε ατμοσφαιρική πίεση περιβάλλοντος είναι ένα από τα βαρύτερα αέρια και είναι πέντε φορές βαρύτερο από τον αέρα. Είναι άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό και χημικά εξαιρετικά αδρανές. Εφ' όσον το  $SF_6$  δεν παρουσιάζει ιδιότητες διπόλου, η σχετική διηλεκτρική σταθερά είναι 1 ( $\epsilon_r=1$ ) και είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

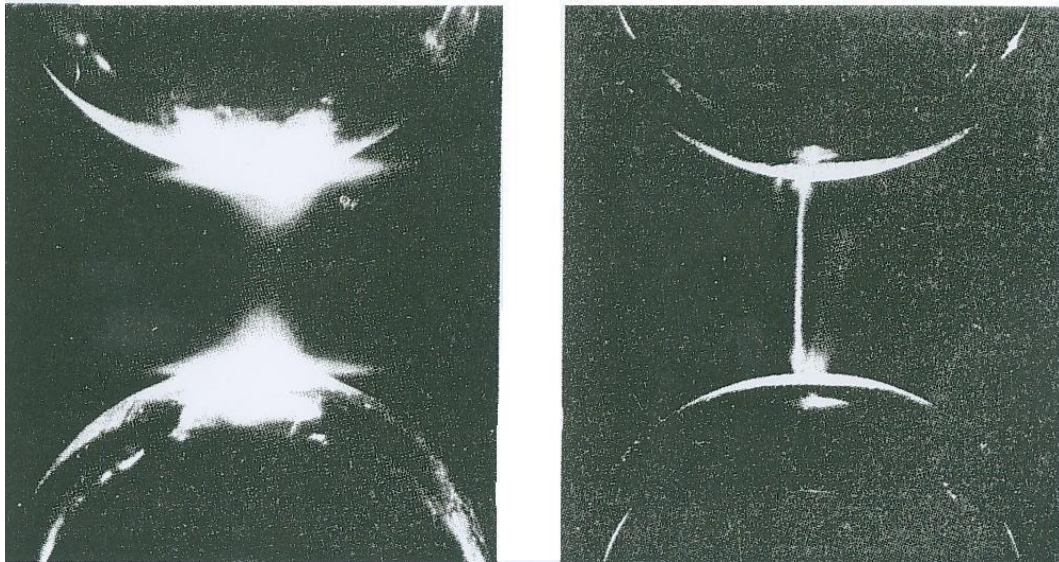
Η ηλεκτρική ένταση διάσπασης του  $SF_6$  σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο είναι δύο-τρεις



φορές μεγαλύτερη αυτής του αέρα. Αποτελέσματα μετρήσεων έχουν αποδείξει ότι η ανάπτυξη εκκένωσης στο SF<sub>6</sub>, μπορεί να περιγραφεί βάσει των κλασσικών αρχών διάσπασης των αερίων. Αυτό φαίνεται από την εξάρτηση της πίεσης από την τάση διάσπασης. Η μετάβαση από το μηχανισμό εκκενώσεως κατά Townsend στο λιγότερο πλεονεκτικό μηχανισμό εκκενώσεως με θυσάνους πραγματοποιείται για πολύ χαμηλότερες πιέσεις στο SF<sub>6</sub> απ' ότι στον αέρα. Κατά την διάρκεια των τοξοειδών εκκενώσεων (arc discharges) στο SF<sub>6</sub>, σχηματίζονται αντιδραστικά και τοξικά υποπροϊόντα, τα οποία απορροφώνται με κατάλληλα μέσα όπως το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

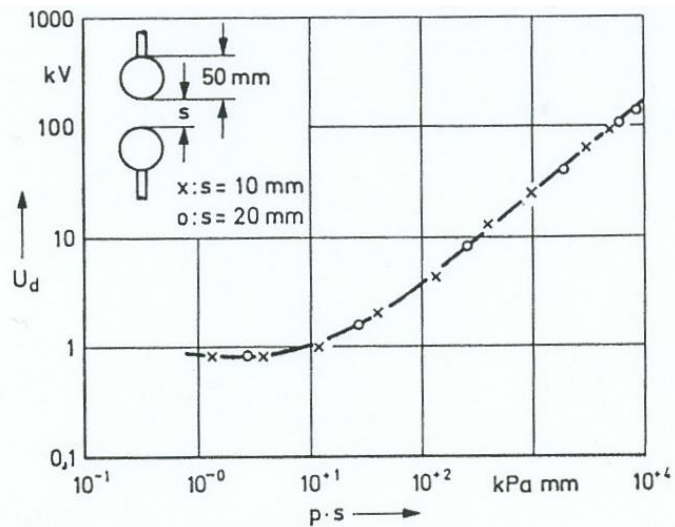
### **Ισχύς του νόμου Paschen για διάταξη ηλεκτροδίων στον αέρα και το SF<sub>6</sub>.**

Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται αποτελέσματα φωτογράφισης μιας φωτεινής εκκένωσης σε πίεση περίπου 10 mbar, καθώς επίσης και μιας τοξοειδούς εκκένωσης σε κανονική πίεση (1 bar).



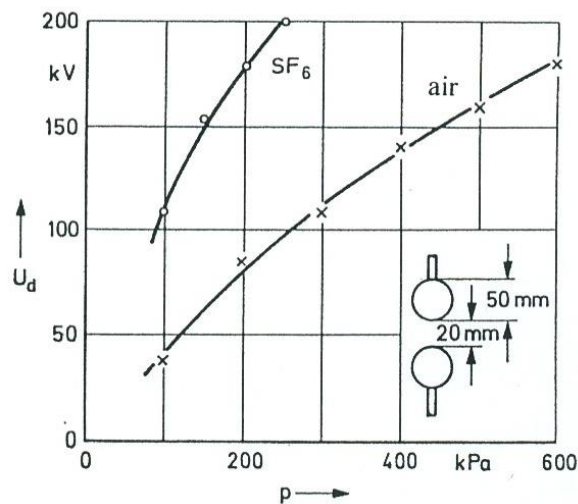
*Σχήμα 5: Τύποι εκκενώσεων στον αέρα για εναλλασσόμενη τάση και για διάκενο 20 mm.  
α) Φωτεινή εκκένωση σε πίεση 10 mbar και για χρόνο 5 sec.  
β) Τοξοειδής εκκένωση σε πίεση 1 bar και για χρόνο 40 msec.*

Το σύστημα ηλεκτροδίων, που φαίνεται στο σχήμα, είναι ένας σπινθηριστής σφαιρών (με διάμετρο σφαίρας  $D=50$ ). Η εναλλασσόμενη τάση διάσπασης  $U_d$  του αέρα παρουσιάζεται για διάκενα  $s=10\text{mm}$  και  $s=20\text{mm}$ . Στο σχήμα 6 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων ικανοποιούν το νόμο του Paschen.



Σχήμα 6: Μεταβολή της τάσης διάσπασης του αέρα μεταξύ σφαιρών.

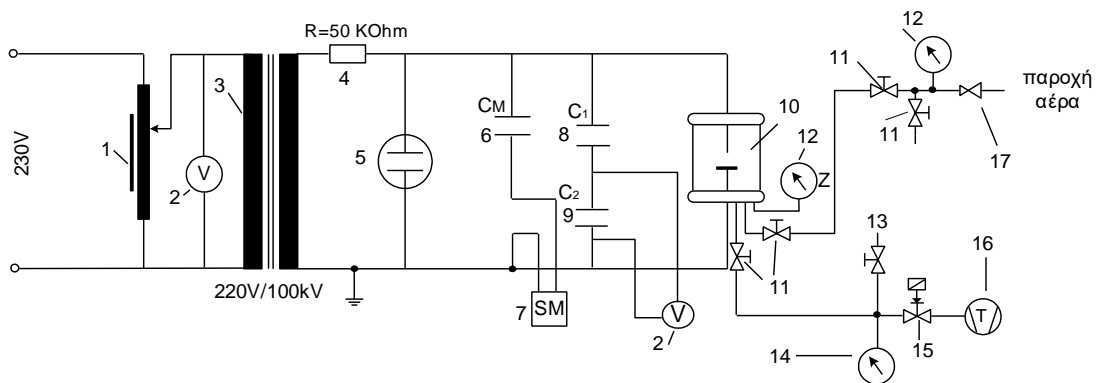
Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης διάσπασης  $U_d$  ενός σπινθηριστή σφαιρών διακένου  $s=20$  mm σε συνάρτηση με την πίεση (1-6 bar) για τον αέρα και για το SF<sub>6</sub>. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι για την ίδια πίεση  $p$ , η τάση διάσπασης  $U_d$  του SF<sub>6</sub> έχει διπλάσια τιμή από ότι του αέρα.



