



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ποιοτικός Έλεγχος Εξαφθοριούχου Θείου (SF₆) σε
Εγκαταστάσεις GIS (Gas Insulated Switchgear)**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Ε. Δεναξάς

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ποιοτικός Έλεγχος Εξαφθοριούχου Θείου (SF₆) σε Εγκαταστάσεις GIS (Gas Insulated Switchgear)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Ε. Δεναξάς

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος
Καθηγητής Η.Μ.Μ.Υ Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Κ. Θ. Δέρβος
Καθηγητής ΗΜΜΥ Ε.Μ.Π

.....
Π. Δ. Μπούρκας
Καθηγητής Η.Μ.Μ.Υ Ε.Μ.Π

.....
Π. Βασιλείου
Καθηγήτρια Χ.Μ Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2005

.....
Αντώνιος Ε. Δεναξιάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Αντώνιος Ε. Δεναξιάς, 2005.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Στην μελέτη που ακολουθεί γίνεται αναφορά στα αέρια διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα στο εξαφθοριούχο θείο SF₆. Αναφέρονται οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα αέρια διηλεκτρικά, και γίνεται εκτεταμένη αναφορά στις ιδιότητες του SF₆ και τους λόγους που το καθιστούν σαν ένα από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα αέρια διηλεκτρικά. Εντούτοις υπάρχουν προβλήματα από την χρήση του με κυριότερο τα παραπροϊόντα αποσύνθεσης του SF₆ και τις επιπτώσεις τους στον εξοπλισμό και το περιβάλλον. Εκτός της παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, κάνουμε αναφορά στην πληθώρα άλλων χρήσεων και εφαρμογών του SF₆ στην βιομηχανία. Στην συνέχεια αναπτύσσεται η λειτουργία του τετραπολικού φασματογράφου μαζών (QMS) και η χρήση του στην ανίχνευση της σύνθεσης αερίων και συγκεκριμένα στον ποιοτικό έλεγχο του εξαφθοριούχου θείου που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά συστήματα Υψηλών Τάσεων με μόνωση αερίου (GIS). Συγκεκριμένα κάνουμε αναφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης των δειγμάτων του SF₆ από ΑΗΣ GIS όπου εκδηλώθηκε αστοχία στην μόνωση αερίου. Τέλος αναφέρουμε τα συμπεράσματα από την χρήση του SF₆ και την ανάλυση των δεδομένων του ποιοτικού ελέγχου.

Λέξεις Κλειδιά

Ποιοτικός έλεγχος, SF₆, Αέρια διηλεκτρικά, Παραπροϊόντα, Ηλεκτρική ενέργεια, Ηλεκτρικότητα, Τετραπολικός Φασματογράφος μάζας, QMS, GIS, ΑΗΣ.

Abstract

In the following study we refer to Gaseous Dielectrics use in Electric Power Industry and specifically to Sulfur Hexafluoride SF₆. Reference is made to the gaseous dielectrics properties and in extends to the properties of SF₆ that make it one of the most widely used gaseous dielectric. However, many problems arise as a consequence of its use, the most significant being the byproducts of SF₆ and their impact on the equipment and the environment. Besides its use in the Electrical Power Industry, SF₆ is used in a variety of other applications in the Industry. Furthermore, we extensively refer to the Quadrapole Mass Spectrograph (QMS), its use in the gas composition analysis, and particularly the Quality Control of Sulfur Hexafluoride used in High Voltage Gas Insulated Switchgears (GIS). Specifically we refer to the gas sample analysis from a GIS Power Plant were a gas insulation malfunction occurred. Finally we report the conclusions by the use of SF₆ and the analysis of Quality Control data.

KeyWords

Quality Control, SF₆, Gaseous Dielectrics, Byproducts, Electric Power, Electron affinity, Quadrapole Mass Spectrometer, QMS, GIS.

Ευχαριστίες:

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Δέρβο για τις οδηγίες του και την βοήθεια που μου προσέφερε στην αποπεράτωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο		Σελίδα
1	Executive Summary	10
2	Εισαγωγή	13
2.1	Αέρια Μονωτικά Υλικά	15
2.1.1	Ιδιότητες των αερίων διηλεκτρικών	16
2.1.2	Εγγενείς ιδιότητες	16
2.1.2.1	Βασικές φυσικές ιδιότητες	17
2.1.2.2	Βασικές χημικές ιδιότητες	18
2.1.3	Εξωγενείς ιδιότητες	18
2.1.4	Αντιδράσεις και παραπροϊόντα	18
2.1.5	Ιδιότητες ηλεκτρικής εκκένωσης και διάσπασης	19
2.1.6	Η Τάση Διάσπασης των Αερίων Διηλεκτρικών	19
2.1.7	Αέρια Μείγματα	20
2.1.8	Διηλεκτρική Σταθερά	20
2.1.9	Αγώγιμα σωματίδια	20
2.1.10	Υγρασία	21
2.1.11	Τοξικότητα	21
2.1.12	Θερμική και Χημική Σταθερότητα	21
2.1.13	Θερμικές Ιδιότητες	22
2.1.14	Κρίσιμες Σταθερές	23
2.1.15	Θερμοκρασία Ζέσεως	24
2.1.16	Τα Πρότυπα ASTM για τα Αέρια Διηλεκτρικά	25
2.1.17	Βιβλιογραφία	26
2.2	Εξαφθοριούχο Θείο	27
2.2.1	Ηλεκτραρνητικότητα	28
2.2.2	Διηλεκτρική σταθερά	28
2.2.3	Διηλεκτρική αντοχή	29
2.2.4	Ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου	32
2.2.5	Συντελεστής απωλειών	32
2.2.6	Αέρια διηλεκτρικά με μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή	33
2.2.7	Άλλες φυσικές ιδιότητες	33
2.2.7.1	Μηχανικά και θερμικά δεδομένα	33
2.2.7.2	Διαλυτότητα	34
2.2.7.3	Οπτικές ιδιότητες	40
2.2.8	Χημεία	41
2.2.9	Συμβατότητα	41
2.2.10	Διαθεσιμότητα	41
2.2.11	Ποιότητες (τύποι) του αερίου	41
2.2.12	Βιβλιογραφία	42
2.3	Χρήσεις – Εφαρμογές του SF₆	43
2.3.1	Ηλεκτρική μηχανολογία	44
2.3.1.1	Ικανότητα αναγέννησης	44
2.3.1.2	Χαμηλή αύξηση της πίεσης στην περίπτωση διάσπασης	44
2.3.1.3	Μηχανισμοί διακοπών Υψηλής Τάσης και σταθμοί διακοπών	45
2.3.1.4	Η χρήση του SF ₆ στον υδροηλεκτρικό σταθμό του Itaipu στην Βραζιλία	46
2.3.1.5	Γραμμές μεταφοράς με μόνωση αερίου (GIL)	47
2.3.1.6	Διακόπτες ισχύος μέσης τάσης	48
2.3.1.7	Καλώδια Υψηλής Τάσης και σωληνοειδείς γραμμές μεταφοράς	48
2.3.1.8	Μετασχηματιστές Υψηλών Τάσεων	49
2.3.1.9	Άλλες εφαρμογές σε Υψηλών Τάσεων	49
2.3.2	Η χρήση του SF ₆ στον επιταχυντή Vivitron	50
2.3.3	Κατασκευή υαλοπινάκων με μόνωση	50
2.3.4	Πρακτική χυτηρίων: μαγνήσιο	50
2.3.5	Πρακτική χυτηρίων: αλουμίνιο	52
2.3.6	Άλλοι τομείς εφαρμογών	53
2.3.7	Βιβλιογραφία	53

2.4	Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	54
2.4.1	Εισαγωγή	55
2.4.2	Βασικές χρήσεις του SF ₆ από την βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας	55
2.4.3	Συγκεντρώσεις του SF ₆ στο περιβάλλον	55
2.4.4	Το SF ₆ ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου	57
2.4.5	Βιβλιογραφία	58
2.5	Παραπροϊόντα του SF₆	59
2.5.1	Εισαγωγή	60
2.5.2	Περιγραφή των αποτελεσμάτων	63
2.5.3	Συγκεντρώσεις των παραπροϊόντων του SF ₆	65
2.5.4	Μετρήσεις για την απομάκρυνση διαβρωτικών συστατικών	66
2.5.5	Επίδραση των στερεών μονωτών στην αποσύνθεση του SF ₆ λόγω σπινθηρισμών	67
2.5.5.1	Αποτελέσματα	68
2.5.6	Βιβλιογραφία	68
3	Ανάλυση Αερίων με Τετραπολικό Φασματογράφο Μαζών	70
3.1	Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών	71
3.1.1	Πλεονεκτήματα καταγραφής μερικών πιέσεων σε συστήματα κενού	71
3.2	Η αρχή λειτουργίας των τετραπολικών φίλτρων. Μια γενική περιγραφή	73
3.2.1	Η πηγή ιόντων	73
3.2.1.1	Το ατομικό μοντέλο	73
3.2.1.2	Η διαδικασία ιονισμού	74
3.2.1.3	Η απαιτούμενη δυναμική ενέργεια των ηλεκτρονίων	75
3.2.1.4	Η πηγή ιόντων αξονικής δέσμης	76
3.2.1.5	Τα υλικά του νήματος και των ηλεκτρικών συνδέσεων	78
3.2.2	Το τετραπολικό φίλτρο μαζών	78
3.2.2.1	Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών	79
3.2.2.2	Η αναλυτική περιγραφή για την πορεία των ιόντων στην περιοχή του τετραπολικού φίλτρου	80
3.2.3	Ο ανιχνευτής ιόντων	84
3.2.3.1	Ο συλλέκτης Faraday	84
3.2.3.2	Δευτερογενής πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων (SEM)	84
3.2.3.3	Το συνεχές SEM, "Channeltron" TM	85
3.3	Πεδία εφαρμογών τετραπολικών φίλτρων	86
3.4	Η μελέτη του καθαρού και ξηρού SF ₆ με την χρησιμοποίηση τετραπολικού φασματογράφου μαζών	91
3.4.1	Το εξεταζόμενο υλικό (SF ₆)	91
3.4.2	Το φάσμα μαζών για το καθαρό και ξηρό SF ₆	91
2.4.3	Ανίχνευση μικρών περιεκτικότητας SF ₆ στον αέρα	91
3.5	Συμπεράσματα	95
3.6	Βιβλιογραφία	95
3.7	Παράρτημα: Διάταξη τετραπολικού φασματογράφου μάζας του εργαστηρίου ηλεκτρομονωτικών υλικών	96
4	Μελέτη Εφαρμογής	99
4.1	Ανάλυση SF ₆ θαλάμου του GIS όπου εκδηλώθηκε αστοχία.	100
4.1.1	Ιστορικό	100
4.1.2	Η μεθοδολογία ανάλυσης των δειγμάτων	100
4.1.3	Αποτελέσματα αναλύσεων	101
4.1.3.1	Αποτελέσματα που αφορούν τη περιοχή εκδήλωσης της αστοχίας	102
4.1.3.2	Αποτελέσματα που αφορούν δείγματα από θέσεις ακροκιβωτίων όμοιες με αυτές που εκδήλωσαν την αστοχία	105
4.1.3	Ανακεφαλαίωση – Τελικά συμπεράσματα	106
4.1.3.1	Τα αίτια εκδήλωσης της αστοχίας	106
4.1.3.2	Χαρακτηρισμός των αερίων δειγμάτων από τους θαλάμους των ακροκιβωτίων #2, #3, & #4	106
4.1.4	Παράρτημα I: Φάσματα	108
4.1.5	Παράρτημα II: Φωτογραφικό υλικό	122
5	Συμπεράσματα	125

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας		Σελίδα
1-1	Εφαρμογής – αποτελέσματος του ελέγχου.	12
2.1-1	Σχετική διηλεκτρική αντοχή V_s^R μερικών αερίων υπό συνεχή (DC) τάση διάσπασης σε ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο.	17
2.1-2	Η τάση διάσπασης των αερίων διηλεκτρικών	19
2.1-3	Ανηγμένες τιμές για τη τάση διάσπασης επιλεγμένων αερίων διηλεκτρικών και δυαδικών αερίων μειγμάτων του SF ₆ . (SF ₆ = 100)	20
2.1-4	Όρια έκθεσης εργαζομένων σε αέριο (8 -ωρος έκθεση x μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση)	21
2.1-5	Θερμοκρασιακή σταθερότητα επιλεγμένων κατασκευαστικών υλικών παρουσία του εξαφθοριούχου θείου	22
2.1-6	Τιμές ειδικής θερμικής αγωγιμότητας των αερίων διηλεκτρικών (υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση)	22
2.1-7	Συντελεστές ιξώδους επιλεγμένων αερίων διηλεκτρικών (σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση)	23
2.1-8	Κρίσιμες σταθερές επιλεγμένων αερίων διηλεκτρικών	23
2.1-9	Πιέσεις που απαιτούνται πα να υγροποιηθεί το εξαφθοροαιθάνιο σε επιλεγμένες θερμοκρασίες	24
2.1-10	Θερμοκρασίες ζέσεως επιλεγμένων αερίων (σε ατμοσφαιρική πίεση)	24
2.1-11	Σύσταση και ιδιότητες του αζώτου που χρησιμοποιείται ως αέριο διηλεκτρικό (ASTM D 1933)	25
2.1-12	Απαιτήσεις για το εξαφθοριούχο θείο που χρησιμοποιείται ως αέριο διηλεκτρικό (ASTM D 2472)	25
2.1-13	Σύσταση και ιδιότητες αέρος που χρησιμοποιείται ως αέριο διηλεκτρικό (ASTM D 3283)	25
2.2-1	Εσωτερική πίεση σε δεξαμενή SF ₆ σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και την πυκνότητα (kg SF ₆ / όγκο της δεξαμενής)	37
2.5-1	Αεριώδη παραπροϊόντα αποσύνθεσης του SF ₆ και τυπικές συγκεντρώσεις κατά την διάρκεια επαναλαμβανόμενων σπινθηρισμών	65
2.5-2	Οριακές τιμές* (Threshold Limit Values - TLV's) του αερίου SF ₆ και των Κυρίων Αεριωδών Παραπροϊόντων του.	66
2.5-3	Τα υλικά των μονωτήρων που μελετήθηκαν	68
3-1	Τιμές m/e μερικών θετικών ιόντων	87
3-2	Σχετική πιθανότητα ιονισμού	87
3-3	Πίνακας φυσικών ισοτόπων	88
3-4	Κορυφές φάσματος καθαρού SF ₆	95
4-1α	Κορυφές φάσματος καθαρού SF ₆	101
4-1β	Πιθανά παραπροϊόντα για το ηλεκτρικά καταπονημένο SF ₆	101

Executive Summary

1. Executive Summary

Από το 1900, όταν συντέθηκε για πρώτη φορά το SF₆ από τους Moissan και Lebeau, έχουν βαθμιαία αυξηθεί οι βιομηχανικές εφαρμογές του. Η αξιοπρόσεκτη αδράνεια του αερίου και οι χημικές και διηλεκτρικές ιδιότητές του έκαναν την General Electric Company το 1937 να προτείνει τη χρήση του στον ηλεκτρικό εξοπλισμό.

Το εξαφθοριούχο θείο (SF₆) έγινε εμπορικά διαθέσιμο το 1947 όμως η μεγάλης κλίμακας χρήση του στην κατασκευή ηλεκτρικού εξοπλισμού άρχισε γύρω στο 1960 στις ΗΠΑ και την Ευρώπη. Εκείνο το έτος αναφέρθηκε η πρώτη χρήση του SF₆ στους διακόπτες ισχύος και τους διακόπτες υψηλών και πολύ υψηλών τάσεων.

Η ενεργειακή κρίση των πρώτων ετών της δεκαετίας του '70 υπογράμμισε την ανάγκη για ενεργειακή συντήρηση αλλά και για αποδοτικούς, ασφαλείς, και περιβαλλοντικά αποδεκτούς τρόπους για την μετάδοση και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη των μονωτικών αερίων με ιδιότητες ηλεκτρικής μόνωσης ανώτερες από αυτές του αέρα επέτρεψε τη χρήση περισσότερο συμπαγούς εξοπλισμού, και υψηλότερων τάσεων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, που θα οδηγούσε σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των διακοπών ισχύος με μόνωση SF₆ στους υποσταθμούς υψηλής τάσης (HV) αυξήθηκε σημαντικά λόγω της αυξημένης διάρκειας ζωής τους, του μειωμένου απαιτούμενου χώρου και όγκου, και των περισσότερο μακροχρόνιων κύκλων συντήρησης που έχουν επιτευχθεί. Τα πολύ υψηλά πρότυπα στην σχεδίαση και την κατασκευή παρέχουν υψηλή αξιοπιστία αυτών των υποσταθμών. Σε μακροπρόθεσμη λειτουργία, εντούτοις, οι αποτυχίες εμφανίζονται ακόμα και μπορούν να προκαλέσουν σημαντική ζημία και πρόσθετη δαπάνη για τις επισκευές. Μια κοντινότερη ματιά δείχνει ότι οι μερικές εκκενώσεις, οι σπινθήρες ή τα τόξα ισχύος που ανήκουν στη λειτουργία των διακοπών υψηλής τάσης (HV) οδηγούν στην αποσύνθεση του μονωτικού αερίου SF₆.

Η μετάβαση της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του SF₆ πραγματικά προκαλεί τη ρήξη ενός ή περισσότερων δεσμών S-F στο μόριο του SF₆. Ο τύπος και η ποσότητα των προϊόντων διάσπασης επηρεάζονται από τις ηλεκτρικές και χημικές συνθήκες.

Τα προϊόντα που διαμορφώνονται είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά (π.χ. το HF), και μερικά από αυτά είναι εξαιρετικά τοξικά (π.χ. το S₂F₁₀). Αυτά τα παραπροϊόντα είναι παρόντα συνεχώς στους διακόπτες με συνέπεια οι μονωτήρες και άλλα εξαρτήματα να εκτεθούν σε ένα τέτοιο διαβρωτικό μέσο για πολύ, και με αυτόν τον τρόπο να υφίστανται μία υποβάθμιση της επιφάνειάς τους. Για τον λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια να αφαιρούνται με φιλτράρισμα του αερίου με μοριακά κόσκινα ή παρόμοια προληπτικά μέτρα.

Ως εκ τούτου η καθιέρωση ενός διαγνωστικού εργαλείου που να επιτρέπει την επιτόπου και σε απευθείας σύνδεση επιθεώρηση του μονωτικού αερίου είναι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για το χρήστη εξοπλισμού με πλήρωση SF₆.

Η ανάπτυξη ευαίσθητων τεχνικών ανίχνευσης αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των παραπροϊόντων του SF₆ μπορεί να πραγματοποιηθεί π.χ., με τη χρωματογραφία αερίου (GC), συνήθως σε συνδυασμό με τη φασματομετρία μάζας. Για την ανάλυση στο χώρο εργασίας, έχει αναφερθεί η χρήση ενός σωλήνα ανίχνευσης και ενός φορητού χρωματογράφου αερίου. Η χρωματογραφία αερίων (GC) μπορεί να οδηγήσει στην υδρόλυση μερικών παραπροϊόντων, έτσι ώστε ο προσδιορισμός μερικών ενώσεων είναι περιορισμένος. Ο χειρισμός των δειγμάτων είναι επίσης σημαντικό πρόβλημα. Πρόσφατα, έγινε χρήση εξοπλισμού που βασίζεται στην φασματοσκοπία κινητικότητας ιόντων (IMS) ως μια κατάλληλη τεχνική για την ανάλυση στο χώρο εργασίας. Από την στιγμή που πρέπει να αποφευχθεί το άνοιγμα του ηλεκτρικού εξοπλισμού, η προσοχή στρέφεται στην ανάλυση του αερίου με απλή δειγματοληψία. Παρά τη διαθεσιμότητα σύγχρονων αναλυτικών τεχνικών, η αποδοχή του αερίου και ο ποιοτικός έλεγχος του χρησιμοποιημένου αερίου πραγματοποιούνται ακόμα με τις συμβατικές μεθόδους, οι οποίες αποφεύγουν τις νέες μεθοδολογίες που αναπτύσσονται για την ανίχνευση των παραπροϊόντων.

Οι τεχνικές υπέρυθρης φασματομετρίας (IR) προσφέρουν την ευκαιρία για άμεση και επιτόπια ανίχνευση πολλών συστατικών χωρίς την εμφάνιση δευτερευόντων αντιδράσεων. Ο προσδιορισμός της ποσότητας μπορεί να επιτευχθεί εάν είναι διαθέσιμα τα φάσματα αναφοράς. Πολλά παροδικά είδη όπως το SF₄, που δεν μπορεί να ανιχνευθεί από τις τεχνικές χρωματογραφίας αερίων (GC), ανιχνεύθηκαν επιτόπου με χρήση της φασματοσκοπίας υπέρυθρων με μετασχηματισμό κατά Φουριέ (FTIR).

Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών (QMS) αποτελεί αναλυτική συσκευή την οποία χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο μονωτικών υλικών Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ για τον χαρακτηρισμό αερίων καθώς και στην ανίχνευση ουσιών με εξαιρετικά χαμηλές περιεκτικότητες (1 ppm) στο υπό έλεγχο αέριο.

Σκοποί του ποιοτικού ελέγχου στα GIS.

Ο έλεγχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς λόγους. Ο προφανέστερος είναι για να καθορίσει την κατάσταση του εξοπλισμού. Αναγνωρίζουμε ότι ο έλεγχος μπορεί να λάβει πολλές μορφές συμπεριλαμβανομένων των χειρωνακτικών επιθεωρήσεων (περιοδικές οπτικές επιθεωρήσεις), συνεχής έλεγχος με συναγερμό αλλαγής κατάστασης ή συνθηκών σαν το μόνο αποτέλεσμα (συναγερμός χαμηλού επιπέδου), περιοδικός αυτοματοποιημένος έλεγχος με σύνδεση φορητών οργάνων ανάλυσης (ανάλυση υπολογιστών που μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο) ή με συνεχή έλεγχο σε απευθείας σύνδεση (μέτρηση των παραμέτρων σε όλη τη διάρκεια του χρόνου για να αξιολογήσει την κατάσταση ενώ βρίσκεται σε υπηρεσία).

Ο έλεγχος πρέπει να εφαρμόζεται όταν έχουμε μια τιμή του λόγου κόστους προς κέρδος σαν αποτέλεσμα της εφαρμογής του ελέγχου ως προς τις εναλλακτικές λύσεις χωρίς έλεγχο.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα 1-1 που ακολουθεί.

Πίνακας 1-1: Εφαρμογής – αποτελέσματος του ελέγχου.

Έκβαση εφαρμογής	Οφέλη & πλεονεκτήματα εφαρμογής
λειτουργική κατάσταση	<ul style="list-style-type: none">• Καθορίζει την λειτουργική δυνατότητα του εξοπλισμού.• Καθορίζει την λειτουργική κατάσταση του εξοπλισμού.
πρόληψη βλάβης	<ul style="list-style-type: none">• Αξιολογεί την κατάσταση του εξοπλισμού, ανιχνεύει τις ανώμαλες συνθήκες και ξεκινάει την δράση για να αποτραπεί η επικείμενη βλάβη.
υποστήριξη συντήρησης	<ul style="list-style-type: none">• Αξιολογεί την κατάσταση του εξοπλισμού και αρχίζει τη συντήρηση μόνο όταν οι υποβαθμισμένες συνθήκες απαιτούν συντήρηση.• Βοηθάει με τον προγραμματισμό της συντήρησης.• Εκτιμάει την κατάσταση ενός μεγαλύτερου πληθυσμού παρόμοιου ή ίδιου εξοπλισμού
Αποτίμηση χρόνου ζωής	<ul style="list-style-type: none">• Αξιολογεί την κατάσταση του εξοπλισμού για να καθορίσει την προσδοκώμενη διάρκεια ζωής.• Ανιχνεύει τις ανώμαλες συνθήκες.
βελτιστοποίηση της λειτουργίας	<ul style="list-style-type: none">• Αξιολογεί την λειτουργική κατάσταση του εξοπλισμού παρατείνοντας ή μεγιστοποιώντας τα καθήκοντα που επιβάλλονται στον εξοπλισμό (γενικά σε συνθήκες πέραν των φορτίων που αναγράφονται στην πινακίδα της συσκευής).• Ελέγχει τα αποτελέσματα της φόρτωσης ανεξάρτητα από την κατάσταση του εξοπλισμού.• Βελτιστοποιεί την λειτουργία του εξοπλισμού στο σύστημα (π.χ. ελεγχόμενη λειτουργία διακόπτη ισχύος)
δοκιμές επαλήθευσης ανάθεσης	<ul style="list-style-type: none">• Επιβεβαιώνει τις σωστές συνθήκες εγκατάστασης και ρυθμίσεις.• Αξιολογεί την κατάσταση του εξοπλισμού και βελτιώνει την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα των δοκιμών επαλήθευσης / αποδοχής.• Αυτοματοποιεί τη συλλογή και τη συντήρηση των βασικών δεδομένων και χαρακτηριστικών.
ανάλυση βλάβης	<ul style="list-style-type: none">• Παρέχει τις πληροφορίες για την προγενέστερη κατάσταση του εξοπλισμού αφότου έχει εμφανιστεί μια βλάβη.
ασφάλεια προσωπικού	<ul style="list-style-type: none">• Αποτρέπει τις επισφαλείς συνθήκες για το προσωπικό
ασφάλεια περιβάλλοντος	<ul style="list-style-type: none">• Αποτρέπει τις επισφαλείς συνθήκες για το περιβάλλον.

Εισαγωγή

2: Εισαγωγή

Ένα σημαντικό τμήμα του εξοπλισμού παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι και οι διακόπτες ισχύος (Switchgears) με μόνωση αερίου.

Ο σκοπός ενός διακόπτη ισχύος είναι να εξασφαλίσει την ανεμπόδιστη ροή του ρεύματος μέσα στο δίκτυο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, και να διακόπτει τη ροή του υπερβολικού ρεύματος σε ένα δίκτυο που έχει υποστεί βλάβη. Μπορεί επίσης να απαιτηθεί να διακόπτει το ρεύμα φορτίων κάτω από συγκεκριμένες περιστάσεις και σε άλλες κατά την διάρκεια ελαττωματικής λειτουργίας να εκτελεί μια ακολουθία ανοίγματος -κλεισίματος- ανοίγματος (αυτόματης επανάληψης κλεισίματος). Το επιτυχές επίτευγμα αυτών των καθηκόντων στηρίζεται επάνω στη καλή μηχανική σχεδίαση για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του ανοίγματος και του κλεισίματος των επαφών των διακοπών, και στον καλό ηλεκτρικό σχεδιασμό για να εξασφαλίσει ότι ο διακόπτης μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά στις ηλεκτρικές καταπονήσεις.

Κατά τη διάρκεια των ακολουθιών ανοίγματος και κλεισίματος εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό τόξο μεταξύ των επαφών του διακόπτη. Σε ένα δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, το τόξο είναι ανεκτό και ελεγχόμενο έως ότου εμφανιστεί ο φυσικός μηδενισμός του ρεύματος. Με τον μηδενισμό του ρεύματος επιτυγχάνεται η σβέση του τόξου με διάφορες τεχνικές ώστε να περιοριστεί η αντίδραση του συστήματος στην διακοπή.

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 υπήρξε αύξηση της χρήσης του SF₆ ως μέσο απόσβεσης του ηλεκτρικού τόξου κυρίως λόγω των σημαντικών ιδιοτήτων ηλεκτρικής μόνωσης και της χημικής αδράνειάς του υπό κανονικές συνθήκες. Στη συνέχεια, έγινε αντιληπτό ότι κατείχε επίσης ιδιότητες συμπίεσης και απορρόφησης της θερμοκρασίας, οι οποίες είναι αρκετά διαφορετικές από εκείνες άλλων μέσων διακοπών όπως το λάδι και ο αέρας, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πλεονέκτημα έναντι αυτών. Αυτές οι ιδιότητες οδήγησαν στην εξέλιξη των διακοπών τύπου Puffer, αναρρόφησης, αυτοσυμπίεσης και περιστροφικού τόξου που είναι εμπορικά επιτυχείς εξ αιτίας του χαμηλού κόστους και του μειωμένου μεγέθους τους. Το τελευταίο χαρακτηριστικό γνώρισμα μαζί με την άριστη δυνατότητα μόνωσης του SF₆ έχει οδηγήσει στην εξέλιξη των συστημάτων υποσταθμών με μεταλλική επένδυση μέσα στην οποία ο διακόπτης αποτελεί μία ενιαία μονάδα. Κατά συνέπεια, το μέγεθος, το σχέδιο, η εγκατάσταση και η εμφάνιση τέτοιων υποσταθμών έχουν προκαλέσει επανάσταση στον χώρο των διακοπών ισχύος με μόνωση αερίου (GIS).

Αέρια Μονωτικά Υλικά

2.1. Αέρια Μονωτικά Υλικά

Τα αφθονότερα αέρια που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως μόνωση σε ηλεκτρικό εξοπλισμό ήταν ο αέρας και το κύριο συστατικό του, το άζωτο. Παρόλα αυτά, τα αέρια αυτά έχουν συγκεκριμένους περιορισμούς, και η αναγκαιότητα αερίων με βελτιωμένα χαρακτηριστικά αυξήθηκε καθώς ο εξοπλισμός με μόνωση αερίου γινόταν όλο και πιο πολύπλοκος και απαιτητικός. Σαν απάντηση σ' αυτήν την αναγκαιότητα αναπτύχθηκαν άλλα αέρια ή και μείγματα ώστε να χρησιμοποιηθούν ως αέρια διηλεκτρικά. Τα αέρια διηλεκτρικά μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- **Απλά αέρια:** αέρας, άζωτο (N_2), υδρογόνο (H_2), ήλιο (He), οξυγόνο (O_2)
- **Αέρια οξειδία:** διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), διοξείδιο του θείου (SO_2)
- **Αέριοι υδρογονάνθρακες:** μεθάνιο (CH_4), αιθάνιο (C_2H_6), προπάνιο (C_3H_8), βουτάνιο (C_4H_{10}), εξάνιο (C_6H_{14}).
- **Ηλεκτραρνητικά αέρια** (όλα εκτός του SF_6 χρησιμοποιούνται κυρίως ως ψυκτικά)
 - Εξαφθοριούχο θείο (SF_6)
 - Διχλωροδιφθορομεθάνιο (CCl_2F_2 , Freon 12, Genetron 12)
 - Χλωροτριφθορομεθάνιο ($CClF_3$, Freon 13)
 - Τετραφθοράνθρακας (CF_4 , Freon 14)
 - Χλωροδιφθορομεθάνιο ($CHClF_2$, Freon 22)
 - Χλωροπενταφθοροαιθάνιο (CF_3CF_2Cl , Freon 115)
 - Εξαφθοροαιθάνιο (CF_3CF_3 , Freon 116)

Οι βασικοί προμηθευτές ηλεκτραρνητικών αερίων είναι οι:

AlliedSignal Corporation: SF_6 και αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες (Genetron™)

Ashland Chemical: SF_6

Du Pont: Αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες (Freons™)

Solvay Fluor: SF_6 , αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες.

2.1.1. Ιδιότητες των αερίων διηλεκτρικών

Οι ιδιότητες ενός αερίου που είναι απαραίτητες για τη χρήση του στον εξοπλισμό υψηλής τάσης είναι πολλές και ποικίλλουν ανάλογα με την ιδιαίτερη εφαρμογή του αερίου και του εξοπλισμού. Επειδή οι ιδιότητες αυτές συνδέονται μεταξύ τους, πρέπει να επιτύχουμε τον βέλτιστο συνδυασμό τους ώστε μπορούμε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα σε σχέση με τη διηλεκτρική αντοχή.

Στους παρακάτω τομείς προσδιορίζονται οι ιδιότητες του αερίου διηλεκτρικού, που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις εφαρμογές υψηλής τάσης. Οι ιδιότητες ενός αερίου διηλεκτρικού διαιρούνται σε τέσσερις ομάδες:

- Εγγενείς ιδιότητες (φυσικές και χημικές)
- Εξωγενείς ιδιότητες (αντιδράσεις, παραπροϊόντα αερίου, εκκενώσεις και διακοπή)
- Άλλες ιδιότητες που είναι απαραίτητες για την εμπορική χρήση και
- Συγκεκριμένες ιδιότητες που απαιτούνται για τη διακοπή τόξων, τις γραμμές μεταφοράς, και τους μετασχηματιστές.

2.1.2. Εγγενείς ιδιότητες

Οι εγγενείς ιδιότητες είναι εκείνες οι φυσικές και χημικές ιδιότητες ενός αερίου που είναι έμφυτες στη φυσική ατομική ή μοριακή δομή του αερίου. Αυτές οι ιδιότητες είναι ανεξάρτητες από την εφαρμογή ή το περιβάλλον στο οποίο τοποθετείται το αέριο.

2.1.2.1 Βασικές φυσικές ιδιότητες

Μια από τις επιθυμητές ιδιότητες ενός αερίου διηλεκτρικού είναι η υψηλή διηλεκτρική αντοχή (υψηλότερη, παραδείγματος χάριν, από τον αέρα). Οι ιδιότητες του αερίου που είναι κυρίως αρμόδιες για την υψηλή διηλεκτρική αντοχή είναι εκείνες που μειώνουν τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι παρόντα σε ένα ηλεκτρικά καταπονημένο διηλεκτρικό αέριο. Για να επιτύχει μια τέτοια μείωση της πυκνότητας του αριθμού των ηλεκτρονίων, ένα αέριο πρέπει:

- **Να είναι ηλεκτροαρνητικό.** Ηλεκτραρνητικά καλούνται τα αέρια που έχουν την ικανότητα να μειώνουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που τυχόν έχουν παραχθεί, σχηματίζοντας αρνητικά ιόντα. Επομένως τα ηλεκτραρνητικά αέρια έχουν αυξημένη ικανότητα μόνωσης σε σχέση με τα αέρια που δεν εκδηλώνουν την ιδιότητα αυτήν, όπως π.χ. το άζωτο ή ο αέρας. Τα σημαντικότερα ηλεκτραρνητικά αέρια που αξιοποιούνται ως διηλεκτρικά είναι τα αλογονίδια του θείου και του άνθρακα. Σήμερα, το πλέον διαδεδομένο ηλεκτραρνητικό αέριο στις εφαρμογές είναι το SF₆. Συνεπώς το αέριο θα πρέπει κατά προτίμηση να παρουσιάζει αυξημένη δέσμευση ηλεκτρονίων όταν αυξάνεται η ενέργεια τους ή όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του αερίου, δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια έχουν μια ευρεία διακύμανση ενεργειών καθώς η θερμοκρασία του αερίου σε πολλές εφαρμογές είναι υψηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος.
- Το αέριο θα πρέπει να έχει καλές ιδιότητες επιβράδυνσης των ηλεκτρονίων (να επιβραδύνει τα ηλεκτρόνια έτσι ώστε να μπορούν να δεσμευθούν αποτελεσματικά σε χαμηλότερες ενέργειες και να αποτραπούν από το να παράγουν περισσότερα ηλεκτρόνια με ιονισμό κρούσης.
- Επίσης θα πρέπει να έχουν χαμηλό επίπεδο ιονισμού και υψηλή τιμή έναρξης του ιονισμού (δηλαδή να εμποδίζει τον ιονισμό λόγω πρόσκρουσης ηλεκτρονίων).

Μπορούμε να δούμε την σημασία αυτών των παραμέτρων, ειδικά της δέσμευσης ηλεκτρονίων, στον καθορισμό της διηλεκτρικής αντοχής για αντιπροσωπευτικά δείγματα διαφόρων αερίων στον πίνακα 2.1-1. Είναι εμφανές σε αυτόν τον πίνακα ότι μερικά αέρια υπερβαίνουν πραγματικά τη διηλεκτρική αντοχή του SF₆. Εντούτοις, όλα παρουσιάζουν αρνητικές ιδιότητες που τα καθιστούν λιγότερο επιθυμητά αερίωδη μονωτικά στις πρακτικές εφαρμογές.

Πίνακας 2.1-1. Σχετική διηλεκτρική αντοχή V_s^R μερικών αερίων υπό συνεχή (DC) τάση διάσπασης σε ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο.

Αέριο	V_s^R	Σχόλια
SF ₆	1	Το πλέον κοινό διηλεκτρικό αέριο σήμερα εκτός από τον αέρα.
C ₃ F ₈	0.90	Αέρια με ισχυρή και πολύ ισχυρή δέσμευση ηλεκτρονίων ιδικά σε χαμηλές ενεργειακές ζώνες των ηλεκτρονίων.
n-C ₄ F ₁₀	1.31	
c-C ₄ F ₈	~1.35	
1,3-C ₄ F ₆	~1.50	
c-C ₄ F ₆	~1.70	
2-C ₄ F ₈	~1.75	
2-C ₄ F ₆	~2.3	
c-C ₆ F ₁₂	~2.4	
CHF ₃	0.27	Αέρια με ασθενή δέσμευση ηλεκτρονίων. Μερικά (CO, N ₂ O) είναι αποτελεσματικά στην επιβράδυνση των ηλεκτρονίων.
CO ₂	0.30	
CF ₄	0.39	
CO	0.40	
N ₂ O	0.44	
Air	~0.30	Ουσιαστικά δεν δεσμεύει ηλεκτρόνια.
H ₂	0.18	
N ₂	0.36	Δεν δεσμεύει ηλεκτρόνια αλλά είναι αποτελεσματικό στην επιβράδυνση των ηλεκτρονίων.
Ne	0.006	Δεν δεσμεύει ηλεκτρόνια και δεν είναι αποτελεσματικό στην επιβράδυνση των ηλεκτρονίων.
Ar	0.07	

Οι σχετικές τιμές που εμφανίζονται στον πίνακα μπορούν να τεθούν σε απόλυτη κλίμακα αν πολλαπλασιασθούν επί $3.61 \times 10^{-15} \text{ V cm}^2$, το πεδίο διάσπασης του ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου του SF₆.

Η κρισιμότερη ιδιότητα ενός αερίου διηλεκτρικού για την υψηλή διηλεκτρική αντοχή είναι το μεγάλο εύρος δέσμμευσης ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε μια ευρεία ενεργειακή ζώνη. Η δεύτερη σημαντικότερη ιδιότητα είναι το μεγάλο εύρος διασποράς ηλεκτρονίων σε χαμηλότερες ενέργειες για την επιβράδυνσή τους ώστε να μπορούν να δεσμευθούν αποτελεσματικότερα και να αποτραπούν από την παραγωγή περισσότερων ηλεκτρονίων με συγκρούσεις με τα μόρια του αερίου.

Επιπλέον, οι ιδιότητες του αερίου πρέπει να είναι τέτοιες που η αποδέσμευση ηλεκτρονίων από τα αρνητικά ιόντα να αποτρέπεται καθώς η αποδέσμευση είναι μια σημαντική πηγή ηλεκτρονίων που προκαλούν τη διάσπαση του αερίου. Τα αρνητικά ιόντα που σχηματίζονται (λόγω της δέσμμευσης ηλεκτρονίων) πρέπει να είναι όσο το δυνατόν σταθερότερα. Η αποδέσμευση των ηλεκτρονίων από τα αρνητικά ιόντα μπορεί να γίνει με διάφορες διαδικασίες, με πρώτη την αυτοαποδέσμευση, την αποδέσμευση λόγω πρόσκρουσης, και την φωτοαποδέσμευση. Ειδικά η προηγούμενη διαδικασία εξαρτάται από την θερμοκρασία του αερίου.

Εκτός από τις παραπάνω ιδιότητες, υπάρχουν διάφορες άλλες φυσικές ιδιότητες που είναι απαραίτητες για τον πλήρη χαρακτηρισμό της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του αερίου και της συμπεριφοράς του στην πράξη. Αυτές περιλαμβάνουν:

- Δευτερογενείς διαδικασίες όπως η εκπομπή ηλεκτρονίων από τις επιφάνειες λόγω πρόσκρουσης ιόντων και φωτονίων.
- Διαδικασίες φωτονίων.
- Απορρόφηση της ακτινοβολίας φωτοϊονισμού (αυτός είναι ένας παράγοντας ελέγχου στην ανάπτυξη της εκκένωσης στα ανομοιόμορφα πεδία).
- Διαχωριστική αποσύνθεση λόγω της πρόσκρουσης ηλεκτρονίων.
- Αντιδράσεις ιόντων-μορίων.
- Αντιδράσεις με τις ακαθαρσίες και,
- Αντιδράσεις με τις εσωτερικές επιφάνειες των κατασκευών.

2.1.2.2. Βασικές χημικές ιδιότητες

Το διηλεκτρικό αέριο πρέπει να έχει τις ακόλουθες "χημικές" ιδιότητες:

- Υψηλή πίεση ατμοποίησης.
- Υψηλή ειδική θερμότητα (υψηλή θερμική αγωγιμότητα) για την ψύξη του αερίου.
- Θερμική σταθερότητα κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων για θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 400 K.
- Χημική σταθερότητα και αδράνεια όσον αφορά τα αγωγά και μονωτικά υλικά.
- Να είναι άφλεκτο.
- Μη τοξικό και,
- Μη εκρηκτικό.

Όταν χρησιμοποιείται σε μίγματα, πρέπει να έχει κατάλληλες θερμοδυναμικές ιδιότητες για την ομοιομορφία, την σύνθεση και το χωρισμό των μιγμάτων.

2.1.3. Εξωγενείς ιδιότητες

Οι εξωγενείς ιδιότητες είναι εκείνες που περιγράφουν πώς ένα αέριο μπορεί να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον του, ή με τις εξωγενείς επιδράσεις, όπως οι ηλεκτρικές διασπάσεις ή εκκενώσεις.

2.1.4. Αντιδράσεις και παραπροϊόντα

Για να χρησιμοποιηθεί στις ηλεκτρικές εφαρμογές, ένα διηλεκτρικό αέριο πρέπει:

- Να μην υπόκειται σε εκτενή αποσύνθεση,
- Να μην οδηγεί σε οποιοδήποτε πολυμερισμό,
- Να μην σχηματίζεται άνθρακας ή άλλες επικαθίσεις,
- Να μην είναι διαβρωτικό και να μην αντιδρά με τα μέταλλα, τους μονωτές, τα διαχωριστικά, και τα στεγανωτικά υλικά.

Επιπλέον πρέπει:

- Να μην έχει σημαντικά τοξικά ή δυσμενώς αντιδραστικά παραπροϊόντα,

- Να έχει παραπροϊόντα που να μπορούν να αφαιρεθούν, και
- Να έχει υψηλούς ρυθμούς επανασχηματισμού, ειδικά στην περίπτωση τόξων διακοπής.

Τέλος, το αέριο πρέπει να είναι φιλικό προς το περιβάλλον, π.χ., δεν πρέπει να συμβάλει στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, δεν πρέπει να μειώνει το στρατοσφαιρικό όζον, και δεν πρέπει να παραμένει στο περιβάλλον για μεγάλες χρονικές περιόδους.

2.1.5. Ιδιότητες Ηλεκτρικής εκκένωσης και διάσπασης

Οι συγκεκριμένες ιδιότητες του αερίου σε συνθήκες εκκένωσης και διάσπασης περιλαμβάνουν:

- Υψηλή τάση διάσπασης σε ομοιογενή και ανομοιογενή ηλεκτρικά πεδία,
- Χαμηλή ευαισθησία στην τραχύτητα ή τις ατέλειες των επιφανειών και στα ελεύθερα κινούμενα αγώγιμα σωματίδια,
- Καλές ιδιότητες μόνωσης σε πρακτικές συνθήκες,
- Καλά χαρακτηριστικά ανάφλεξης του μονωτή,
- Καλά χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας,
- Καλή αποκατάσταση (ρυθμός αποκατάστασης τάσης) και να επανασυντίθεται από μόνο του,
- Να μην έχει δυσμενείς αντιδράσεις με την υγρασία και τις κοινές ακαθαρσίες, και
- Να μην έχει δυσμενή αποτελέσματα στον εξοπλισμό, ειδικά στους μονωτές και τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων.

Επίσης πρέπει να είναι διαθέσιμη κάποια γνώση σχετικά με τους μηχανισμούς των εκκενώσεων (κορώννα, διάσπαση, τόξο) και τη χαρακτηριστική συμπεριφορά των εκκενώσεων, και της αποσύνθεσής κάτω από ηλεκτρικό τόξο και τους διάφορους τύπους εκκενώσεων.

2.1.6. Η Τάση Διάσπασης των Αερίων Διηλεκτρικών

Λόγω της σημαντικής εξάρτησης της τάσης διάσπασης από τα διάκενα των ηλεκτροδίων δοκιμής, το σχήμα τους, και τις ανωμαλίες στην επιφάνεια τους, είναι γενικά αποδεκτό να συγκρίνονται οι διηλεκτρικές αντοχές των αερίων μονωτικών ή / και των αερίων μειγμάτων ως προς τις διηλεκτρικές αντοχές του αζώτου ή του SF₆ για το ίδιο πεδίο δοκιμών και τις ίδιες συνθήκες. Οι μέσες τιμές για την τάση διάσπασης διηλεκτρικών αερίων ή αερίων μειγμάτων συγκρινόμενες προς του SF₆ μπορεί να είναι ίδιες ή και υψηλότερες από ότι για το SF₆, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί. Όμως, το υψηλότερο σημείο ζέσεως (βρασμού) απαγορεύει στα αέρια αυτά να καλύπτουν τις βιομηχανικές εφαρμογές σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος όπως επιτυγχάνεται για το SF₆.