Σχήμα 7: Η εξάρτηση της τάση διάσπασης από την πίεσης ενός διακένου σφαιρών με SF<sub>6</sub> και αέρα.

### Πειραματική διάταξη

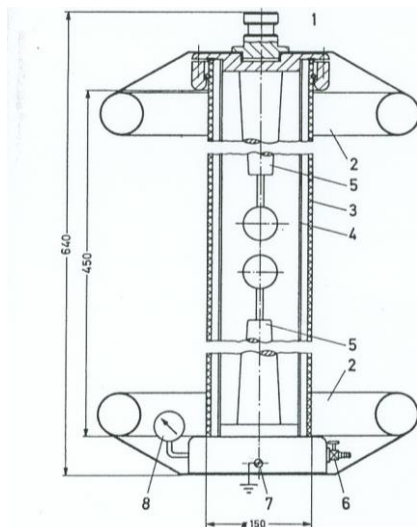
Στην εργαστηριακή άσκηση πραγματοποιείται η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στο σχήμα 8, που ακολουθεί:



Σχήμα 8: Η πειραματική διάταξη της εργαστηριακής άσκησης:

- |                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1: Αυτομετασχηματιστής          | 10: Δοχείο ελεγχόμενης πίεσης         |
| 2: Βολτόμετρο                   | 11: Απομονωτικοί κρουνοί (στρόφιγγες) |
| 3: Μετασχηματιστής MWB 5kVA     | 12: Ενδεικτικό μανόμετρο              |
| 4: Αντίσταση 50kΩ               | 13: Ρυθμιστική βαλβίδα                |
| 5: Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο    | 14: Μανόμετρο κενού (κενόμετρο)       |
| 6: Πυκνωτής 100kV, 100pF        | 15: Μαγνητική βαλβίδα                 |
| 7: Βολτόμετρο μεγίστου          | 16: Αντλία κενού                      |
| 8: Πυκνωτής 100kV, 1200pF       | 17: Βαλβίδα συστολής                  |
| 9: Πυκνωτής χαμηλής τάσης 492nF |                                       |

Η ρυθμιστική βαλβίδα (13) χρησιμοποιείται για την ακριβή ρύθμιση της επιθυμητής πίεσης. Για τις μετρήσεις με υψηλή πίεση (>1bar), είναι απαραίτητη η σύνδεση του δοχείου πίεσης με το σύστημα παροχής αέρα του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων μέσω της βαλβίδας συστολής (17). Η υψηλή πίεση μετράται χρησιμοποιώντας το ενδεικτικό μανόμετρο (12) που βρίσκεται ενσωματωμένο στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης. Οι στρόφιγγες (απομονωτικοί κρουνοί) (11) επιτρέπουν τη σύνδεση στις απαραίτητες σωληνώσεις. Η μαγνητική βαλβίδα (15) κλείνει αυτόματα όταν η αντλία κενού σταματήσει να λειτουργεί, έτσι αποτρέπεται η εξίσωση των πιέσεων. Η παραγωγή της υποπίεσης (κενού αέρος) που είναι απαραίτητη για το πείραμα γίνεται μέσω της αντλίας κενού (16) και μετρείται μέσω του μανομέτρου κενού (14). Τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης (10) όπως φαίνεται στο σχήμα 9, ο μονωτικός κύλινδρος του οποίου είναι κατασκευασμένος από Perspex έτσι ώστε να είναι δυνατή η οπτική παρατήρηση των φαινομένων της εκκένωσης. Τα εξεταζόμενα ηλεκτρόδια μπορούν να αλλάζουν (αποσπώμενες διατάξεις).



Σχήμα 9: Το δοχείο ελεγχόμενης πίεσης της πειραματικής διάταξης.

- |                                    |                              |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1: Καπάκι δοχείου                  | 5: Βάση στήριξης ηλεκτροδίου |
| 2: Ηλεκτρόδια εξομάλυνσης πεδίου   | 6: Ρυθμιστική βαλβίδα        |
| 3: Μονωτικός κύλινδρος από Perspex | 7: Ακροδέκτης γείωσης        |
| 4: Κύλινδρος από κόντρα πλακέ      | 8: Μανόμετρο                 |

Η εναλλασσόμενη τάση παρέχεται από τον μετασχηματιστή δοκιμών (3) και μετράται χρησιμοποιώντας:

- το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο (5).
- το βολτόμετρο μεγίστου (7) μέσω του πυκνωτή μέτρησης (6).
- το βολτόμετρο (2) στο πρωτεύον του μετασχηματιστή (3), λαμβάνοντας υπόψη το λόγο μετασχηματισμού ( $=100000/220$ ).
- το χωρητικό καταμεριστή (8, 9) και το βολτόμετρο (2).