Πίνακας 2.1-2. Η τάση διάσπασης των αερίων διηλεκτρικών

ΑΕΡΙΟ	Τάση Διάσπασης (ως προς του SF ₆)	Σημείο Ζέσεως	
	%	°C	°F
Χλωροπενταφθοροαιθάνιο, CF ₃ CF ₂ Cl	114	-38.7	-37.7
Διοξείδιο του Θείου, SO ₂	102	-10.0	+14.0
Διχλωροδιφθορομεθάνιο, CCl ₂ F ₂	100	-29.8	-21.6
Εξαφθοριούχο Θείο, SF ₆	100	-63.9	-83.0

2.1.7. Αέρια Μείγματα

Λόγω του σχετικά υψηλού κόστους του SF₆, του υψηλού του σημείου ζέσεως σε σχέση με τα επιθυμητά όρια, της ευαισθησίας στις επιφανειακές ατέλειες των ηλεκτροδίων, αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του SF₆ στα φαινόμενα του θερμοκηπίου, έχει ξεκινήσει μια συνεχής έρευνα για εναλλακτικά διηλεκτρικά αέρια που θα παρέχουν ικανοποιητικά λειτουργικά αποτελέσματα. Καθώς κανένα αέριο από μόνο του δεν εμφανίζεται επαρκές να το αντικαταστήσει, η πρωταρχική εστίαση βρίσκεται στα αέρια μείγματα [EPRI Report EL.-2620, "Gases superior to SF₆ for insulation and interruption," 1982. 5 EPRI Report EL-2620 "Gases ect."]

Καθώς το SF₆ υγροποιείται πιο εύκολα από το άζωτο, η παρασκευή των μειγμάτων αυτών των δύο αερίων στις σωστές αναλογίες απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

Πίνακας 2.1-3 Ανηγμένες τιμές για τη τάση διάσπασης επιλεγμένων αερίων διηλεκτρικών και δυαδικών αερίων μειγμάτων του SF₆. (SF₆ = 100)

ΑΕΡΙΟ	ΧΗΜΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ	ΑΕΡΙΟ ΚΑΘΑΡΟ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΜΕΙΓΜΑ ΜΕ SF ₆		
			75%	50%	25%
Χλωροπενταφθοροαιθάνιο	CF ₃ CF ₂ Cl	114	111	108	104
Διοξείδιο του Θείου	SO ₂	102	111	116	108
Διχλωροδιφθορομεθάνιο	CCl ₂ F ₂	100	108	107	106
Εξαφθοροαιθάνιο	CF ₃ CF ₃	81	88	90	95
Χλωροτριφθορομεθάνιο	CClF ₃	58	78	88	95
Χλωροδιφθορομεθάνιο	CHClF ₂	43	84	92	97
Τετραφθοράνθρακας	CF ₄	42	63	78	89
Αέρας	N ₂ + O ₂	37	78	85	94
Άζωτο	N ₂	37	77	88	95
Διοξείδιο του Ανθρακα	CO ₂	32	65	80	91

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ομογενές πεδίο χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρόδια μία σφαίρα αλουμινίου ακτίνας 49mm και ένα επίπεδο ηλεκτρόδιο διαμέτρου 26 mm. Το διάκενο ήταν 5 mm και η πίεση 0.15 MPa με σύγχρονη επίδραση υπερπύκνωσης ακτινοβολίας.

2.1.8. Διηλεκτρική Σταθερά

Η διηλεκτρική σταθερά όλων των αερίων διηλεκτρικών θεωρείται γενικά ότι είναι 1.0, αν και οι τιμές είναι στην πραγματικότητα ελαφρώς υψηλότερες. Η διηλεκτρική σταθερά του SF₆, για παράδειγμα, αναφέρεται ως 1.002, ενώ για το άζωτο και τον τετραφθοράνθρακα η διηλεκτρική σταθερά είναι 1.0006.

Δεδομένου ότι το μόριο του SF₆ είναι μη πολικό, η διηλεκτρική του σταθερά δεν διαφοροποιείται σημαντικά με την συχνότητα. Όμως οι μεταβολές πίεσεως επιδρούν στην τιμή της διηλεκτρικής του σταθεράς. Για αύξηση της πίεσης στις 22 atm, η προσαύξηση της διηλεκτρικής του σταθεράς είναι περίπου 7%.

2.1.9. Αγωγή σωματίδια.

Η παρουσία ελεύθερων αγωγίμων σωματιδίων σ' ένα σύστημα με αέριο μονωτικό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διηλεκτρικής αντοχής και αστοχία του συστήματος. Για παράδειγμα, η διηλεκτρική αντοχή του SF₆ ενδέχεται να μειωθεί αισθητά ακόμη και σε υψηλές πιέσεις του αερίου, με τη παρουσία αγωγίμων σωματιδίων. Τα αγωγή σωματίδια μπορούν να εισαχθούν κατά την συναρμολόγηση του συστήματος ή μπορεί να παραχθούν από τριβή μεταξύ των εξαρτημάτων κατά την συναρμολόγηση τους. Αυτά τα σωματίδια μπορούν να αιωρηθούν υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, και να μεταφερθούν προς τον αγωγό ή να επικαθίσουν στους μονωτές οπότε μπορεί να προκληθεί διάσπαση για εφαρμοζόμενες τάσεις κατά πολύ χαμηλότερες από τις προβλεπόμενες των συστημάτων (χωρίς τη

παρουσία των σωματιδιακών ρύπων). Έχει αναφερθεί ότι 'παγίδες' σωματιδίων, που περιλαμβάνουν κοιλότητες με κολλώδες υλικό, προσφέρουν αποτελεσματική προστασία έναντι της σωματιδιακής ρύπανσης, αυξάνοντας την αξιοπιστία των συστημάτων GIS.

2.1.10. Υγρασία.

Είναι σημαντικό να διατηρείται η υγρασία του συστήματος κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο, που καθορίζεται με βάση την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της συμπύκνωσης των υδρατμών πάνω στους μονωτές που αυξάνει τα επιφανειακά ρεύματα διαρροής.

2.1.11. Τοξικότητα

Τα αέρια που είναι τοξικά για τον άνθρωπο και που είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά, ανεξάρτητα από το πόσο ελκυστικές μπορεί να εμφανίζονται οι ιδιότητές τους. Ο πίνακας 2.1-4 κατατάσσει τα μέγιστα επιτρεπτά όρια για την έκθεση των εργαζομένων σε επιλεγμένα αέρια όπως αυτά καθορίζονται από τον NIOSH.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1-4 Όρια έκθεσης εργαζομένων σε αέρια
(8 -ωρος έκθεση x μέγιστη επιτρεπτή συγκέντρωση)

ΑΕΡΙΟ	ppm (vol) @ 25°C, 760 mmHg
Διοξείδιο του Άνθρακα	5000
Εξαφθοριούχο Θείο	1000
Freons 12, 13, 14, 22, 115, 116	1000
Προπάνιο	1000
Κανονικό Εξάνιο	500
Διοξείδιο του Θείου	5

Πηγή: NIOSH

Έτσι το διοξείδιο του θείου είναι υψηλής τοξικότητας, ενώ το καθαρό SF₆ και το διχλωροδιφθορομεθάνιο είναι πολύ πιο ασφαλή σε χώρους εργασίας, αν και μέτρα προστασίας θα πρέπει να λαμβάνονται ακόμα και μ' αυτά τα αέρια. Τα μεγαλύτερο πρόβλημα της τοξικότητας, παρόλα αυτά, εμφανίζεται όταν τα αέρια αποσυντίθενται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών ή των ηλεκτρικών τόξων. Ενώ τα απλά αέρια, όπως είναι το άζωτο, δεν παρουσιάζουν κανένα πρόβλημα, τα πιο σύνθετα αέρια ενδέχεται να σχηματίσουν παραπροϊόντα κατά την αποσύνθεση (όπως πιθανόν να κάνουν και τα στερεά μονωτικά).

2.1.12. Θερμική και Χημική Σταθερότητα

Εκτός της χαμηλής τοξικότητας, τα διηλεκτρικά υλικά οφείλουν να είναι αδρανή, μη εύφλεκτα, και να είναι χημικά σταθερά για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Όλα τα διηλεκτρικά αέρια που περιγράφονται εδώ, εξαιρουμένων των αέριων υδρογονανθράκων, θεωρούνται ως αδρανή, μη εύφλεκτα και χημικά σταθερά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ατμοσφαιρική πίεση. Οι αέριοι υδρογονάνθρακες είναι από την φύση τους εύφλεκτοι. Για παράδειγμα, το σημείο καύσης σε αυτόκλειστο σύστημα για το προπάνιο και το κανονικό επτάνιο είναι -104°C και -4°C αντίστοιχα. Το υγρό προπάνιο χρησιμοποιείται ευρέως ως καύσιμο.

Για όλες τις χημικές ενώσεις υπάρχει ένα όριο θερμοκρασίας πέραν του οποίου δεν είναι πλέον χημικά σταθερές. Σε υψηλές θερμοκρασίες, ο ρυθμός αποσύνθεσης του ξηρού SF₆ που βρίσκεται σε επαφή με τα μέταλλα που συνήθως χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό φαίνεται στον πίνακα 2.1-5.

Πίνακας 2.1-5: Θερμοκρασιακή σταθερότητα επιλεγμένων κατασκευαστικών υλικών παρουσία του εξαφθοριούχου θείου

ΥΛΙΚΟ	ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ %/έτος	
	@ 200°C	@ 250°C
Αλουμίνιο	-	0.006
Χαλκός	0.18	1.4
Χάλυβας Πυριτίου (Silicon Steel)	0.005	0.01
Μαλακός Χάλυβας (Mild steel)	0.2	2

Οι ρυθμοί αποσύνθεσης αυξάνουν σημαντικά όσο αυξάνονται οι συγκεντρώσεις της υγρασίας και των άλλων προσμείξεων. Ένα χαρακτηριστικό του αζώτου είναι η χημική του σταθερότητα σε όλες τις θερμοκρασίες λειτουργίας στις οποίες μπορεί να εκτεθεί ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός. Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν από την 'Du Pont' καταδεικνύουν ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες, το Freon 116 (C₂F₆) εκδηλώνει καλύτερη θερμική σταθερότητα από ότι το SF₆. Παρόλα αυτά, και τα δύο αέρια εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένο ρυθμό σχηματισμού ιόντων φθορίου με την αύξηση της υγρασίας, και αυτός, είναι ο κυρίαρχος παράγοντας καθορισμού της θερμικής και ηλεκτρικής σταθερότητάς τους. Πρακτικά, υπάρχουν δυσκολίες στην καταμέτρηση της περιεκτικότητας της υγρασίας, δεδομένου ότι τα διαφορετικά όργανα μέτρησης ενδέχεται να οδηγήσουν και σε διαφορετικά αποτελέσματα. Τα παραγόμενα παραπροϊόντα μπορούν να επηρεάζουν την ευαισθησία των οργάνων μέτρησης σε διαφορετικό ποσοστό.

2.1.13. Θερμικές Ιδιότητες

Η δυνατότητα ψύξης ενός διηλεκτρικού αερίου εξαρτάται από την ειδική του θερμότητα, την ειδική θερμική του αγωγιμότητα, και τα χαρακτηριστικά απαγωγής θερμότητας στην εγκατάσταση στην οποία ευρίσκεται. Η ειδική θερμότητα -σε δεδομένη θερμοκρασία και πίεση- προσδιορίζεται από τη ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία κατά 1 βαθμό σε ποσότητα της ουσίας που αντιστοιχεί σε μοναδιαίο βάρος. Η θερμοκρασιακή μεταβολή μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται είτε υπό σταθερή πίεση είτε υπό σταθερό όγκο. Επειδή τα αέρια έχουν εξαιρετικά χαμηλές πυκνότητες σε σχέση με τις πυκνότητες των υγρών και των στερεών, οι τιμές της ειδικής θερμότητας δεν είναι συνήθως αρκετά υψηλές ώστε να επηρεάσουν σημαντικά την ικανότητα ψύξης των εγκαταστάσεων.

Η ειδική θερμική αγωγιμότητα προσδιορίζεται από τη ποσότητα θερμότητας που απάγεται στη μονάδα του χρόνου μέσα από μια μοναδιαία επιφάνεια του υλικού, όταν υπάρχει μοναδιαία διαφορά θερμοκρασίας σε μοναδιαίο πάχος της ουσίας. Η ειδική θερμική αγωγιμότητα ενός αερίου αυξάνεται με την θερμοκρασία και την πίεση. Στον πίνακα 2.1-6 αναγράφονται οι τιμές της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων αερίων διηλεκτρικών.

Πίνακας 2.1-6: Τιμές ειδικής θερμικής αγωγιμότητας των αερίων διηλεκτρικών (υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση)

	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	calories*/s/cm/ °C για 1 cm ²
Ήλιο (He)	26.7	360.4*10 ⁻⁶
Οξυγόνο (O ₂)	26.7	63.6*10 ⁻⁶
Αζωτο (N ₂)	26.7	62.4*10 ⁻⁶
Αέρας	26.7	62.2*10 ⁻⁶
διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	26.7	39.7*10 ⁻⁶
Εξαφθοροαιθάνιο (CF ₃ CF ₃)	25	36.5*10 ⁻⁶
Εξαφθοριούχο Θείο (SF ₆)	30	33.6*10 ⁻⁶
Χλωροπενταφθοροαιθάνιο, Freon 115 (CF ₃ CF ₂ Cl)	25	33.1*10 ⁻⁶
Χλωροδιφθορομεθάνιο, Freon 22, (CHClF ₂)	26.7	28.1*10 ⁻⁶
Διχλωροδιφθορομεθάνιο, Freon 12, Genetron 12 (CCl ₂ F ₂)	26.7	22.7*10 ⁻⁶
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	0	15.0*10 ⁻⁶

*μία θερμίδα (calorie) είναι η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται σε πίεση 1 atm προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 g νερού από τους 4 °C στους 5 °C (όπου το νερό έχει την μεγαλύτερη του πυκνότητα).

Τα χαρακτηριστικά της απαγωγής θερμότητας και οι μηχανισμοί ψύξης για τα αέρια, είναι δυνατόν να συσχετισθούν και μέσω του ιξώδους. Ο συντελεστής ιξώδους ενός υλικού ορίζεται από την επαπτομενική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που αναπτύσσεται πάνω στο κάθε ένα από τα δύο οριζόντια επίπεδα που απέχουν μοναδιαία απόσταση μεταξύ τους, και το ένα από αυτά παραμένει σταθερό ενώ το άλλο κινείται με μοναδιαία ταχύτητα, ενώ ο μεταξύ τους χώρος πληρούται με το υλικό της δοκιμής. Όσο μεγαλύτερος προκύπτει ο συντελεστής ιξώδους, τόσο δυσκολότερη αναμένεται να είναι και η απαγωγή θερμότητας για το συγκεκριμένο αέριο υλικό. Οι συντελεστές ιξώδους των αερίων αυξάνουν με την θερμοκρασία (ενώ μειώνονται για τα υγρά). Ενδεικτικές τιμές συντελεστών ιξώδους για επιλεγμένα αέρια φαίνονται στον πίνακα 2.1-7.

Πίνακας 2.1-7: Συντελεστές ιξώδους επιλεγμένων αερίων διηλεκτρικών (σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση)

	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	POISES*
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	20	125*10 ⁻⁶
Διχλωροδιφθορομεθάνιο, Freon 12, (CCl ₂ F ₂)	25	130*10 ⁻⁶
Χλωροδιφθορομεθάνιο, Freon 22 (CHClF ₂)	25	130*10 ⁻⁶
Χλωροπενταφθοροαιθάνιο, Freon 115 (CF ₃ CF ₂ Cl)	25	130*10 ⁻⁶
Διοξείδιο του Ανθρακα (CO ₂)	20	160*10 ⁻⁶
Εξαφθοριούχο Θείο (SF ₆)	25	161*10 ⁻⁶
Αέρας	20	181*10 ⁻⁶
Άζωτο (N ₂)	20	184*10 ⁻⁶
Ήλιο (He)	20	200*10 ⁻⁶
Οξυγόνο (O ₂)	20	206*10 ⁻⁶

*Ένα poise ισούται με 1 dyn.s/cm²

2.1.14. Κρίσιμες Σταθερές

Κάθε αέριο έχει την δική του κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από την οποία δεν μπορεί να υγροποιηθεί όσο και αν αυξηθεί η πίεση στην οποία ευρίσκεται. Η κρίσιμη πίεση ενός αερίου αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή πίεσης για την οποία μπορεί να υπάρξει ισορροπία φάσεων αερίου / υγρού στην κρίσιμη θερμοκρασία. Κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία, απαιτείται λιγότερη πίεση για να διατηρηθεί η ισορροπία αυτή. Ο πίνακας 2.1-8 παρουσιάζει ης κρίσιμες σταθερές για συγκεκριμένα αέρια διηλεκτρικά.

Πίνακας 2.1-8: Κρίσιμες σταθερές επιλεγμένων αερίων διηλεκτρικών

	ΚΡΙΣΙΜΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΚΡΙΣΙΜΗ ΠΙΕΣΗ
	C	atmospheres
Ήλιο (He)	-268.0	2.26
Άζωτο (N ₂)	-147.1	33.5
Αέρας	-140.7	32.2
Οξυγόνο (O ₂)	-118.4	50.1
Τετραφθοράνθρακας (CF ₄)	-45.7	37.0
Εξαφθοροαιθάνιο (CF ₃ CF ₃)	19.7	29.4
Χλωροτριφθορομεθάνιο (CClF ₃)	28.9	38.2
Διοξείδιο του Ανθρακα (CO ₂)	31.1	73.0
Εξαφθοριούχο Θείο (SF ₆)	45.6	37.2

Χλωροπενταφθοροαιθάνιο, Freon 115 (CF ₃ CF ₂ Cl)	80.0	30.8
Χλωροδιφθορομεθάνιο, (CHClF ₂)	96.0	49.1
Διχλωροδιφθορομεθάνιο, (CCl ₂ F ₂)	112.0	40.6
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	157.5	77.9

Πίνακας 2.1-9: Πιέσεις που απαιτούνται για να υγροποιηθεί το εξαφθοροαιθάνιο σε επιλεγμένες θερμοκρασίες

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (C)	ΠΙΕΣΗ	
	psi	atmospheres
-40.0	80	5.4
-28.9	125	8.5
-17.8	175	11.9
-6.7	240	16.3
4.4	300	20.4
15.6	400	27.2
19.7 (κρίσιμη)	432	29.4

Πηγή: Du Pont, Product Information Bulletin EL-15, "Freon" 116 Dielectric Gas.

2.1.15. Θερμοκρασία Ζέσεως

Η θερμοκρασία ζέσεως σε ατμοσφαιρική πίεση ενός αερίου διηλεκτρικού πρέπει να είναι χαμηλότερη από την ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να εκτεθεί ο εξοπλισμός που το εμπεριέχει. Διαφορετικά, είναι πιθανόν να υγροποιηθεί το αέριο όταν τεθεί υπό πίεση. (Υπενθυμίζεται ότι, το σημείο ζέσεως του αερίου αντιστοιχεί στη θερμοκρασία κατά την οποία η τάση ατμών της υγρής φάσης ισούται με την εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση). Ο πίνακας 2.1-10 περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες ζέσεως για επιλεγμένα αέρια με τιμές θερμοκρασίας από -10 °C και κάτω. Συνήθως οι διατάξεις με μόνωση αερίου είναι σχεδιασμένες ώστε να επιτρέπουν ως ελάχιστη θερμοκρασία τους -40 °C χωρίς βοηθητικά θερμαντικά στοιχεία. Θερμαντικά στοιχεία μπορεί να απαιτηθούν στους διακόπτες ισχύος για πίεση άνω των 5 atm.

Πίνακας 2.1-10: Θερμοκρασίες ζέσεως επιλεγμένων αερίων (σε ατμοσφαιρική πίεση)

Αέριο	Θερμοκρασία (C)
Ήλιο (He)	-269.8
Αζωτο (N ₂)	-195.8
Οξυγόνο (O ₂)	-183.0
Τετραφθοράνθρακας (CF ₄)	-128.0
Χλωροτριφθορομεθάνιο (CClF ₃)	-81.4
Διοξείδιο του Ανθρακα (εξάχνωση) (CO ₂)	-78.5
Εξαφθοροαιθάνιο (CF ₃ CF ₃)	-78.2
Εξαφθοριούχο Θείο (εξάχνωση) (SF ₆)	-63.9
Χλωροδιφθορομεθάνιο, (CHClF ₂)	-40.75
Χλωροπενταφθοροαιθάνιο, (CF ₃ CF ₂ Cl)	-38.7
Διχλωροδιφθορομεθάνιο, (CCl ₂ F ₂)	-29.8
Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	-10.0

2.1.16. Τα Πρότυπα ASTM για τα Αέρια Διηλεκτρικά

Ο οργανισμός 'American Society for Testing Materials' έχει αναπτύξει τα ακόλουθα πρότυπα δοκιμών για τα αέρια διηλεκτρικά.

- **D 1993**, Αέριο Άζωτο ως Ηλεκτρομονωτικό Υλικό. Οι προδιαγραφές αυτές καλύπτουν τρεις τύπους αζώτου που χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό:
Τύπος-I, παρασκευάζεται από τον αέρα με διαδικασίες υγροποίησης και ξήρανσης.
Τύπος-II, παρασκευάζεται από τον αέρα με διαδικασίες υγροποίησης, αφαίρεσης του οξυγόνου με υδρογόνο πάνω από καταλύτη λευκόχρυσου και ξήρανση.
Τύπος-III, παρασκευάζεται από τον αέρα με διαδικασίες υγροποίησης και, αν κριθεί απαραίτητο, αφαίρεσης του οξυγόνου με κατάλληλα μέσα.
- Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 2.1-11.
- **D 2472**, SF₆. Το εξαφθοριούχο θείο προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως μονωτικό υλικό οφείλει να πληροί τις απαιτήσεις του πίνακα 2.1-12. Επιπρόσθετα, οι κατασκευαστές θα πρέπει να δύνανται να πιστοποιήσουν ότι το υλικό είναι μη τοξικό, τουλάχιστον Κλάσης-VI ταξινόμησης UL (Underwriters Laboratories; www.ul.com).
 - **D 3283**, ο αέρας ως υλικό μόνωσης. Ο αέρας που χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό οφείλει να καλύπτει τις απαιτήσεις του πίνακα 2.1-13.

Πίνακας 2.1-11: Σύσταση και ιδιότητες του αζώτου που χρησιμοποιείται ως αέρια διηλεκτρικό (ASTM D 1933)

	ΤΥΠΟΣ I	ΤΥΠΟΣ II	ΤΥΠΟΣ III
Άζωτο και σπάνια αέρια, ελάχιστος όγκος %	99.8	98.998	99.993
Υδρογόνο, μέγιστος όγκος %	0.0	1.0	0.005
Οξυγόνο, μέγιστος όγκος %	0.2	0.002	0.002
Σημείο Δρόσου, μέγιστο (°C)	-55	-55	-60

Πίνακας 2.1-12: Απαιτήσεις για το εξαφθοριούχο θείο που χρησιμοποιείται ως αέριο διηλεκτρικό (ASTM D 2472)

	ΤΙΜΗ
Περιεκτικότητα σε νερό, μέγιστο σημείο δρόσου, (°C)	-45°
Υδροδιαλυτές φθοριούχες ενώσεις, εκφρασμένες ως οξύτητα HF, μέγιστο ppm κατά βάρος.	0.3
Αέρας, θεωρούμενος ως N ₂ , μέγιστο βάρος %	0.05
Τετραφθοράνθρακας, μέγιστο βάρος %	0.05
Μοριακό Βάρος	146 ± 2%
Περιεκτικότητα (Assay), ελάχιστη κατά βάρος %	99.8

* Αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα νερού 8.9 ppm κατά βάρος ή 71 ppm κατ' όγκο

Πίνακας 2.1-13: Σύσταση και ιδιότητες αέρος που χρησιμοποιείται ως αέριο διηλεκτρικό (ASTM D 3283)

	ΤΙΜΗ
Οξυγόνο, κατ' όγκο %	19 έως 23
Μονοξείδιο του Άνθρακα, μέγιστος όγκος %	0.0020
Διοξείδιο του Άνθρακα, μέγιστος όγκος %	0.010
Άζωτο	Ισορροπία
Σημείο Δρόσου, μέγιστο (°C)	-58

2.1.18. Βιβλιογραφία:

[1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2005.

[2] Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆, (NIST Technical Note 1425), L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, D.S. Green. November 1997.

Το Εξαφθοριούχο Θείο

2.2. Το Εξαφθοριούχο Θείο

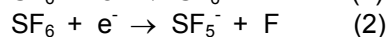
Το εξαφθοριούχο θείο είναι ένα ανθρωπογενές αέριο που έγινε εμπορικά διαθέσιμο το 1947. Είναι ένα από τα εκτενέστερα και πλέον μελετημένα πολυατομικά μοριακά αέρια λόγω των πολλών εμπορικών και ερευνητικών εφαρμογών του. Οι βασικές φυσικές και χημικές ιδιότητές του, η συμπεριφορά του σε διάφορους τύπους εκκενώσεων, και η χρήση του από τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ερευνηθεί ευρέως.

Στην κανονική μορφή του το SF₆, είναι χημικά αδρανές, μη τοξικό άφλεκτο, μη εκρηκτικό, και θερμικά σταθερό (δεν αποσυντίθεται στην αέρια φάση σε θερμοκρασίες μικρότερες από 500 °C). Το εξαφθοριούχο θείο παρουσιάζει πολλές ιδιότητες που το καθιστούν κατάλληλο για τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στη μετάδοση και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ένα ισχυρό ηλεκτροαρνητικό αέριο (δεσμεύει ηλεκτρόνια) σε θερμοκρασία δωματίου και σε θερμοκρασίες αρκετά παραπάνω από αυτή του περιβάλλοντος, κάτι που εξηγεί την υψηλή διηλεκτρική αντοχή και τις καλές ιδιότητες διακοπής του ηλεκτρικού τόξου. Η τάση διάσπασης του SF₆ είναι σχεδόν τρεις φορές υψηλότερη από αυτή του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση. Επιπλέον, έχει καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας και εύκολα ανασχηματίζεται όταν διασπάται σε συνθήκες υψηλής πίεσης από ηλεκτρικές εκκενώσεις ή τόξα (δηλ., έχει γρήγορη αποκατάσταση και είναι αυτοθεραπευόμενο). Τα περισσότερα από τα σταθερά παραπροϊόντα αποσύνθεσής του δεν υποβιβάζουν σημαντικά τη διηλεκτρική αντοχή του και μπορούν να αφαιρεθούν με φιλτράρισμα. Δεν παράγει κανέναν πολυμερισμό, άνθρακα, ή άλλες αγώγιμες εναποθέσεις κατά τη διάρκεια των τόξων, και είναι χημικά συμβατό με το περισσότερα στερεά μονωτικά και αγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρικό εξοπλισμό σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 200 °C.

Εκτός από τις καλές ιδιότητες μόνωσης και μεταφοράς θερμότητας, το SF₆ έχει σχετικά υψηλή πίεση όταν διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου. Απαιτείται μεγάλη πίεση για να υγροποιηθεί το SF₆ στους 21 °C με το σημείο βρασμού του είναι εύλογα χαμηλό, κάτι που του επιτρέπει να συμπιέζεται σε πιέσεις 400 kPa έως 600 kPa (4 έως 6 ατμόσφαιρες) μέσα στον εξοπλισμό με μόνωση SF₆. Υγροποιείται εύκολα με συμπίεση σε θερμοκρασία δωματίου ιδιότητα που επιτρέπει τη συμπαγή αποθήκευση σε κυλίνδρους αερίου. Δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα χειρισμού, είναι εύκολα διαθέσιμο, και μέχρι σήμερα έχει λογικό κόστος. Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει εξοικειωθεί με τη χρησιμοποίηση του SF₆ στον ηλεκτρικό εξοπλισμό.

2.2.1. Ηλεκτραρνητικότητα

Οι εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες του εξαφθοριούχου θείου οφείλονται στην ισχυρή ηλεκτραρνητικότητα (electron affinity) του μορίου του SF₆. Αυτό βασίζεται κυρίως σε δύο μηχανισμούς, την συντονισμένη δέσμευση ηλεκτρονίων και την δέσμευση των ηλεκτρονίων, σύμφωνα με τις κάτωθι εξισώσεις.

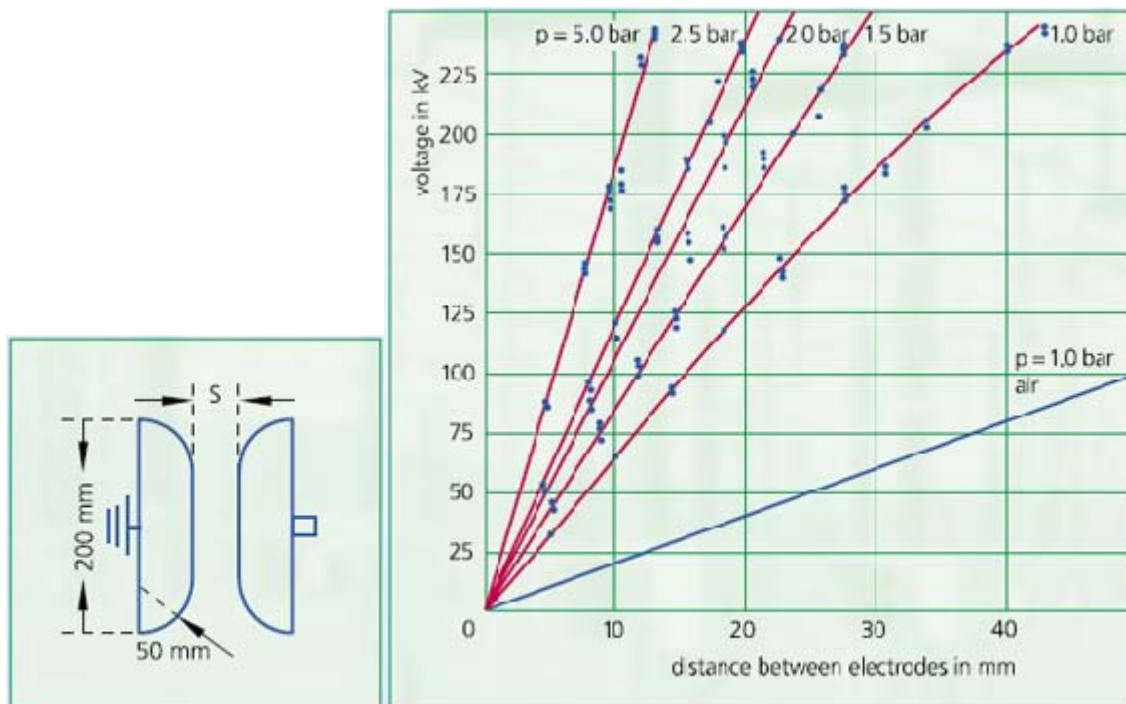


Η διαδικασία που παρουσιάζεται από την εξίσωση (1) ισχύει όταν η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι μεταξύ 0.1 eV και 0.05 eV. Η διαδικασία δε που παρουσιάζεται από την εξίσωση (2) ισχύει όταν η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι της τάξης του 0.1 eV.

2.2.2. Διηλεκτρική σταθερά

Η διηλεκτρική σταθερά του εξαφθοριούχου θείου έχει τιμή 1.0021 στους 20 °C, σε πίεση 1.0133 bar και σε συχνότητα 23.340 MHz. Αύξηση της πίεσης στα 20 bar οδηγεί σε αύξηση αυτής της τιμής περίπου 6 %.

Στους -50 °C η διηλεκτρική σταθερά του υγρού εξαφθοριούχου θείου σε όλη την κλίμακα από 10 έως 500 KHz παραμένει σταθερή με τιμή 1.81 ± 0.02



Σχήμα 2.2-1: Τάση διάσπασης AC 50 Hz του SF₆ σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων σε διάφορες πιέσεις.

2.2.3. Διηλεκτρική αντοχή

Η ισχυρή αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας με το πολυατομικό μόριο του SF₆ προκαλεί την ταχεία επιβράδυνση των ηλεκτρονίων σε χαμηλότερη ενέργεια δέσμησης των ηλεκτρονίων και την δέσμηση τους από τα μόρια του αερίου με τα οποία συγκρούονται. Έτσι η διάσπαση του εξαφθοριούχου θείου είναι πιθανή μόνο σε ισχυρά πεδία.

Η τάση διάσπασης υπό AC τάση συχνότητας 50 Hz και υπό πίεση 1 bar σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, είναι 2.5 έως 3 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή για τον αέρα ή το άζωτο (σχ. 2.2-1).

Στο σχήμα 2.2-2 βλέπουμε την σχέση μεταξύ της τάσης διάσπασης και της πίεσης σε ένα μη ομογενές ηλεκτρικό πεδίο συγκρίνοντας το SF₆ με μίγμα N₂/CO₂.

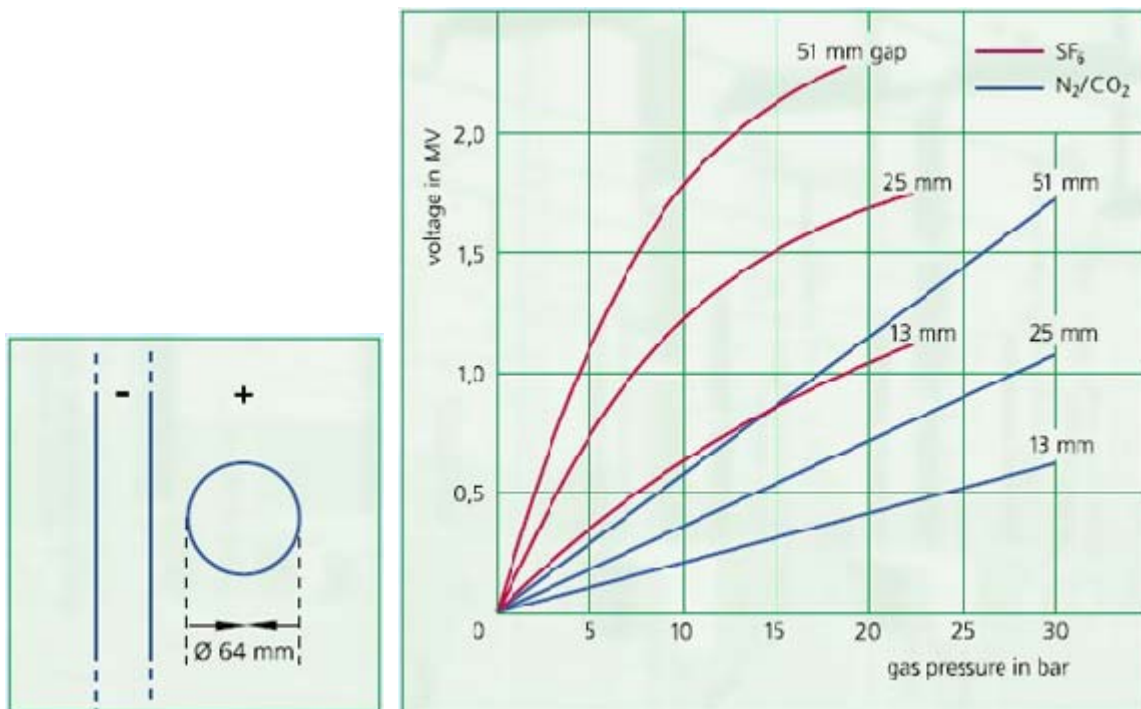
Η τάση διάσπασης του αέρα αυξάνεται δραματικά από την πρόσθεση σε αυτόν μικρής ποσότητας SF₆. Αντίθετα η πρόσθεση αέρα στο εξαφθοριούχο θείο έχει μικρή επίδραση στην τάση διάσπασης του εξαφθοριούχου θείου. Η πρόσθεση 10% αέρα κατά όγκο, μειώνει την τάση διάσπασης του SF₆ περίπου 3%, και η πρόσθεση 30% αέρα, την μειώνει περίπου 10%.

Η τάση διάσπασης του SF₆ φθάνει την τάση διάσπασης του λαδιού των μετασχηματιστών σε πίεση μόνο 3 bar (σχ. 2.2-3).

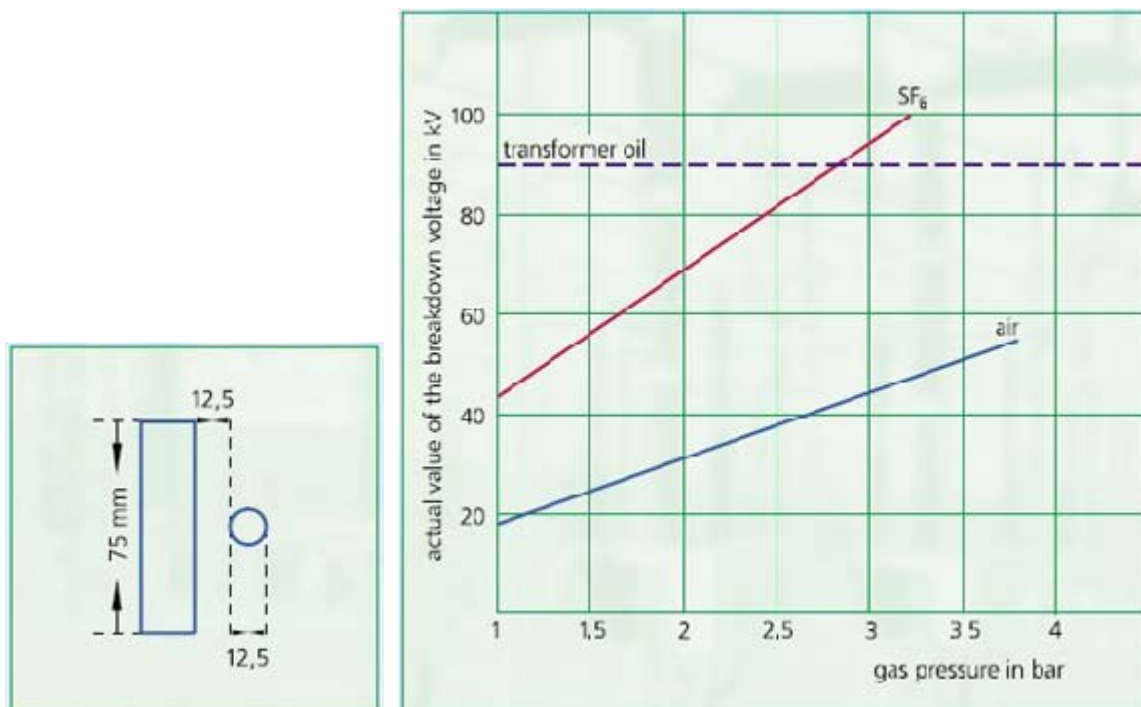
Η συμπεριφορά του εξαφθοριούχου θείου συμφωνεί σε μεγάλη κλίμακα πιέσεων, με τον νόμο του Paschen, αν και σε μεγαλύτερες πιέσεις έχουν παρατηρηθεί αποκλίσεις, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες.

Η διηλεκτρική αντοχή του SF₆ δεν επηρεάζεται από την αύξηση της συχνότητας οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μονωτικό μέσο σε συσκευές UHF.

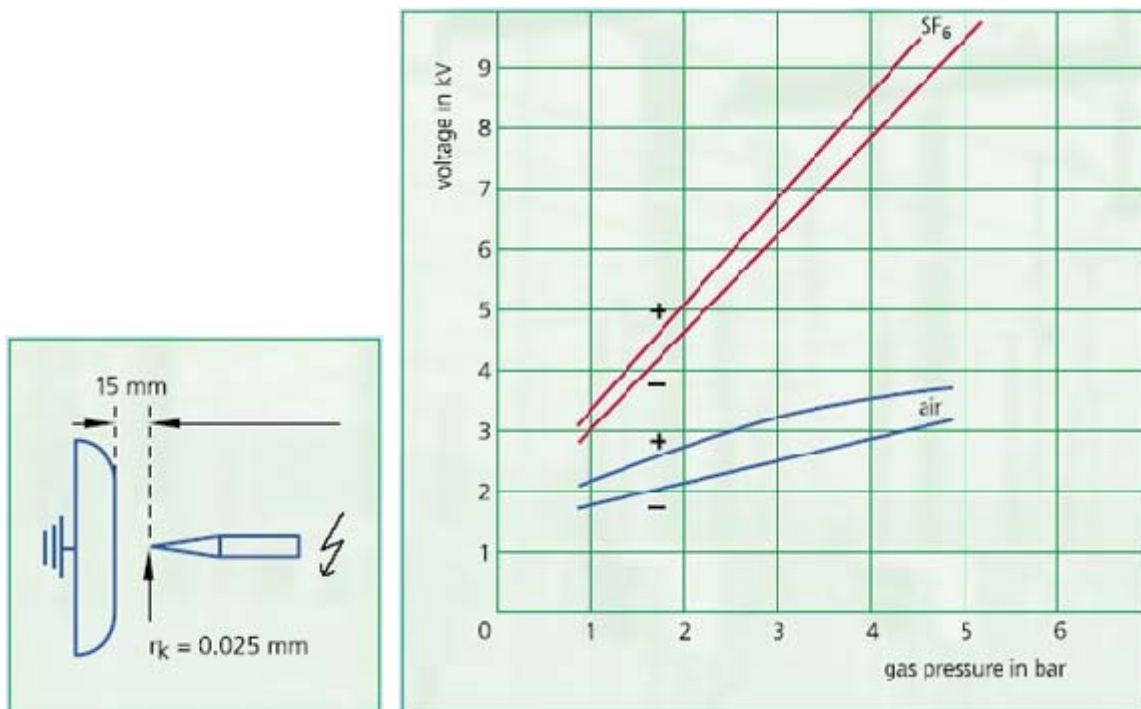
Η τάση έναρξης του φαινομένου Corona όταν χρησιμοποιούμε SF₆ σε μη ομογενές ηλεκτρικό πεδίο είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτήν του αέρα. Στα σχήματα 2.2-4 και 2.2-5 φαίνεται η σχέση της πίεσης και της γωνίας καμπυλότητας των ηλεκτροδίων για την περίπτωση του SF₆ και του αέρα σε σύστημα ηλεκτροδίων ακίδας-πλάκας.



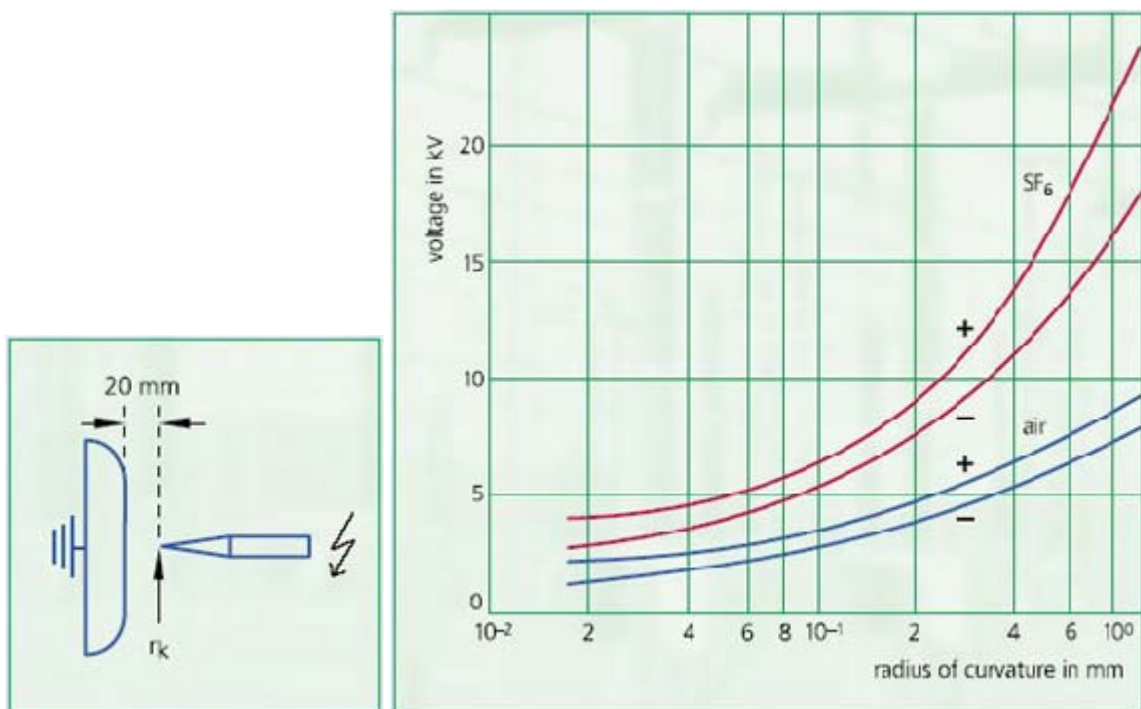
Σχήμα 2.2-2: Σχέση της τάσης διάσπασης με την πίεση. Σύγκριση του SF₆ και του μίγματος N₂/CO₂.



Σχήμα 2.2-3: Αντοχή στην διάσπαση του λαδιού των μετασχηματιστών, του αέρα και του SF₆ σε συνάρτηση με την πίεση του αερίου.



Σχήμα 2.2-4: Επίδραση της πίεσης στην τάση έναρξης του φαινομένου Corona στο SF₆ και τον αέρα.



Σχήμα 2.2-5: Τάση έναρξης φαινομένου Corona για το SF₆ και τον αέρα σαν συνάρτηση της ακτίνας καμπυλότητας r_k σε ατμοσφαιρική πίεση.