Το δοχείο πίεσης πρέπει να τοποθετείται με ασφαλή τρόπο ώστε να μην είναι δυνατή η ανατροπή του κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η επιβαλλόμενη υπερπίεση πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη αντοχή του δοχείου μας, δηλαδή μικρότερη από 6bar. Το δοχείο μπορεί να χρησιμοποιείται για πειράματα, στα οποία το εύρος της πίεσης μεταβάλλεται από 0,1bar έως 6bar.

Πριν επιβάλλουμε την υψηλή πίεση είναι απαραίτητο να απομονώσουμε το μανόμετρο κενού, μέσω του ενσωματωμένου διακόπτη του για να μην καταστραφεί από την πίεση η μεμβράνη του.

Επιλέγεται η διάταξη των ηλεκτροδίων στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης (ακίδα-ακίδα, ακίδα-πλάκα, σφαίρα-σφαίρα), ενώ η μεταξύ τους απόσταση λαμβάνει διάφορες τιμές.

Επιλέγεται το αέριο (ατμοσφαιρικός αέρα ή SF<sub>6</sub>) που θα περιέχει το δοχείο ελεγχόμενης πίεσης.

Κατά τη διεξαγωγή της άσκησης η πίεση στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης μεταβάλλεται

από 1-6 bar χρησιμοποιώντας τη συσκευή παροχής αέρα του εργαστηρίου, καθώς και για τιμές υποπίεσης (δηλαδή τιμές μικρότερες της 1 bar), χρησιμοποιώντας την αντλία κενού.

Η τιμή της τάσης διάσπασης για καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση, η οποία εφαρμόζεται σε κάθε μια περίπτωση, καταγράφεται χρησιμοποιώντας διάφορους τρόπους μέτρησης (ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, βολτόμετρο μεγίστου, χωρητικό καταμεριστή, κ.λπ.). Οι μετρήσεις καταγράφονται στον πίνακα 1 που ακολουθεί και στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών.

Διακόπτουμε αμέσως την τάση στον μετασχηματιστή μόλις γίνει διάσπαση (γιατί;).

Μετά από κάθε διάσπαση αφαιρείται το αέριο του δοχείου και συμπληρώνεται εκ νέου, έτσι ώστε να μην περιέχονται ιόντα που οφείλονται στην προηγούμενη διάσπαση.

Πίνακας 1

Πίεση $P$ [bar]	Τάση πρωτεύοντος $U_{d1}$ [V]	Ηλεκτροστατικό Βολτόμετρο $U_{d2}$ [kV]	Βολτόμετρο μεγίστου $U_{d3}$ [kV]	Χωρητικός καταμεριστής $U_{d3}$ [kV]	Μέσος όρος τάσης $U_d$ [kV]

### Ερωτήσεις

1. Αναφέρατε πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών τρόπων μέτρησης της τάσης διάσπασης.
2. Υπολογίστε την τάση διάσπασης ( $U_d$ ) συναρτήσει της πίεσης.
3. Χαράξτε τη γραφική παράσταση της τάσης διάσπασης ( $U_d$ ) συναρτήσει της πίεσης.
4. Ποιος μηχανισμός διάσπασης εξηγεί καλύτερα το φαινόμενο με βάση τη γραφική παράσταση;
5. Εξηγήστε την επίδραση που θα είχε στις μετρήσεις η μη αλλαγή του αέρα μετά από κάθε διάσπαση.

6. Αντικαθιστώντας τα ηλεκτρόδια μέσα στο δοχείο ελεγχόμενης πίεσης (από ακίδα-πλάκα σε ακίδα-ακίδα ή σφαίρα-σφαίρα) τι θα παρατηρούσαμε στις μετρήσεις; Εξηγήστε τη μορφή του δημιουργούμενου ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε μια περίπτωση.
7. Αναφέρατε εφαρμογές του αερίου SF<sub>6</sub> στην τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων.
8. Ποιος ο λόγος ύπαρξης της αντίστασης R (Σχήμα 8, Νο 4); Πόση θα ήταν η τιμή της, αν τη βάζαμε στο πρωτεύον; Γιατί δεν τη βάζουμε στο πρωτεύον;