2.2.4. Ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου

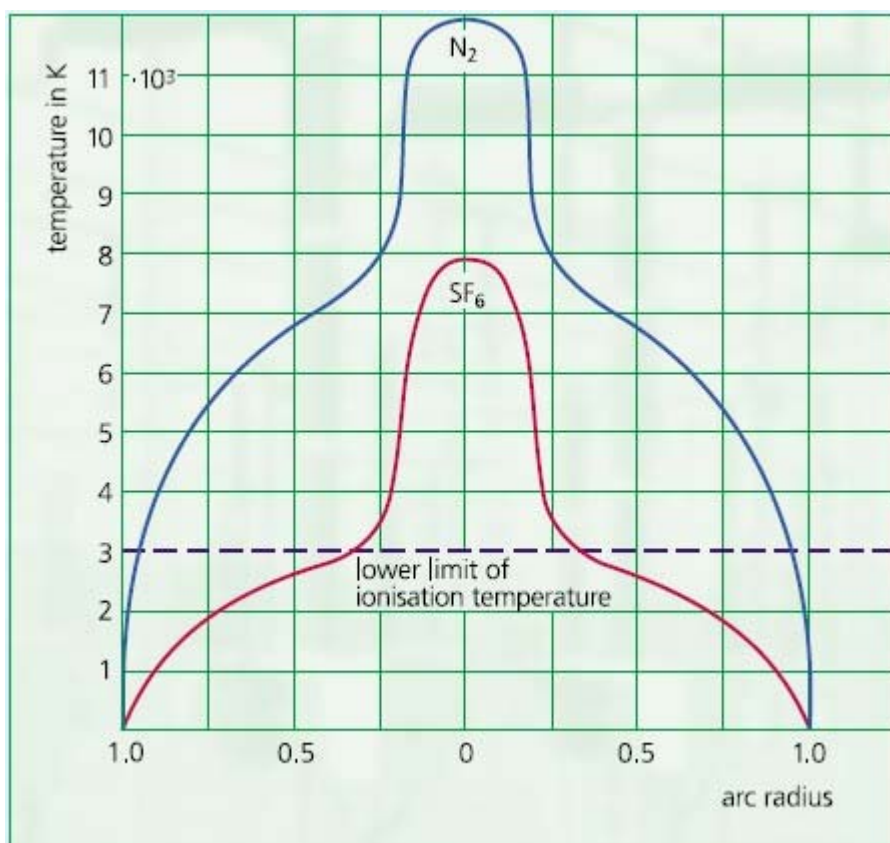
Λόγω των θερμικών ιδιοτήτων και της χαμηλής θερμοκρασίας ιονισμού, το εξαφθοριούχο θείο παρουσιάζει σημαντικά χαρακτηριστικά για την σβέση ηλεκτρικών τόξων (σχ. 2.2-6).

Με ίδιες όλες τις υπόλοιπες συνθήκες, ο χρόνος σβέσης τόξου με χρήση εξαφθοριούχου θείου, είναι σε σχέση με αυτόν του αέρα 100 φορές μικρότερος.

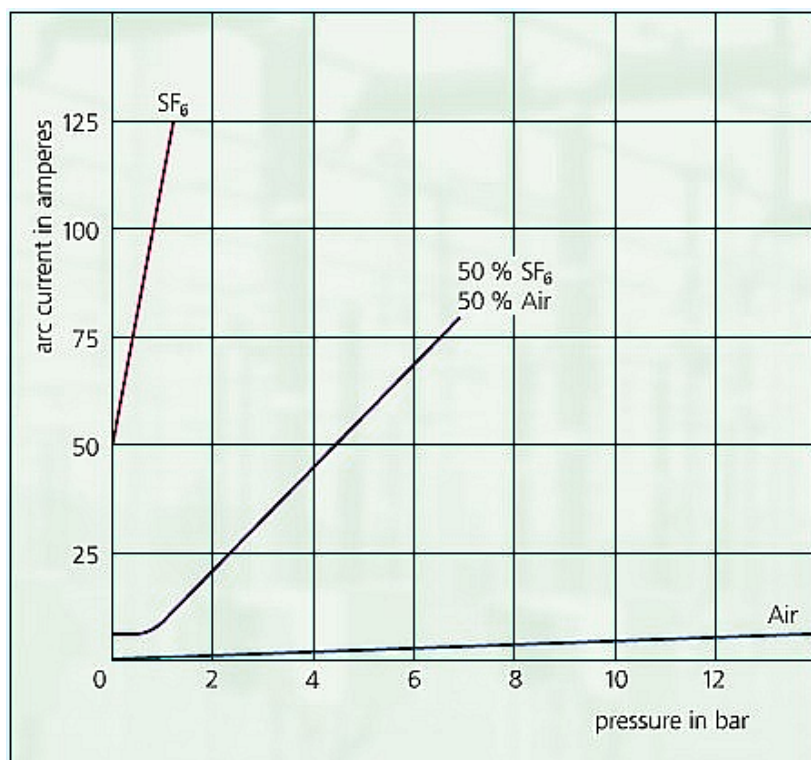
Η ανώτερη λειτουργία του εξαφθοριούχου θείου, στην σβέση τόξου, σε σύγκριση με άλλα αέρια παρουσιάζεται εντυπωσιακά στο σχήμα 2.2-7.

2.2.5. Συντελεστής απωλειών

Ο συντελεστής απωλειών του SF₆, εφ θ , είναι εξαιρετικά χαμηλός (λιγότερο από $2 \cdot 10^{-7}$). Συγκεκριμένα για υγρό SF₆ στους -50°C βρέθηκε να είναι λιγότερο από 10^{-3} .



Σχήμα 2.2-6: Καταγραφή ακτινικής θερμοκρασίας σε ηλεκτρικά τόξα SF₆ και N₂.



Σχήμα 2.2-7: Ικανότητα σβέσης του τόξου για το SF₆, τον αέρα και μίγμα των δύο αερίων.

2.2.6. Αέρια διηλεκτρικά με μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή.

Η αναζήτηση αερίων με μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή (Μεγαλύτερη του SF₆) έχει ξεκινήσει από την δεκαετία του 1980 από τον Χριστοφόρου. Το 1982 ο Brand διαπίστωσε ότι η αντοχή στην διάσπαση όπως το σημείο βρασμού και η τοξικότητα του αερίου, σχετίζονται με την ικανότητα πρόλωσης και την δυνατότητα ιονισμού των μορίων του αερίου. Εντούτοις τα αέρια με την καλύτερη διηλεκτρική αντοχή δεν είναι αυτά με την υψηλότερη δυνατότητα ιονισμού διότι η εξάρτηση από την πολικότητα είναι ισχυρότερη.

Η εξέταση μίας σειράς πιθανών υποψηφίων μορίων δείχνει ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί το απόλυτο όριο ($E_r = 6$), και ότι υπάρχει μικρή πιθανότητα εύρεσης κατάλληλων αερίων (unitary gases) με διηλεκτρική αντοχή πάνω από τρεις φορές από αυτή του SF₆. Αέρια με καλές ιδιότητες μόνωσης όπως το SF₆ ($E_r \sim 0,8$ έως $1,0$) είναι εξαιρέσεις σε σύγκριση με τον μέσο όρο όσον αφορά την ειδική μοριακή κατασκευή του αερίου.

2.2.7. Άλλες φυσικές ιδιότητες

Το SF₆ είναι ένα αέριο άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό και μη εύφλεκτο αέριο. Με μοριακό βάρος 146,05, το SF₆ είναι περίπου 5 φορές βαρύτερο από τον αέρα και ένα από τα βαρύτερα γνωστά αέρια.

2.2.7.1. Μηχανικά και θερμικά δεδομένα

Σημείο εξάχνωσης (1.0133 bar)	-63.9 °C			
Σημείο τήξης (2.26 bar)	-50.8 °C			
Πίεση ατμοποίησης	(Επόμενη σελίδα)			
Θέρμανση εξάχνωσης	153.2 kJ/kg			
Θέρμανση τήξης	34.37 kJ/kg			
Θέρμανση ατμοποίησης:				
Θερμοκρασία (°C)	-20	0	+20	+40
Θέρμανση ατμοποίησης (kJ/kg)	91.71	78.96	62.54	34.08
Κρίσιμα δεδομένα:				

Critical temperature	45.58°C
Κρίσιμη πίεση	37.59 bar
Κρίσιμη πυκνότητα	0.74 kg/l
Πυκνότητα	(σχ. 2.2-8 και 2.2-10)
Πυκνότητα αερίου (20 °C, 1 bar)	6.07 g/l
Πυκνότητα υγρού (0 °C, 12.65 bar)	1.56 kg/l
Πυκνότητα στερεού (-100 °C)	2.77 kg/l
Ιξώδες	(σχ. 2.2-11)
Θερμική αγωγιμότητα	(σχ. 2.2-12)
Ικανότητα μεταφοράς θερμοκρασίας	(σχ. 2.2-13)
Ταχύτητα του ήχου στο SF ₆ (0 °C, 1.0 bar)	129.06 m/sec.
Ισεντροπικός εκθέτης (K): Η δυναμική συμπίεστικότητα του SF ₆ είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με την Χαμηλή τιμή του ισεντροπικού εκθέτη.	K = 1.08 (30 °C, 1.0 bar)
Θέρμανση σχηματισμού (Δ H _B , 25 °C)*	-1221.58 ± 1.0 kJ / mol
Εντροπία αντίδρασης (Δ S _B , 25 °C)*	- 349.01 J/mol k

* Για τον σχηματισμό από ρομβικό θείο και αέριο φθόριο.

2.2.7.2. Διαλυτότητα

Διαλυτότητα στο νερό									
Όγκος αερίου διορθωμένος στους 0°C, 1.0133 bar									
Θερμοκρασία (°C)	5	10	15	20	25	30	40	50	
Διαλυτότητα (cm ³ SF ₆ /kg H ₂ O)	11.39	9.11	7.48	6.31	5.44	4.79	3.96	3.52	

Διαλυτότητα σε λάδι μετασχηματιστών

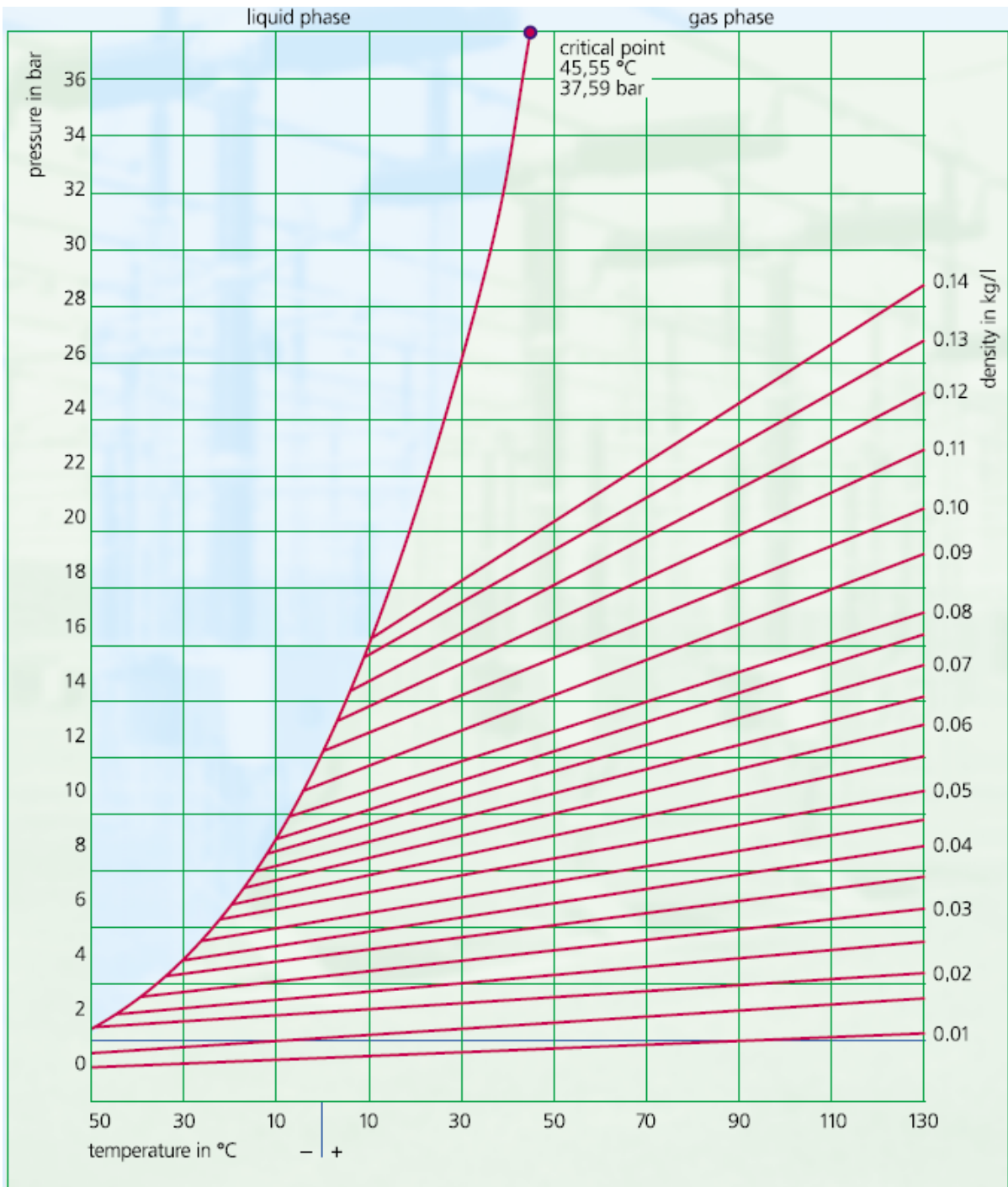
(Esso-Univolt 35)			
Όγκος αερίου στους 0°C, 1.0133 bar			
Θερμοκρασία (°C)	27	50	70
Διαλυτότητα (cm ³ SF ₆ / cm ³ λαδιού)	0.408	0.344	0.302

Ειδική θερμότητα (Cp)

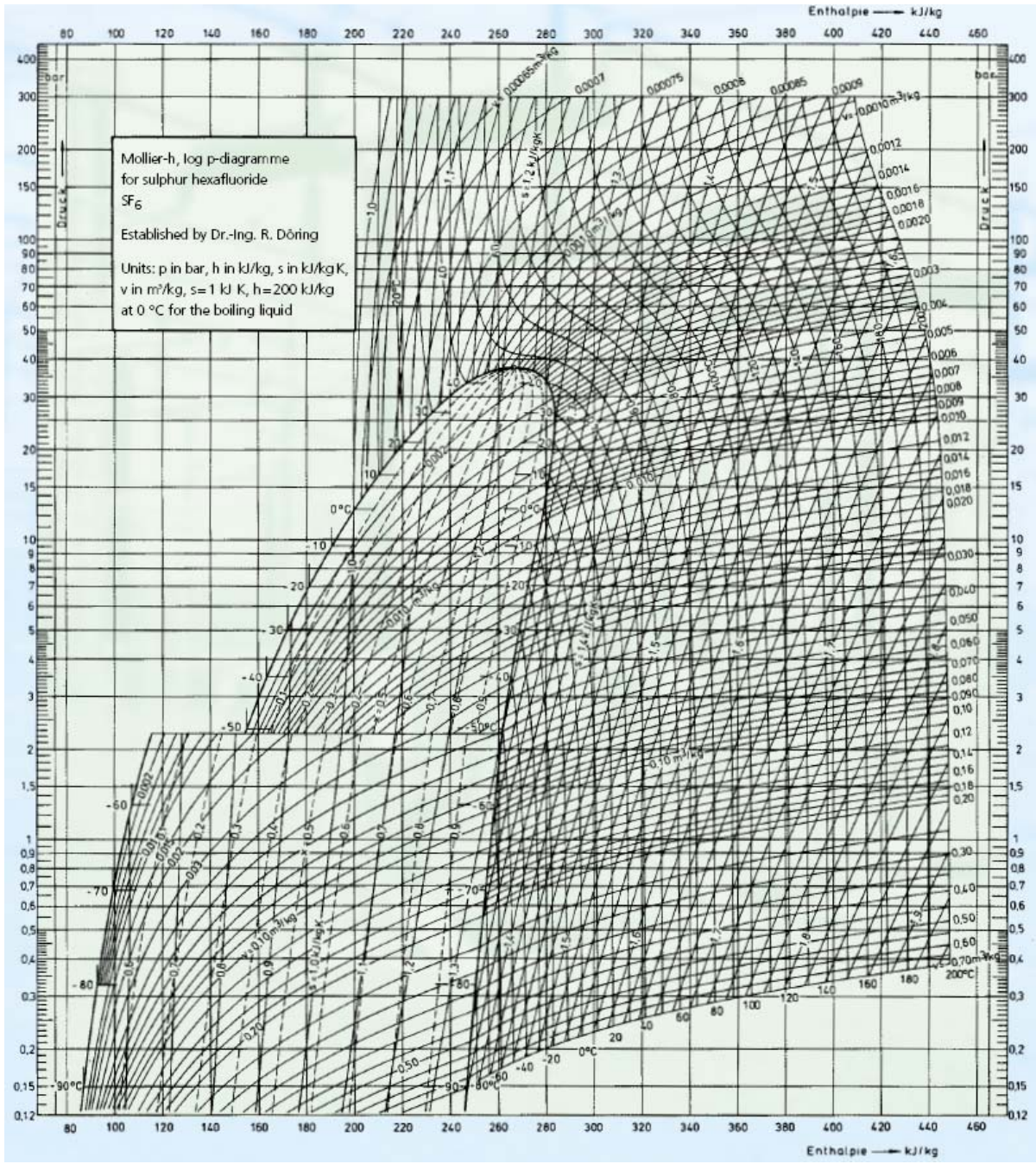
Στερεά και υγρή φάση											
Θερμοκρασία (K)		200	210	220	225	230					
Ειδική θερμότητα (J/mol K)		104.1	116.6	184.2	110.9	119.5					
		7	0	2	5	8					
Αέρια φάση (1 bar)											
Θερμοκρασία (K)	298	373	400	473	500	573	600	673	700	773	1273
Ειδική θερμότητα (J/mol K)	97.26	112.4	116.3	125.8	128.5	134.5	136.0	140.2	141.1	144.3	152.6
		5	9	9	4	1	7	1		5	2

Πίεση Ατμοποίησης

(σχ. 2.2-8)										
Θερμοκρασία (°C)	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5
Πίεση (bar)	2.34	2.87	3.49	4.20	5.02	5.95	7.01	8.19	9.52	11.01
Θερμοκρασία (°C)	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
Πίεση (bar)	12.65	14.47	16.47	18.67	21.08	23.72	26.62	29.79	33.27	37.13



Σχήμα 2.2-8: Καμπύλη πίεσης ατμοποίησης και γραμμές αντίστοιχης πυκνότητας του αερίου SF₆.

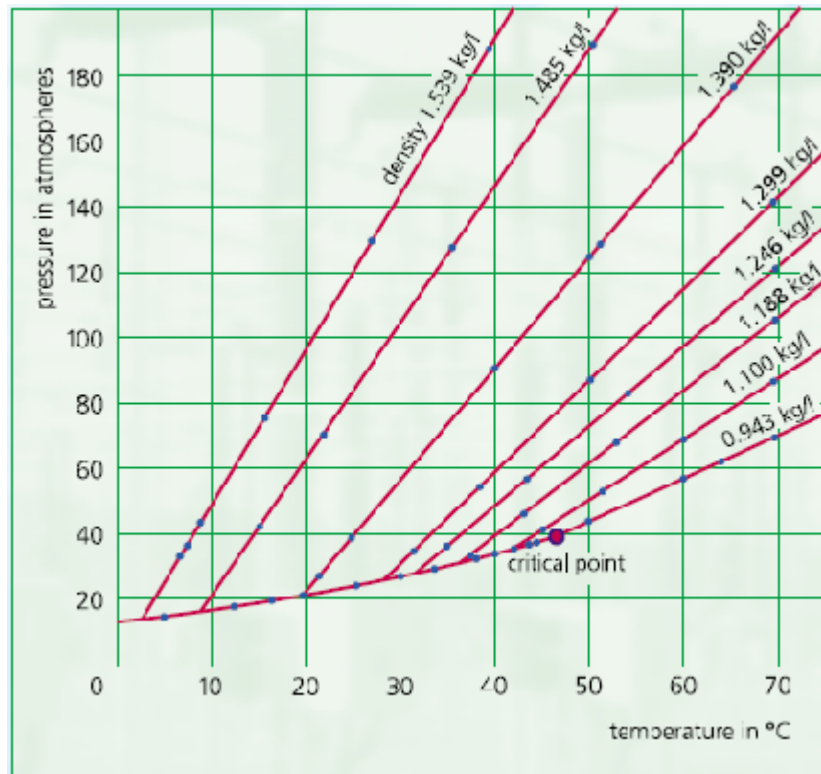


Σχήμα 2.2-9: Διάγραμμα Mollier-h, για το Εξαφθοριούχο Θείο.

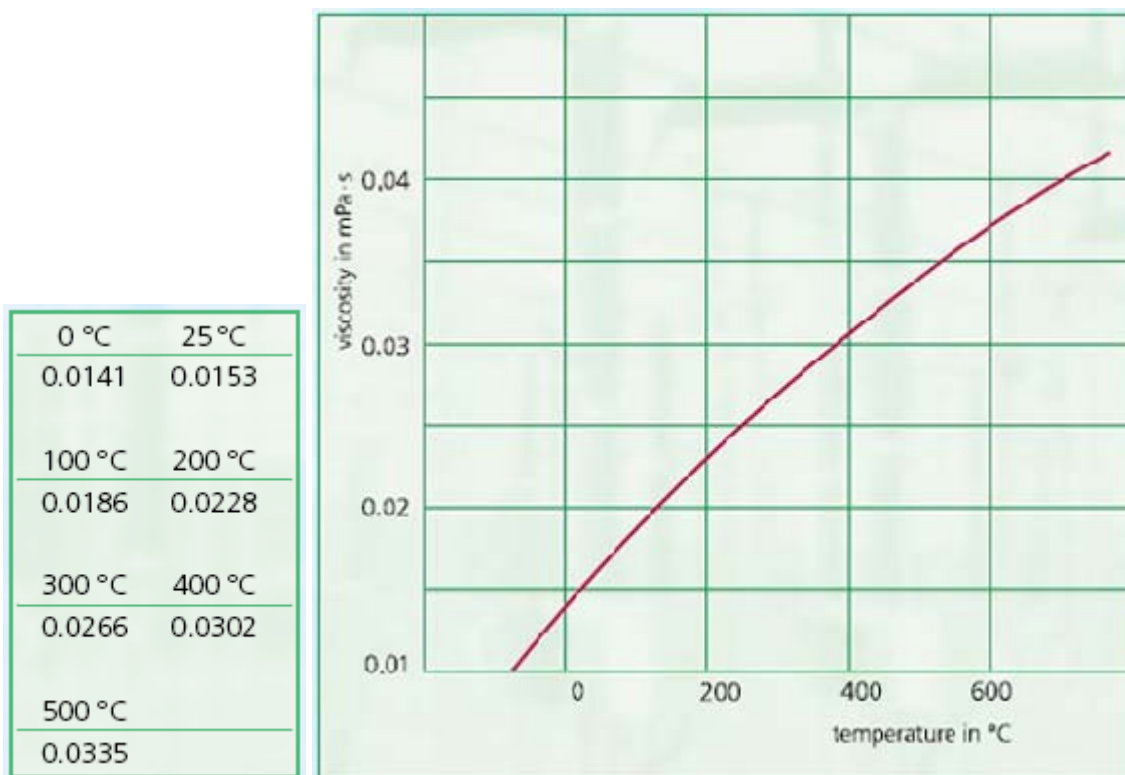
Πίνακας 2.2-1: Εσωτερική πίεση σε δεξαμενή SF₆ σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και την πυκνότητα (kg SF₆ / όγκο της δεξαμενής)

(Πίεση σε bar)

Πυκνότητα Kg/l	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
0.940										43.1	49.3	55.5	61.8	68.3
0.960										43.6	50.1	56.5	63.1	69.6
0.980										44.2	50.9	57.7	64.3	71.2
1.000										44.8	51.8	58.8	65.8	73.0
1.020										45.6	52.9	60.1	67.4	74.8
1.040										46.4	54.0	61.1	69.2	77.0
1.060										47.4	55.3	63.3	71.3	79.4
1.080										48.4	56.7	65.0	73.7	82.1
1.200										49.8	58.5	67.3	76.2	85.2
1.120								33.7	42.5	51.3	60.3	69.5	78.9	88.5
1.140								34.9	44.1	53.3	62.7	72.4	82.2	92.1
1.160								36.5	46.0	55.5	65.5	75.5	85.6	96.1
1.180								38.0	48.1	58.2	68.5	79.0	89.7	100.6
1.200								40.1	50.7	61.3	72.2	83.2	94.3	105.6
1.220								42.6	53.7	64.8	76.2	87.7	99.5	111.3
1.240								45.3	57.1	68.8	80.7	92.8	105.3	117.6
1.260								48.6	61.0	73.5	85.9	98.6	111.7	124.4
1.280						27.0	39.7	52.5	65.6	78.7	91.9	105.0	118.9	132.2
1.300						30.3	43.7	57.1	70.9	84.6	98.4	112.2	126.4	140.5
1.320						34.3	48.3	62.4	76.8	91.2	105.7	120.2	134.9	149.9
1.340						38.8	53.7	68.5	83.5	98.6	113.7	129.0	144.4	159.8
1.360						43.9	59.6	75.3	90.9	106.5	122.6	138.8	154.6	170.8
1.380						49.9	66.4	82.9	99.2	115.6	132.5	149.5	166.0	183.0
1.400				24.0	40.5	56.9	74.0	91.4	108.5	125.8	143.6	161.4	178.9	196.5
1.420				30.7	47.9	65.0	83.1	101.3	119.2	137.2	155.8	174.6	193.2	(211.8)
1.440			20.9	38.2	56.2	74.5	93.5	112.4	131.3	150.2	169.4	189.0	(209.2)	(229.5)
1.460			27.9	46.8	66.0	85.4	105.2	125.0	144.9	164.9	185.0	(205.4)	(226.7)	
1.480		16.4	36.5	56.7	77.1	97.6	118.2	139.1	160.2	181.4	(202.5)	(223.6)		
1.500		25.4	46.8	68.1	89.5	111.1	132.7	154.6	176.8	(199.1)				
1.520	(14.8)	36.8	59.0	81.3	103.8	126.4	149.2	172.1	(195.3)	(218.4)				
1.540	(27.5)	50.4	73.5	96.7	120.1	143.8	167.7	191.6	(215.6)	(239.5)				

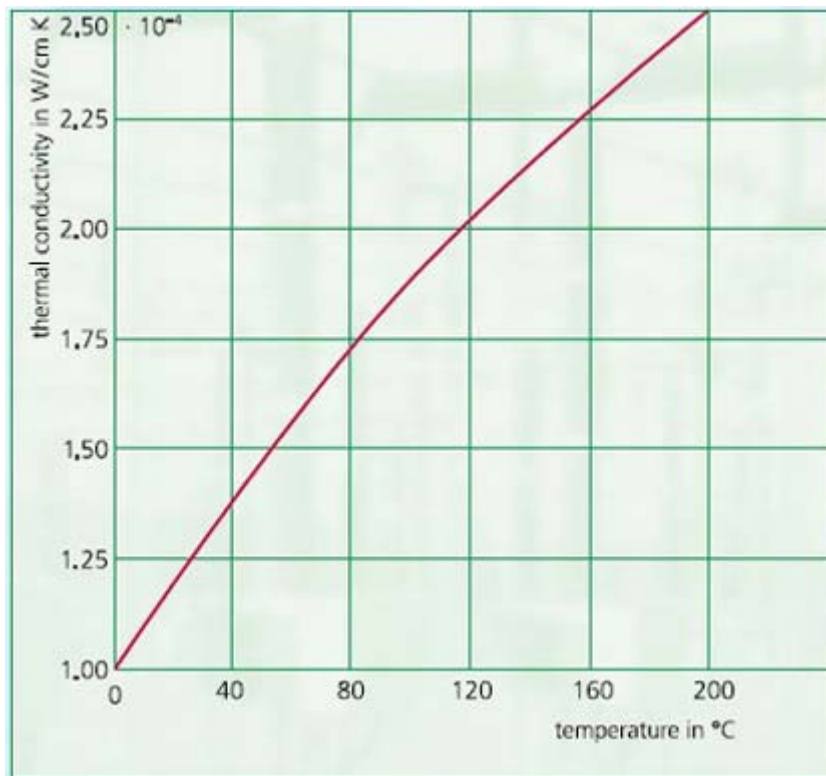


Σχήμα 2.2-10: Καμπύλες πίεσης / θερμοκρασίας του SF₆. (1at=0.9800665 bar)

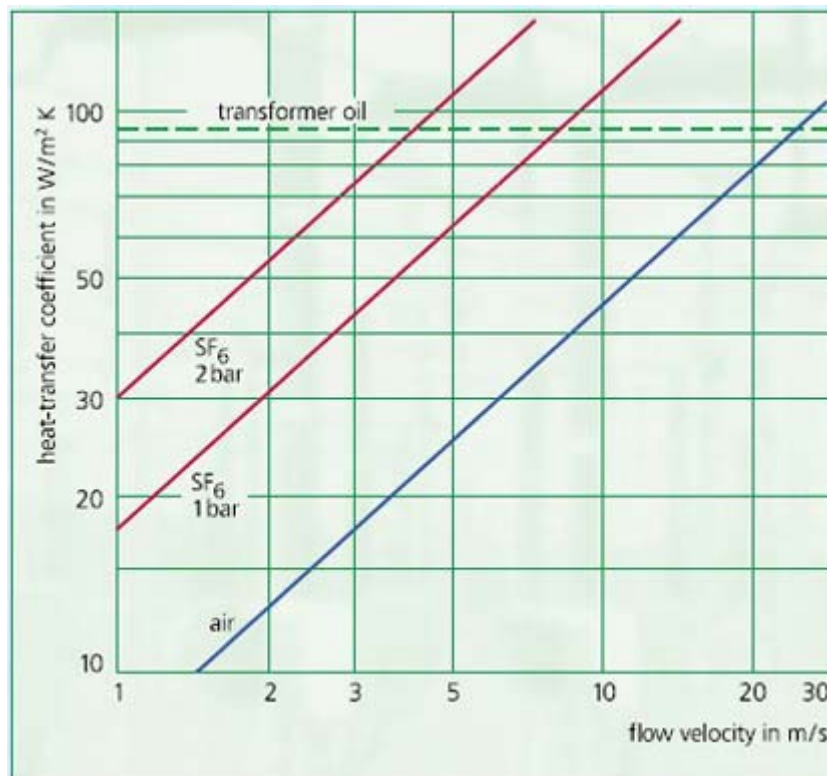


Σχήμα 2.2-11: Ιξώδες του SF₆ σε σχέση με την θερμοκρασία σε ατμοσφαιρική πίεση.

0 °C	25 °C
1.0	1.3
100 °C	200 °C
1.9	2.5
300 °C	400 °C
3.1	3.6
500 °C	
4.1	



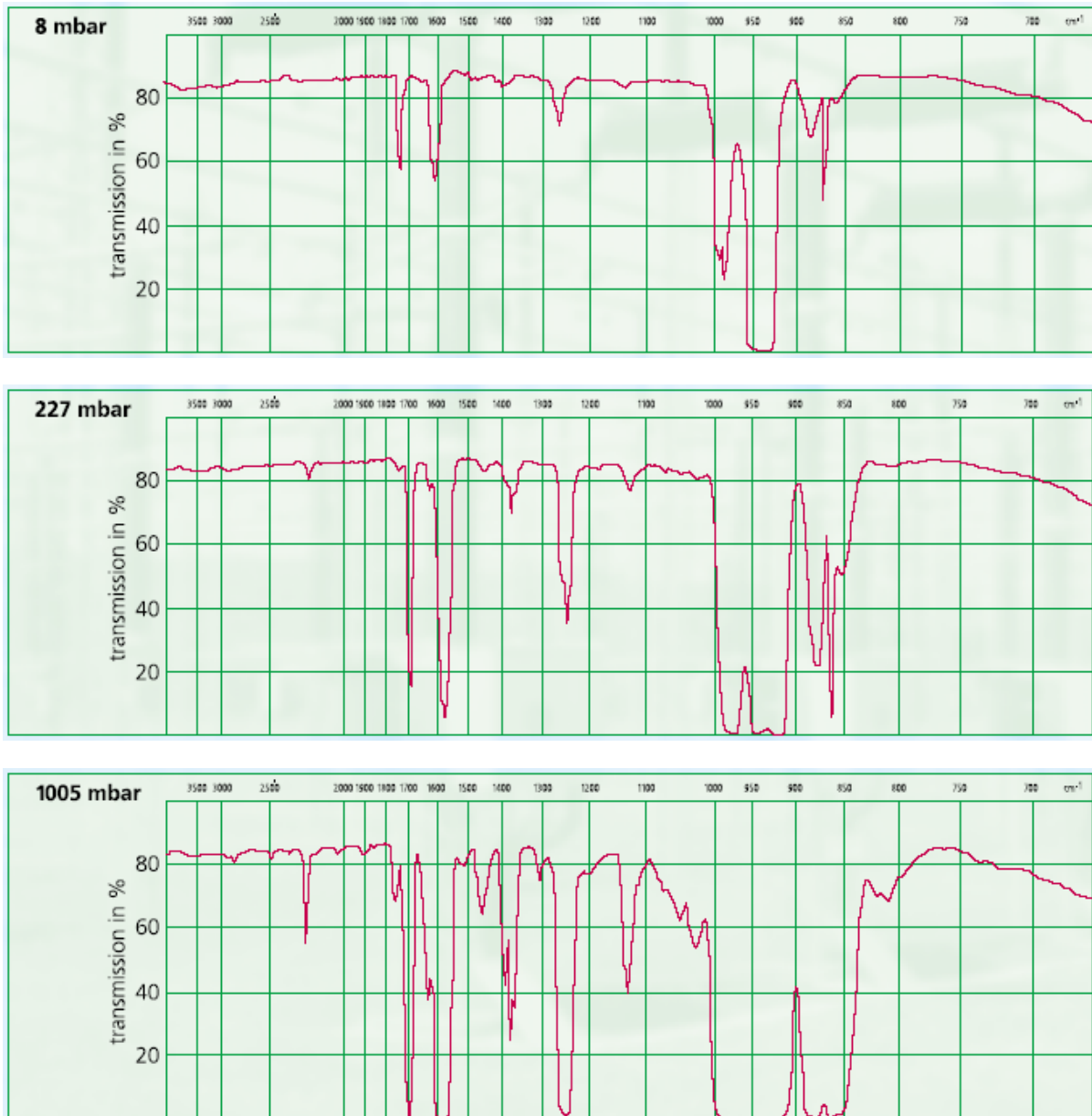
Σχήμα 2.2-12: Θερμική αγωγιμότητα του SF₆ σε ατμοσφαιρική πίεση.



Σχήμα 2.2-13: Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του αέρα και του SF₆ (συγκριτικά με το λάδι των μετασχηματιστών με ελεύθερη ροή).

2.2.7.3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Δείκτης διάθλασης $n_D(0^\circ\text{C})$ 1.0133 bar 1.000783



Σχήμα 2.2-14: Υπέρυθρο φάσμα του SF₆ καταγεγραμμένο για τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις (Leitz M 3, NaCl prism)

2.2.8. Χημεία

Το SF₆ παρασκευάζεται με την απευθείας αντίδραση ατμών θείου και φθορίου. Τα παραπροϊόντα απομακρύνονται με αντίδραση σε καυστικό συστατικό, ακολουθούμενη από θέρμανση στους 400 °C ούτως ώστε να διασπαστούν τα μεγάλα μόρια που περιλαμβάνουν θείο και φθόριο σε SF₄ και SF₆. Μια δεύτερη έκπλυση σε καυστικό συστατικό απομακρύνει το SF₄ αλλά όχι και το SF₆, το οποίο δεν αντιδρά. Κατόπιν το SF₆ διέρχεται από πύργο ξήρανσης παρουσία οξέων του θείου προκειμένου να απομακρυνθούν τα περιεχόμενα ίχνη υγρασίας, και να υγροποιηθεί ώστε να αποσταχθεί με υψηλό βαθμό καθαρότητας.

Το διχλωροδιφθορομεθάνιο παρασκευάζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Αντίδραση του τετραχλωράνθρακα με άνυδρο υδροφθόριο παρουσία καταλύτη αλογονούχου αντιμονίου.
- Χλωρίωση σε υψηλή θερμοκρασία του διφθοροαιθάνιου που παρασκευάζεται με προσθήκη υδροφθορίου στο ακετυλένιο

2.2.9. Συμβατότητα

Η συμβατότητα κατά τη χρήση μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης έχει μεγάλη σημασία στην λειτουργική απόδοση και τον καθορισμό της διάρκειας ζωής του συστήματος. Λόγω της συνέργειας πολλών παραγόντων, ένας σημαντικός παράγοντας που ενδιαφέρει άμεσα είναι η καθαρότητα του συστήματος, η αποφυγή της υγρασίας και ο περιορισμός των σωματιδιακών ρύπων. Γι' αυτό το λόγο, Τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά απόδοσης του κάθε εξαρτήματος δεν προσδιορίζουν πάντοτε με ακρίβεια και την συμπεριφορά της συνολικής εγκατάστασης στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, οι κατασκευαστές επιδιώκουν να εξασφαλίζουν υψηλό βαθμό συμβατότητας μεταξύ των επιλεγόμενων εξαρτημάτων, και στοχεύουν στη συναρμολόγηση του εξοπλισμού χωρίς την εισαγωγή υγρασίας ή άλλων ξένων σωματιδίων, προκειμένου να πληρούνται οι τελικές προδιαγραφές. Συνήθως αυτό δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για τις νέες εγκαταστάσεις GIS με καθαρό SF₆, καθώς το αέριο αυτό είναι χημικά αδρανές. Προβλήματα συμβατότητας υλικών αναμένεται να εμφανισθούν μόνο όταν το αέριο διασπασθεί λόγω ηλεκτρικών εκκενώσεων σε ενεργά παραπροϊόντα όπως είναι το υδροφθόριο και το ελεύθερο φθόριο.

2.2.10. Διαθεσιμότητα

Το SF₆, οι αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες και το άζωτο συνιστούν τα πλέον διαδεδομένα αέρια διηλεκτρικά και είναι άμεσα διαθέσιμα, από τουλάχιστον δύο πηγές το καθένα. Αν και η τιμή του SF₆ είναι υψηλή συγκρινόμενη με των περισσοτέρων αέριων διηλεκτρικών, το συνολικό κόστος στον εξοπλισμό που το εμπεριέχει είναι κατά 10% λιγότερο. Κυριαρχεί τεχνολογικά και παραμένει αναντικατάστατο για τις περισσότερες εφαρμογές.

2.2.11. Ποιότητες (Τύποι) του Αερίου

Μόνο τα αέρια με την χαμηλότερη δυνατή περιεκτικότητα υγρασίας είναι κατάλληλα ως αέρια διηλεκτρικά. Το εμπορικά διαθέσιμο SF₆ παρέχεται με τις ακόλουθες προδιαγραφές:

Σημείο δρόσου SF ₆	-60 C
Αέρας θεωρούμενος ως άζωτο, % κατά βάρος	0.04 μέγιστο
Οξύτητα HF, % κατά βάρος	0.00003 μέγιστο
CF ₄ , % κατά βάρος	0.04 μέγιστο
ορυκτέλαια, % κατά βάρος	0.0005 μέγιστο
Τοξικότητα	μη τοξικό
Οσμή	άοσμο
περιεκτικότητα % κατά βάρος (assay)	99.9 ελάχιστο

2.2.12. Βιβλιογραφία:

[1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2005.

[2] Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆, (NIST Technical Note 1425), L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, D.S. Green. November 1997.

[3] Sulphur Hexafluoride, Solvay Fluor und Derivate.

[4] SF₆ Switchgear H M Ryan & G R Jones, IEE Power Engineering Series 10.

Χρήσεις – Εφαρμογές του SF₆

2.3. Χρήσεις – Εφαρμογές του SF₆.

Περιοχές χρήσης του εξαφθοριούχου θείου.

2.3.1. Ηλεκτρική μηχανολογία

Η χρήση εξαφθοριούχου θείου στην θέση στερεών και υγρών μονωτών παρουσιάζει ένα αριθμό σημαντικών πλεονεκτημάτων, που είναι τα εξής:

Υψηλή διηλεκτρική αντοχή με χαμηλό κόστος.

Όταν το εξαφθοριούχο θείο βρίσκεται υπό πίεση, παρουσιάζει την ίδια διηλεκτρική αντοχή με τους υγρούς μονωτές. Εν τούτοις, το ανά μονάδα όγκου κόστος του εξαφθοριούχου θείου, είναι μόνο ένα κλάσμα του κόστους των υγρών διηλεκτρικών.

2.3.1.1. Ικανότητα αναγέννησης

Μετά από μία διάσπαση, το εξαφθοριούχο θείο αναγεννιέται. Η αρχική του αντοχή επανέρχεται στιγμιαία, και στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι ακόμα και ελαφρά βελτιωμένη.

2.3.1.2. Χαμηλή αύξηση της πίεσης στην περίπτωση διάσπασης

Λόγω του πολύ χαμηλού αδιαβατικού συντελεστού του εξαφθοριούχου θείου, η αύξηση της πίεσης σαν αποτέλεσμα θερμικής διαστολής που ακολουθεί την διηλεκτρική διάσπαση, είναι μικρότερη από αυτή που συμβαίνει σε άλλα αέρια, και κατά πολύ μικρότερη από αυτή που συμβαίνει σε υγρά διηλεκτρικά.



Σχήμα 2.3-1: Εγκατάσταση ΥΤ με μόνωση SF₆.

2.3.1.3. Μηχανισμοί Διακοπών Υψηλής Τάσης και Σταθμοί Διακοπών.

Οι εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες και η ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου του εξαφθοριούχου θείου επέτρεψαν την κατασκευή εντελώς νέων τύπων διακοπών υψηλής τάσης και σταθμών διακοπών με εξαιρετικά χαρακτηριστικά όπως συμπαγή κατασκευή που εξοικονομεί χώρο, χαμηλά επίπεδα θορύβου, προστασία από ατυχήματα τυχαίας επαφής με εξαρτήματα υπό τάση, προστασία από είσοδο σκόνης ή ξένων αντικειμένων μέσα από την μεταλλική επένδυση, και εξάλειψη του κινδύνου πυρκαγιάς.

Υπάρχει ζήτηση για υποσταθμούς που χρησιμοποιούν σαν μονωτικό υλικό εξαφθοριούχο θείο, εκεί όπου λόγω του περιορισμένου χώρου χρειάζεται συμπαγής κατασκευή. Αυτοί οι υποσταθμοί καταλαμβάνουν μόνο το 10 έως 15% του χώρου που απαιτούν οι συμβατικοί υποσταθμοί. Οι νέες μονάδες με πλήρωση SF₆ μπορούν να εγκατασταθούν σε σημεία διανομής σε πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου το κόστος γης θα ήταν απαγορευτικό για την χρησιμοποίηση συμβατικών μεθόδων.

Οι υποσταθμοί με μόνωση SF₆ που έχουν κατασκευαστεί για εξωτερικούς χώρους, λόγω του ότι δεν επηρεάζονται από την μόλυνση του περιβάλλοντος χρησιμοποιούνται σε χημικές βιομηχανίες, σε ερημικές περιοχές αλλά και σε παραθαλάσσιες περιοχές.

Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται το SF₆ σαν μέσο σβέσης του τόξου στους διακόπτες ισχύος των μονάδων αυτών.



Σχήμα 2.3-2: Σταθμός διακοπών ΥΤ με μόνωση αερίου 145kV. (Siemens, Germany)

2.3.1.4. Η χρήση του SF₆ στον υδροηλεκτρικό σταθμό του Itaipu στην Βραζιλία.

Το SF₆ χρησιμοποιείται στον μεγαλύτερο υδροηλεκτρικό σταθμό του κόσμου που βρίσκεται στο Itaipu της Βραζιλίας. Η ισχύς εξόδου του σταθμού αυτού είναι πραγματικά εντυπωσιακή. 18 τουρμπίνες παράγουν 12.6 δισεκατομμύρια watt, που ισοδυναμεί με την έξοδο ισχύος 10 πυρηνικών σταθμών. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα ξεπερνά τους 100 τόνους SF₆.



Σχήμα 2.3-3: Σταθμός διακοπών ΥΤ 550 kV με μόνωση SF₆ στον υδροηλεκτρικό σταθμό Itaipu στην Βραζιλία.

2.3.1.5. Γραμμές μεταφοράς με μόνωση αερίου GIL (Gas Insulated transmission Line).

Γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης με μόνωση αερίου όπως το SF₆ χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ισχύος. Συμβατικές κατασκευές GIL με πλήρωση SF₆ λειτουργούν με ασφάλεια και αξιοπιστία σε πολλά μέρη του κόσμου για πάνω από 20 χρόνια.

Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας σε σχέση με τα καλώδια υψηλών τάσεων, είναι η μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Τα GIL μπορούν να τοποθετηθούν σε χαντάκια και να σκεπαστούν με χώμα ή να τοποθετηθούν σε τούνελ όπου και είναι δυνατόν να επιθεωρούνται. Αποτελούν μία εφαρμόσιμη εναλλακτική πρόταση στην μεταφορά υψηλών τάσεων εντός πόλεων όπου η χρήση πυλώνων δεν είναι δυνατή ή τα καλώδια δεν μπορούν να καλύψουν την μεταφερόμενη ισχύ.

Για λόγους οικονομίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μίγμα εξαφθοριούχου θείου με άζωτο (SF₆/N₂) διότι δεν απαιτείται το μονωτικό αέριο να έχει την ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου. Αυτή η τεχνολογία αποτελεί μία ανταγωνιστική μέθοδο μεταφοράς ισχύος σε πλήθος εφαρμογών. Υπάρχει ένα φάσμα υπηρεσιών που περιλαμβάνει την αρχική παραγωγή μιγμάτων αερίων, έως τον διαχωρισμό τους μετά το πέρας του ορίου ζωής τους ή όποτε χρειαστεί.



Σχήμα 2.3-4: Γραμμές μεταφοράς με μίγμα SF₆ και N₂, σε τούνελ.

2.3.1.6. Διακόπτες Ισχύος Μέσης Τάσης.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας SF₆ και συγκεκριμένα η εξαιρετική ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου, βρίσκουν εφαρμογή στους διακόπτες ισχύος στην περιοχή τάσεων από 10 έως 40 kv. Οι διακόπτες αυτοί αντικαθιστούν συμβατικούς, διακόπτες με μικρή περιεκτικότητα λαδιού, και καλύπτουν απαιτήσεις μεγάλης ισχύος όπως σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων και επαναλαμβανόμενων διακοπών της παροχής υπό φορτίο.

Όμοια με τους διακόπτες υψηλών τάσεων, απαιτούν λίγη συντήρηση και είναι κατάλληλοι για περιοχές όπου οι διακόπτες λαδιού είναι ανεπιθύμητοι.



Σχήμα 2.3-5: Διακόπτης ισχύος MT με μόνωση SF₆ σε τοπικά δίκτυα και εγκαταστάσεις καταναλωτών MT.

2.3.1.7. Καλώδια υψηλής τάσης και σωληνοειδείς γραμμές μεταφοράς.

Πρόσφατα, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για τις εφαρμογές του εξαφθοριούχου θείου στην κατασκευή καλωδίων υψηλής τάσης με μόνωση αερίου και στην κατασκευή σωληνοειδών γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στην διανομή ισχύος σε πυκνοδομημένες βιομηχανικές περιοχές.

Σωληνοειδείς γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται επίσης για την σύνδεση σταθμών παραγωγής με μετασχηματιστές ή σταθμούς διακοπών, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση υπόγειων σταθμών παραγωγής.

Σωληνοειδείς γραμμές μεταφοράς με κατάλληλη διατομή πλήρωση εξαφθοριούχου θείου υπό πίεση, επιτρέπουν την διέλευση ασυνήθιστα υψηλών ρευμάτων. Σε σύγκριση με τις τιμές ρευμάτων που επιτυγχάνονται με τα καλώδια συμβατικού τύπου, οι τιμές του ρεύματος φόρτισης και διηλεκτρικών απωλειών, είναι ασήμαντες.

Οι σωληνοειδείς γραμμές μεταφοράς με μόνωση εξαφθοριούχου θείου, βρίσκουν εφαρμογή και σε συστήματα πομπών με συστήματα φέροντος υψηλής συχνότητας, όπου η ισχύς εξόδου έχει αυξηθεί έως δέκα φορές. Ένα πλεονέκτημα από την κατασκευαστική μεριά, είναι η ικανότητα κατασκευής σταθμών εκπομπής UHF υψηλής απόδοσης με σημαντικά μειωμένες διαστάσεις.

2.3.1.8. Μετασχηματιστές Υψηλών Τάσεων.

Η εξαιρετική ικανότητα του SF₆ να απάγει την θερμότητα, το ότι είναι άφλεκτο, και η μη τοξικότητα έχουν προάγει την χρήση του στους μετασχηματιστές υψηλών τάσεων. Λόγω της μεγάλης ασφάλειας χρήσης που έχουν τέτοιοι μετασχηματιστές, τοποθετούνται σε ορυχεία αλλά και σε πολυκαταστήματα. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μετασχηματιστών είναι ότι έχουν μικρότερο βάρος, συμπαγή κατασκευή και χαμηλά επίπεδα θορύβου.



Σχήμα 2.3-6: Μετασχηματιστής με μόνωση SF₆ 23-107 kV.

2.3.1.9. Άλλες Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων

Η χρήση του εξαφθοριούχου θείου έχει καθιερωθεί επίσης στην μόνωση υπέρ-γεννητριών τάσης σε επιταχυντές σωματιδίων όπως στους επιταχυντές Van de Graaf, τους Betatron, τις γεννήτριες νετρονίων, για εφαρμογές ακτινοβολίας σε επιστημονικές εγκαταστάσεις, στην ιατρική και την βιομηχανία.

Λόγω της υψηλής διηλεκτρικής αντοχής του αερίου, τα δοχεία πίεσης μπορούν να κατασκευαστούν με σημαντικά ελαφρύτερες μορφές. Η χρήση του εξαφθοριούχου θείου σε παλαιότερες μονάδες, που είχαν εγκατασταθεί στο παρελθόν και χρησιμοποιούσαν σαν μονωτικό αέριο μίγματα αέρα και διοξειδίου του άνθρακα, έχει σαν αποτέλεσμα μία αξιοσημείωτη αύξηση της αποδοτικότητας. Το SF₆ εκπληρώνει μία παρόμοια λειτουργία στους σταθεροποιητές τάσης των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων και των μηχανημάτων ακτίνων X, που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο παραγωγής και στους μη καταστροφικούς ελέγχους υλικών. Παράλληλα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας SF₆ στον τομέα των υψηλών τάσεων, έχουν επίσης παραχθεί τα όργανα μέτρησης υψηλών τάσεων και διακριβωμένες πηγές ισχύος με μόνωση SF₆. Πλήρωση SF₆ έχουν και μετασχηματιστές οργάνων, πυκνωτές πεπιεσμένου αερίου και αλεξικέραυνα (surge arrestors) που χρησιμοποιούνται στις εισόδους των υποσταθμών για προστασία από υπερτάσεις ή κεραυνούς.

2.3.2. Η χρήση του SF₆ στον επιταχυντή Vivitron.

Ο μεγαλύτερος ηλεκτροστατικός επιταχυντής στον κόσμο λειτουργεί στο Στρασβούργο. Χρησιμοποιώντας νέα τεχνολογία, αυτός ο επιταχυντής Vivitron τύπου Van de Graaf, έχει σχεδιαστεί να επιτυγχάνει δυναμικό επιτάχυνσης της τάξης των 35 εκατομμυρίων Volt. Έχει μήκος 51 m, μέγιστη διάμετρο 8,5 m και όγκο 1200 m³.

Για την παροχή SF₆ στον επιταχυντή, υπάρχουν δύο δεξαμενές αποθήκευσης του SF₆ με συνολική χωρητικότητα 60 tones.

2.3.3. Κατασκευή υαλοπινάκων με μόνωση.

Το εξαφθοριούχο θείο χρησιμοποιείται σε αυξανόμενες ποσότητες για την κατασκευή υαλοπινάκων με μόνωση αερίου (Διπλά τζάμια), για την επένδυση κτηρίων. Οι ανάγκη διατήρησης της ενέργειας και προστασίας από την ακτινοβολία, έχουν αυξήσει πάρα πολύ τις απαιτήσεις για τέτοια υλικά. Στην κατασκευή παραθύρων, έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα της θερμικής μόνωσης χρησιμοποιώντας τριπλούς υαλοπίνακες αλλά και με την επικάλυψη των διπλών υαλοπινάκων με φιλμ μετάλλων ή οξειδίων μετάλλων. Γεμίζοντας το κενό μεταξύ των υαλοπινάκων με SF₆ έχει σαν αποτέλεσμα την ακόμα παραπέρα βελτίωση της μόνωσης.



Σχήμα 2.3-7: Πάνελ υαλοπινάκων με SF₆.

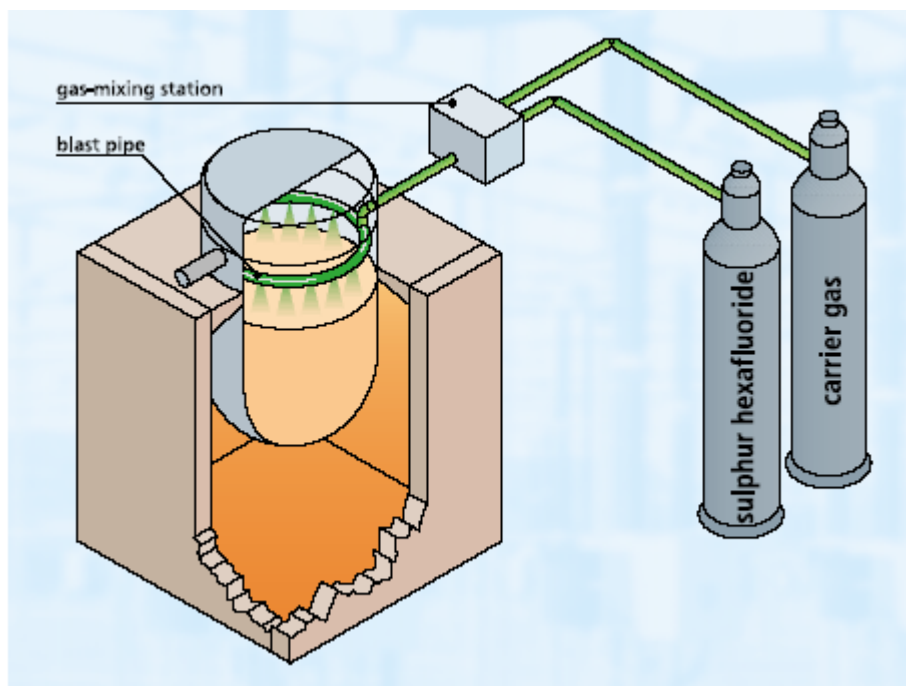
Η βελτίωση της ηχητικής μόνωσης με την αύξηση του κενού μεταξύ των υαλοπινάκων, ή με την αύξηση της διατομής του γυαλιού, συνήθως επιβάλλει την αλλαγή των διαστάσεων των πλαισίων του παραθύρου. Στην περίπτωση συμβατικών διπλών υαλοπινάκων, η εσωτερική πλήρωση με SF₆ προκαλεί βελτίωση έως και 8 db, ανάλογα με το σχήμα ή τα χρησιμοποιηθέντα υλικά. Από την στιγμή που το SF₆ είναι χημικά αδρανές, δεν υπάρχει κίνδυνος αντίδρασής του με το γυαλί, τα μέταλλα, ή το υλικό στεγανοποίησης. Ο δε συντελεστής διαπερατότητάς του είναι εξαιρετικά χαμηλός.

Το SF₆ έχει πολύ υψηλή καθαρότητα, και η θερμοκρασία υγροποίησής του, που είναι ασφαλώς κάτω από τους -40 °C, κυμαίνεται συνήθως γύρω στους -50 °C. Για να διατηρήσουμε την θερμοκρασία υγροποίησης όσο χαμηλότερα γίνεται, πρέπει να χρησιμοποιούνται μοριακά φίλτρα, με προτιμητέο μέγεθος 3Å αλλά όχι πάνω από 4Å.

2.3.4. Πρακτική χυτηρίων: μαγνήσιο.

Το μαγνήσιο είναι ένα ιδιαίτερα αντιδραστικό μέταλλο. Πρέπει επομένως να προστατευθεί ενάντια στην ανάφλεξη, την οξειδωση και το σχηματισμό νιτριδίων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας χύτευσης,

όπου μπορούν να εμφανιστούν θερμοκρασίες μέχρι 800 °C. Μέχρι τώρα, μόνο τα λειωμένα άλατα και το SO₂ ή το κονιοποιημένο θείο ήταν γνωστά ως προστατευτικά υλικά για αυτόν το λόγο. Αν και παρέχουν επαρκή προστασία, τέτοια υλικά έχουν τα καταστρεπτικά δευτερογενή αποτελέσματα, όπως η διάβρωση, η παραγωγή άσκημων μυρωδιών και την μόλυνση των τμημάτων του χυτηρίου από τα άλατα. Η χρήση του SF₆ ως προστατευτικό αέριο εξαφανίζει αυτά τα μειονεκτήματα. Σε αντίθεση με το καθαρό αργό, παραδείγματος χάριν, το SF₆ αποτρέπει την εξάτμιση του μαγνησίου με τη διαμόρφωση ενός λεπτού προστατευτικού στρώματος. Μόνο πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις του SF₆ είναι απαραίτητες επάνω από το λειωμένο μέταλλο να επιτύχουν αυτήν την επίδραση. Κατά κανόνα ένα κατάλληλο μίγμα αποτελείται από 0,04 έως 0,3 % SF₆ κατά όγκο και περισσότερο από 99 % κατά όγκο του μίγματος αερίου / CO₂ και κατανέμεται ομοιόμορφα την επιφάνεια του λειωμένου μετάλλου. Καθώς πρέπει να σχηματιστεί μόνο ένα πολύ λεπτό προστατευτικό στρώμα και το άχρηστο μέταλλο πρέπει να περιοριστεί στο ελάχιστο, γενικά χρησιμοποιείται μια αρχική ποσότητα 100 λίτρων του μίγματος αερίου ανά ώρα.



Σχήμα 2.3-8: Σχηματική αναπαράσταση φούρνου τήξης μαγνησίου.

Από την στιγμή που έχει αναφλεγεί το μέταλλο, η προκύπτουσα πυρκαγιά δεν μπορεί να σβήσει ακόμη και με την εισαγωγή υψηλών συγκεντρώσεων του SF₆. Λόγω του ότι χρησιμοποιούνται μόνο μικρές ποσότητες του SF₆, δεν προκύπτει κανένα πρόβλημα με τα προϊόντα αποσύνθεσης. Μετρήσεις που λήφθηκαν στην άμεση εγγύτητα των εγκαταστάσεων τήξης παρουσιάζουν μετρήσεις αρκετά κάτω από την τιμή TL όπου το HF = 3 ppm (2 mg/m³). Επομένως το SF₆ είναι ένα ιδανικό προστατευτικό αέριο για την τήξη του μαγνησίου από την άποψη και της λειτουργικής ασφάλειας και του σεβασμού του περιβάλλοντος.

2.3.5. Πρακτική χυτηρίων: αλουμίνιο

Ένα θεμελιώδες πρόβλημα στην παραγωγή χυτών εξαρτημάτων από αλουμίνιο είναι η πορώδης εμφάνιση που προκαλείται από την περιεκτικότητα υδρογόνου στο λειωμένο μέταλλο του αλουμινίου. Η πορώδης εμφάνιση που προκαλείται από την παρουσία υδρογόνου οδηγεί στην μείωση της αντοχής των εξαρτημάτων. Μια τέτοια επίδραση μπορεί να αποφευχθεί μόνο με την εκ των προτέρων επεξεργασία του λειωμένου μετάλλου του αλουμινίου.

Μέχρι τώρα, η επεξεργασία που πραγματοποιείται για τον καθαρισμό του λειωμένου μετάλλου αλουμινίου είχε διάφορα μειονεκτήματα. Η ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μέθοδος καθαρισμού είναι η εισαγωγή χλωρίου ή μιγμάτων χλωρίου και αδρανούς αερίου. Εντούτοις, η δραστηριότητα του στοιχειώδους χλωρίου σημαίνει ότι είναι απαραίτητες κατά τον χειρισμό ειδικές προφυλάξεις ασφάλειας. Επίσης η εισαγωγή καθαρών αδρανών αερίων όπως το αργό μειώνει την περιεκτικότητα σε υδρογόνο αλλά οδηγεί σε άλλες δυσκολίες εξ αιτίας της αφαίρεσης των αλκαλικών των μεταλλικών και στερεών αλκαλικών γαιών.

Η χρήση του εξαχλωροεθανίου με μορφή σκόνης ή ταμπλετών οδηγεί επίσης σε προβλήματα, εφόσον, όταν χρησιμοποιείται, απελευθερώνεται χλώριο. Η χρήση των μεθόδων καθαρισμού με φθορουδρογονάνθρακες θα τερματισθεί εξ ολοκλήρου στο μέλλον εξ αιτίας της πιθανής επίδρασης τους στο στρώμα του όζοντος.



Σχήμα 2.3-9: Τομές χυτού αλουμινίου με ή χωρίς επεξεργασία SF₆.

Το εξαφθοριούχο θείο ανοίγει μια απολύτως νέα τεχνική καθαρισμού στη βιομηχανία αλουμινίου για την τήξη του μετάλλου αλουμινίου. Η εισαγωγή των μιγμάτων SF₆ / με αδρανές-αέριο στο υγρό αλουμίνιο μειώνουν σημαντικά την περιεκτικότητα σε υδρογόνο και οδηγούν συγχρόνως στην αφαίρεση των οξειδίων και των στερεών μολυσματικών παραγόντων. Ο χειρισμός των μιγμάτων αερίου με SF₆ δεν παρουσιάζουν κανένα πρόβλημα και το SF₆ αναγνωρίζεται γενικά ως φυσιολογικά ασφαλές. Η εισαγωγή του SF₆ επομένως όχι μόνο βελτιώνει την ποιότητα των προϊόντων αλλά επίσης βελτιώνει τις συνθήκες εργασίας.

2.3.6. Άλλοι τομείς εφαρμογών

Ακόμη και στα χαμηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης, το εξαφθοριούχο θείου ανιχνεύεται από τους σύγχρονους ανιχνευτές διαρροών αλογόνων. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σαν ένα αέριο δοκιμής για την ανίχνευση διαρροών στους λέβητες, στις δεξαμενές καυσίμων, στις συσκευές που λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα, στα συστήματα σωληνώσεων, στις πλαστικές σωληνώσεις, σε δοχεία για τη μεταφορά ραδιενεργών υλικών και πολλών άλλων δοχείων.

Με την πραγματοποίηση μιας βαθμολογημένης διαρροής, οι ποσοτικές μετρήσεις είναι επίσης δυνατές. Με τις αυξανόμενες απαιτήσεις που επιβάλλονται από τα αυστηρότερα από ποτέ πρότυπα προστασίας του περιβάλλοντος, της ασφάλειας εργασίας και της εξοικονόμησης ενέργειας, αυτή η τεχνική κερδίζει σταθερά σημασία. Οι διανομές του χρόνου παραμονής στις συγκεντρώσεις υψηλής-ταχύτητας-ροής μπορούν να καθοριστούν χρησιμοποιώντας SF_6 . Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται πρώτιστα σε εκείνες τις περιπτώσεις όπου μια ραδιομετρική μέθοδος δεν μπορεί να υιοθετηθεί.

Εξ αιτίας του πολύ χαμηλού ορίου ανίχνευσής του, το SF_6 χρησιμοποιείται ως αέριο ανίχνευσης για τις μετεωρολογικές μετρήσεις. Όταν προστίθεται σε μετρημένες ποσότητες σε μια πηγή εκπομπής, η διανομή των εκπεμπόμενων ουσιών μπορεί να καθοριστεί ακόμη και σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις. Η υψηλή σταθερότητά του και η χαμηλή διαλυτότητα του SF_6 στο νερό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα από αυτή την άποψη.

Το SF_6 επίσης χρησιμοποιείται ευρέως στην ιατρική τεχνολογία. Παραδείγματος χάριν ως μέσον αντίθεσης στις υπερηχητικές εξετάσεις καθώς επίσης και στην οφθαλμολογία, την πνευμονεκτομή και τις ασθένειες του μέσου ου, π.χ. μεταχειρίζεται την απώλεια ακοής στις μολύνσεις του μέσου αυτιού.

Επίσης οι χρήσεις του SF_6 περιλαμβάνουν την επεξεργασία ημιαγωγών, τις αεροσόλες των υποδημάτων, τον εξοπλισμό καταδύσεων, την χρήση για τον περιορισμό του θορύβου της προπέλας των τορπιλών, τα τούνελ υπερηχητικών δοκιμών, και την μόνωση υψηλών τάσεων στα Radar των AWACS και στις συσκευές ακτίνων Χ.

2.3.7. Βιβλιογραφία:

[1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2005.

[2] Sulphur Hexafluoride, Solvay Fluor und Derivate.

[3] Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF_6 , (NIST Technical Note 1425), L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, D.S. Green. November 1997.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

2.4. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

2.4.1. Εισαγωγή

Το εξαφθοριούχο θείο (SF_6) είναι ένα αέριο κατασκευασμένο από τον άνθρωπο (ανθρωπογενές αέριο). Είναι ένα από τα πλέον εκτεταμένα και σε βάθος μελετηθέντα μοριακά αέρια στις μέρες μας κυρίως λόγω των πολλών εμπορικών και ερευνητικών εφαρμογών του. Λόγω της σχετικής αδράνειάς του, και των μη τοξικών χαρακτηριστικών του, γενικά θεωρείται ότι είναι ένα περιβαλλοντικά ασφαλές και αποδεκτό υλικό, κατά την έννοια του ότι δεν αντιδρά δυσμενώς με την βιομάζα. Η κύρια χρήση του SF_6 γίνεται από την βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας. Το εξαφθοριούχο θείο εμφανίζει πολλές ιδιότητες που το κάνουν κατάλληλο για συσκευές που χρησιμοποιούνται στην μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει εξοικειωθεί και έχει εμπειρία στην χρήση του SF_6 στις ηλεκτρικές συσκευές.

Εντούτοις το SF_6 έχει μερικές ανεπιθύμητες ιδιότητες τις εξής:

- Σχηματίζει υψηλά τοξικές και διαβρωτικές ενώσεις όταν υποβάλλεται σε ηλεκτρικές εκκενώσεις.
- Μη πολικά ξένα στοιχεία όπως για παράδειγμα ο αέρας ή το CF_4 , δεν αφαιρούνται εύκολα από αυτό.
- Η τάση διάσπασής του επηρεάζεται από την παρουσία ατμών νερού.
- Επηρεάζεται από αγωγιμα σωματίδια, και από την τραχύτητα της επιφάνειας των επαφών.
- Παρουσιάζει μη ιδανική συμπεριφορά αερίου στις χαμηλότερες θερμοκρασίες που συναντώνται στο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα σε ψυχρές κλιματικές συνθήκες (περίπου $-50\text{ }^\circ\text{C}$), το SF_6 μερικώς υγροποιείται.

2.4.2. Βασικές χρήσεις του SF_6 από την βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας.

Το εξαφθοριούχο θείο είναι το αέριο που προτιμά η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας για ηλεκτρική μόνωση και ειδικά, για την σβέση του ηλεκτρικού τόξου στα μηχανήματα διακοπής ρεύματος που χρησιμοποιούνται στην μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Γενικά, υπάρχουν τέσσερις σημαντικότεροι τύποι ηλεκτρικών μηχανημάτων όπου χρησιμοποιείται το SF_6 για ηλεκτρική μόνωση και/ή για σκοπούς διακοπής ρεύματος, όπως είναι:

Circuit breakers με μόνωση αερίου, γραμμές μεταφοράς με μόνωση αερίου, μετασχηματιστές με μόνωση αερίου, και υποσταθμοί με μόνωση αερίου (GIS).

Υπολογίζεται ότι για αυτές τις εφαρμογές η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί περίπου το 80 % της παγκόσμιας παραγωγής SF_6 , με την χρήση στα Circuit Breakers να καταναλώνει την μεγαλύτερη ποσότητα. Ο εξοπλισμός με μόνωση αερίου είναι τώρα ένα βασικό στοιχείο των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ισχύος σε όλο τον κόσμο, και χρησιμοποιεί το SF_6 σχεδόν αποκλειστικά.

Η χρήση της μόνωσης με SF_6 έχει ξεχωριστά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα μονωτικά λάδια, στα οποία περιλαμβάνεται η αποφυγή διασπάσεων λόγω συγκέντρωσης φορτίου στους μονωτήρες, δεν υπάρχουν προβλήματα ασφάλειας λόγω φωτιάς, έχει μεγάλη αξιοπιστία, ευέλικτο σχεδιασμό, μικρή απαίτηση για υποστήριξη, προστατευμένη μόνωση, μεγάλο χρόνο συντήρησης, χαμηλότερο θόρυβο, καλύτερο χειρισμό, και ελαφρύτερες συσκευές.

2.4.3. Συγκεντρώσεις του SF_6 στο περιβάλλον

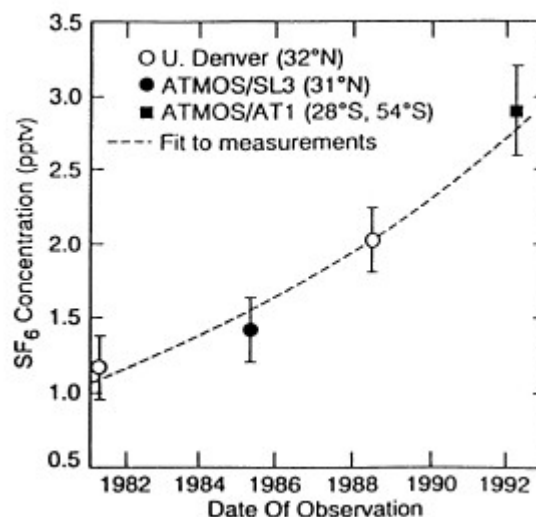
Λόγω των πολλών και αυξανόμενων εμπορικών χρήσεων του SF_6 , υπάρχει αυξημένη ζήτηση για αυτό. Η κατ' εκτίμηση παγκόσμια παραγωγή του SF_6 έχει αυξηθεί σταθερά από τη δεκαετία του '70 σε περίπου 7000 μετρικούς τόνους ετησίως για το 1993. Κατ' επέκταση, αυτό έχει οδηγήσει σε μια αυξανόμενη συγκέντρωση του SF_6 στην ατμόσφαιρα. Όπως βλέπει στο σχήμα 2.4-1, οι μετρήσεις έχουν δείξει ότι η ποσότητες του SF_6 στην ατμόσφαιρα έχουν αυξηθεί σε ένα ποσοστό περίπου 8,7% ετησίως, από μόλις μετρήσιμες ποσότητες μια δεκαετία πριν στα σημερινά επίπεδα που είναι κοντά στα 3,2 pptv (3,2 μέρη στα 10^{12} κατ' όγκο). Οι πιο πρόσφατες μετρήσεις δείχνουν τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις του SF_6 που κυμαίνονται από το 3,18 pptv (στα 8 km ύψος) ως τα 2,43 pptv (στα 27 km ύψος). Επίσης μελέτες δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής του φθάνει τα 1937 χρόνια, και ένα παγκόσμιο ποσοστό αύξησης της συγκέντρωσης του SF_6 στην ατμόσφαιρα του 6,9% για το 1996. Ενώ οι αβεβαιότητες σε αυτούς τους αριθμούς καθιστούν δύσκολη την εξαγωγή συμπερασμάτων, είναι σαφές ότι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του SF_6 αυξάνει και θα μπορούσε να φθάσει στα 10 pptv μέχρι το έτος 2010, ανάλογα με τα εκτιμώμενα ποσοστά απελευθέρωσης (σχήμα 2.4-2).

Σε μερικές βιομηχανικές εφαρμογές το SF₆ δεν είναι εύκολα ανακτήσιμο, π.χ. στην κατασκευή αλουμινίου. Η απελευθέρωση του SF₆ στο περιβάλλον από την βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την συνήθη διαρροή του εξοπλισμού, κατά τη συντήρηση, τη λήψη δειγμάτων, το χειρισμό, τη δοκιμή, κ.λ.π. Χωρίς μεθόδους διάθεσης που να καταστρέφουν πραγματικά το SF₆, μπορούμε να αναμένουμε ότι όλο το SF₆ που έχει ή πρόκειται να παραχθεί, θα διαρρεύσει τελικά στην ατμόσφαιρα. Αυτό ισχύει ακόμα κι αν το παρόν ποσοστό διαρροών του SF₆ από τον εσώκλειστο εξοπλισμό των συστημάτων ισχύος είναι μόνο 1% ετησίως ή βελτιώνεται στο < 0,5% ετησίως. Έχει προταθεί ότι το ακάθαρμο, χρησιμοποιημένο SF₆ που έχει αφαιρεθεί από ηλεκτρικό εξοπλισμό προς απόσυρση, να καταστρέφεται με θερμική αποσύνθεση σε φούρνους επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων σε αυξημένες θερμοκρασίες (T > 1100 °C), αλλά δεν είναι διαθέσιμο κανένα αρχείο που να δείχνει ότι αυτό έχει γίνει σε σημαντικό επίπεδο.

Εντούτοις, η μείωση του ποσοστού των διαρροών του SF₆ και η αύξηση του επιπέδου ανακύκλωσης έχουν μεγάλη προτεραιότητα δεδομένου ότι και τα δύο περιορίζουν τις ανάγκες χρήσης και παραγωγής νέου SF₆ και με αυτό το τρόπο να μειωθούν οι ποσότητες του SF₆ που απελευθερώνονται τελικά στο περιβάλλον. Πράγματι, πρόσφατα έχουν γίνει προσπάθειες από τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας για να μειωθεί και να γίνει καλύτερος έλεγχος των ποσοτήτων του SF₆ που απελευθερώνεται στο περιβάλλον από τον εξοπλισμό με μόνωση SF₆. Αυτές οι προσπάθειες περιλαμβάνουν:

- Την ελαχιστοποίηση της απελευθέρωσης του SF₆ με την βελτίωση των μεθόδων μέτρησης και τη διακοπή των διαρροών, με τη βαθμιαία αντικατάσταση του παλαιότερου εξοπλισμού που συνήθως έχει διαρροή σε μεγαλύτερο ποσοστό, την εφαρμογή μιας σωστής γενικής πολιτικής για την χρήση, το χειρισμό, και την ανίχνευση του SF₆, με καλύτερες διαδικασίες άντλησης και αποθήκευσης, αποδοτική ανακύκλωση και καθορισμό των προτύπων για την ανακύκλωση και την καταστροφή του χρησιμοποιημένου SF₆.
- Μείωση των ποσοτήτων του SF₆ που χρησιμοποιείται με την κατασκευή σφιχτότερου και συμπαγέστερου εξοπλισμού, ανάπτυξη των ηλεκτρικών συσκευών που είναι σφραγισμένες για όλη τη διάρκεια της ζωής τους, και την αντικατάσταση του SF₆ όπου είναι δυνατόν από άλλα αέρια ή μίγματα αερίων.

Αυτές οι προσπάθειες παρακινούνται μερικώς από την προοπτική της έκδοσης κανονισμού και τη δυνατότητα της επιβολής ελέγχων σχετικά με τη χρήση και τη μεταφορά του SF₆. Η γενική ανησυχία παρακινείται ουσιαστικά από έναν μόνο λόγο: το SF₆ είναι ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου με εξαιρετικά μακροχρόνια ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής.

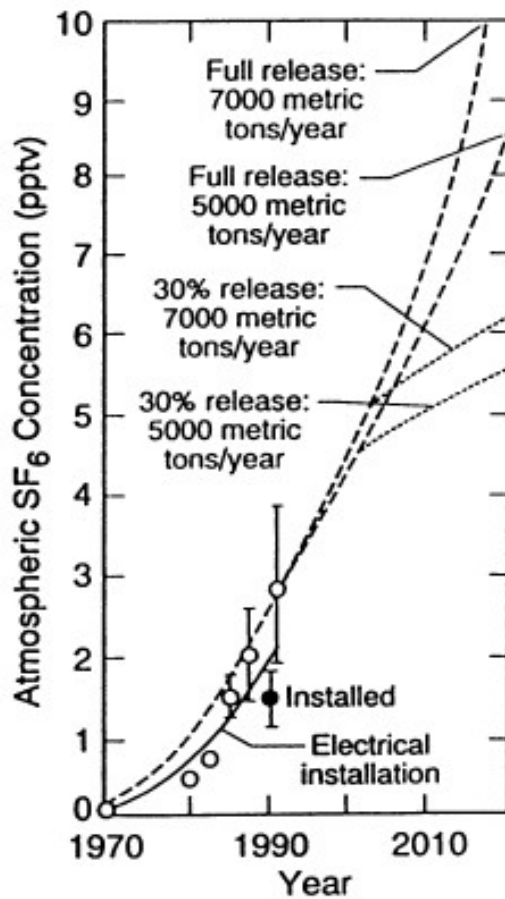


Σχήμα 2.4-1. Μέση συγκέντρωση του SF₆ (pptv = μέρη ανά τρισεκατομμύριο = μέρη ανά 10¹² κατ' όγκο) σε ύψος μεταξύ 12 km και 18 km σε συνάρτηση με το χρόνο.

○ Μετρήσεις υπερύθρων από αερόστατο του πανεπιστημίου του Denver σε βόριο γεωγραφικό πλάτος 32°.

● Δεδομένα από το Spacelab 3 ATMOS σε βόριο γεωγραφικό πλάτος 31°.

■ Μέσος όρος των δεδομένων του ATMOS ATLAS σε νότια γεωγραφικά πλάτη 28° και 54°.



Σχήμα 2.4-2 Ατμοσφαιρική συγκέντρωση του SF₆ (pptv = μέρη ανά 10¹² κατ' όγκο) σε συνάρτηση με το χρόνο. Η στερεά καμπύλη αντιπροσωπεύει το κατ' εκτίμηση συσσωρευτικό άθροισμα του SF₆ που προήλθε από τον εξοπλισμό με μόνωση αερίου κατά το παρελθόν. Τα ανοικτά σημεία είναι μετρημένες συγκεντρώσεις ιχνών στην ατμόσφαιρα. Το στερεό σημείο με τίτλο "installed" είναι η κατ' εκτίμηση συγκέντρωση υποθέτοντας ότι όλο το SF₆ του εσώκλειστου ηλεκτρικού εξοπλισμού σε όλο τον κόσμο το 1990 έχει απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Τέλος οι διακεκομμένες γραμμές είναι προβαλλόμενες αυξήσεις στις διάφορες περιπτώσεις.

2.4.4. Το SF₆ ένα ισχυρό Αέριο του θερμοκηπίου.

Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι αέρια της ατμόσφαιρας που απορροφούν ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη γη και την επιστρέφουν στη γη με την εκπομπή της προς τα πίσω. Τα δυναμικά αέρια του θερμοκηπίου έχουν ισχυρή απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας στη περιοχή μήκους κύματος από ~ 7 μm έως 13 μm. Εμφανίζονται και από μόνα τους στο περιβάλλον (π.χ. H₂O, CO₂, CH₄, N₂O) και ως ανθρωπογενή αέρια που μπορούν να απελευθερωθούν [π.χ. το SF₆, αλλά και οι πλήρως φθοριωμένες ενώσεις (FFC), τα προϊόντα καύσης όπως το CO₂, το άζωτο, και τα οξειδία θείου]. Η αποτελεσματική παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από τη γη από τα φυσικά εμφανιζόμενα αέρια του θερμοκηπίου, και την εκ νέου ακτινοβολία πίσω στη γη, οδηγεί σε μια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της γήινης επιφάνειας. Η ζωή στη γη εξαρτάται από την ύπαρξη του φυσιολογικού φαινομένου του θερμοκηπίου για να παρέχει την κατάλληλη θερμοκρασία για την υποστήριξή της. Όμως εμφανίζεται μια ανισορροπία του φυσικού γήινου φαινομένου του θερμοκηπίου όταν συμβάλλουν οι προκαλούμενες από τον άνθρωπο, ή ανθρωπογενείς, εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου που μετατοπίζει την ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας έτσι ώστε να διατηρείται περισσότερη ακτινοβολία, προκαλώντας κατά συνέπεια τις αλλαγές στο σύστημα του κλίματος.

Το εξαφθοριούχο θείο είναι ένας αποδοτικός απορροφητής της υπέρυθρης ακτινοβολίας, ιδιαίτερα στα μήκη κύματος κοντά στα 10,5 μm. Επιπλέον, αντίθετα από τα περισσότερα άλλα φυσικά εμφανιζόμενα αέρια του θερμοκηπίου (π.χ. CO₂, CH₄), το SF₆ έχει κατά ένα μεγάλο μέρος ανοσία στη χημική και

φωτολυτική υποβάθμιση και επομένως η συμβολή του στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου αναμένεται να είναι συσσωρευτική και ουσιαστικά μόνιμη. Αν και ο προσδιορισμός του ατμοσφαιρικού χρόνου ζωής του SF₆ (δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για δεδομένη ποσότητα του SF₆ που έχει διαρρεύσει στην ατμόσφαιρα να μειωθεί με φυσικές διαδικασίες στο ~37% της αρχικής ποσότητας) στο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα αβέβαιος λόγω της έλλειψης γνώσης σχετικά με τον κύριο μηχανισμό ή μηχανισμούς της καταστροφής του, είναι πολύ μακρύς, εκτιμήσεις το φέρουν από 800 έως 3200 χρόνια, με τις υψηλότερες τιμές να είναι οι πλέον πιθανές εκτιμήσεις. Η ισχυρή απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από το SF₆ και η μακροχρόνια διάρκεια ζωής του στο περιβάλλον είναι οι λόγοι για την εξαιρετικά υψηλή δυνατότητα παγκόσμιας θέρμανσής η οποία για ένα χρονικό ορίζοντα 100 ετών υπολογίζεται να είναι ~24,000 φορές μεγαλύτερη (ανά μονάδα μάζας) από αυτή του CO₂, που είναι το κυρίαρχο μέρος των αερίων που συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ανησυχία για την παρουσία του SF₆ στο περιβάλλον προέρχεται αποκλειστικά από αυτήν την πολύ υψηλή τιμή της δυναμικής του ως αέριο του θερμοκηπίου.

Ενώ η δύναμη του SF₆ ως αέριο του θερμοκηπίου είναι εξαιρετικά υψηλή, η ποσότητα του SF₆ στην ατμόσφαιρα έναντι των συγκεντρώσεων των φυσικά εμφανιζόμενων και των άλλων προκαλούμενου από τον άνθρωπο αερίων του θερμοκηπίου είναι εξαιρετικά χαμηλή. Εκτιμήσεις της σχετικής συμβολής του SF₆ στην μη φυσική παγκόσμια θέρμανση υπολογίζεται από 0,01% έως 0,07%. Σε 100 χρόνια αυτό το ποσοστό θα μπορούσε να φθάσει και το 0,2%. Εντούτοις, υπάρχει ο φόβος ότι οι εκπομπές του SF₆ και άλλες εκπομπές μικρού όγκου μπορούν να έχουν μια σημαντική συνδυασμένη επιρροή, και αυτές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που δεν έχουν ακόμα προβλεφθεί μπορεί να επιδεινωθούν από τη μακροχρόνια διάρκεια ζωής τους στην ατμόσφαιρα. Κυβερνητικές και άλλες υπηρεσίες προστασίας του περιβάλλοντος, ηλεκτρικές και χημικές βιομηχανίες, που χρησιμοποιούν ή ενδιαφέρονται για τη χρήση του SF₆ έχουν εκφράσει ανησυχίες σχετικά με την πιθανή μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική επίδραση του SF₆, και η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας αποκρίνεται με μια πληθώρα τρόπων καλύτερου ελέγχου της χρήσης του SF₆ απ' ό,τι στο παρελθόν και για να μειώσουν τις εκπομπές στο περιβάλλον. Επειδή το SF₆ ήδη χρησιμοποιείται ευρέως, υπάρχουν προφανείς οικονομικές επιπτώσεις για οποιοσδήποτε προσπάθειες να ρυθμιστεί ή να ελεγχθεί η παραγωγή, η χρήση, και η ενδεχόμενη απόσυρσή του.

2.4.5. Βιβλιογραφία

[1] Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry. L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, and R. J. Van Brunt. IEEE Electrical Insulation Magazine. 1997

[2] Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆, (NIST Technical Note 1425), L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, D.S. Green. November 1997.

Παραπροϊόντα του SF₆

2.5: Παραπροϊόντα του SF₆

2.5.1. Εισαγωγή

Το εξαφθοριούχο θείο (SF₆) είναι ένα σχετικά μη τοξικό αέριο που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές λόγω των αδρανών ιδιοτήτων του. Οι διηλεκτρικές και άλλες φυσικές και χημικές ιδιότητες του που σχετίζονται με την έλλειψη αντιδραστικότητας, έχουν οδηγήσει στην εκτενή χρήση του SF₆ ως μονωτικό μέσο σε μηχανισμούς ηλεκτρικών διακοπών (π.χ., σε circuit breakers) από τις υπηρεσίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μοντέρνες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στα συστήματα με μόνωση αερίου (GIS) χρησιμοποιείται για τη διανομή ισχύος σε τάσεις έως 1100 kV. Το κύριο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τα υπαίθρια συστήματα είναι η πολύ μικρότερη επιφάνεια του εδάφους (αναλογία 1:30) που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός GIS και το γεγονός ότι είναι λιγότερο ευαίσθητο στις επιδράσεις του καιρού και της σκόνης. Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται στα GIS λειτουργούν με χαρακτηριστική πίεση του SF₆ 650 kPa. Ενώ το SF₆ είναι αδρανές κατά τη διάρκεια της κανονικής χρήσης, όταν συμβαίνουν ηλεκτρικές αντιδράσεις μέσα σε μηχανήματα με πλήρωση από SF₆, μπορούν να παραχθούν τοξικά παραπροϊόντα που αποτελούν απειλή για την υγεία των εργαζομένων που έρχονται σε επαφή με αυτά.

Το SF₆ αποσυντίθεται σε παραπροϊόντα όταν εκτίθεται σε τέσσερις τύπους ηλεκτρικών εκκενώσεων:

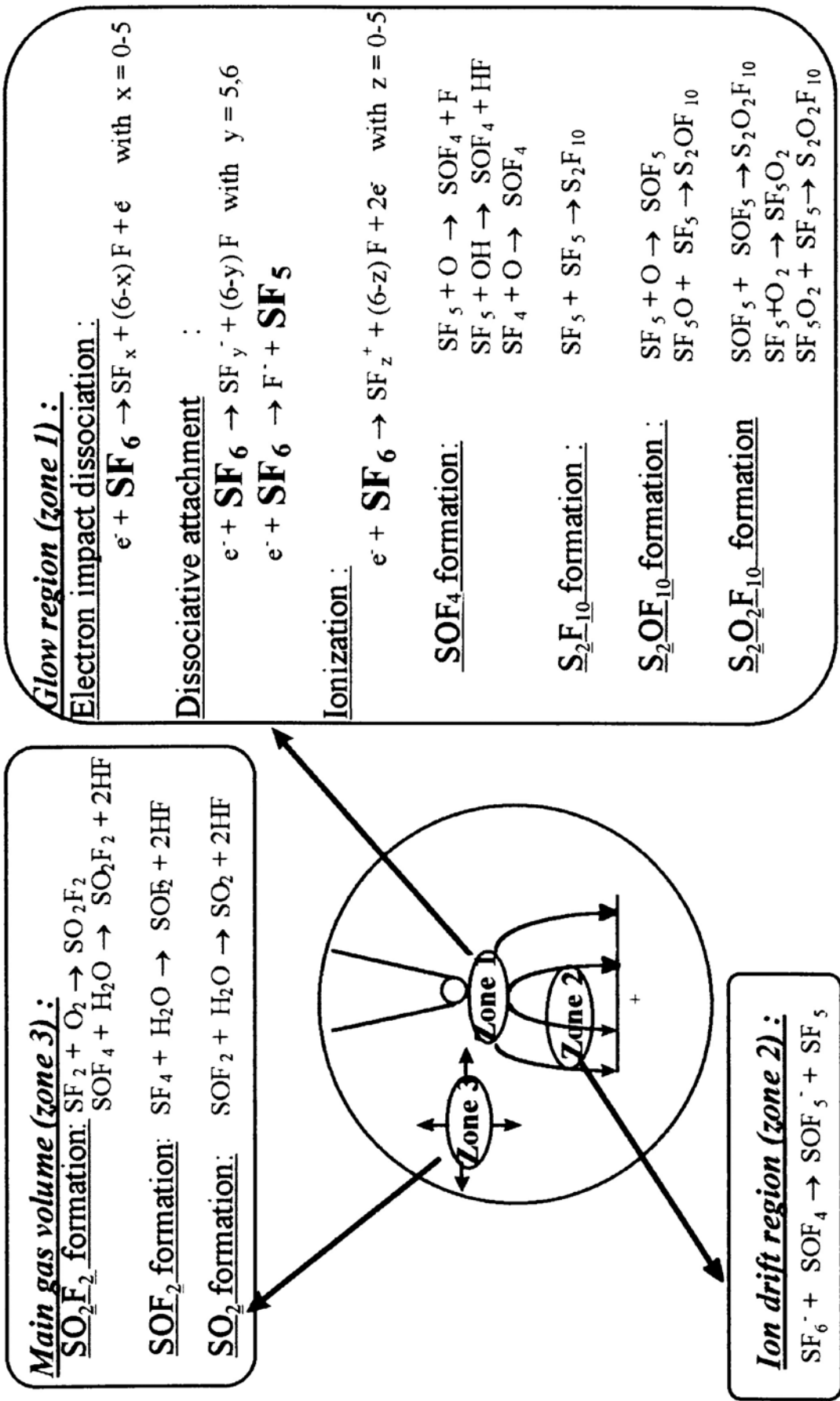
- 1) Μερικές εκκενώσεις κορώνας (PD) που προκαλούνται από τις ατέλειες της μόνωσης,
- 2) Εκκενώσεις σπινθήρων που εμφανίζονται στις ατέλειες της μόνωσης ή κατά τη διάρκεια των διαδικασιών λειτουργίας του διακόπτη,
- 3) Τόξα διακοπών που εμφανίζονται κατά την διακοπή ρευμάτων φορτίου και στα circuit breakers ισχύος, και
- 4) Τόξα βλαβών που εμφανίζονται λόγω της διακοπής της μόνωσης ή της αποτυχίας διακοπής των switchgears.

Κάθε εκκένωση μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά μίγματα και συγκεντρώσεις των παραπροϊόντων.

Επίσης όταν το SF₆ εκτεθεί σε αυξημένες θερμοκρασίες στο εσωτερικό του GIS, σε θερμοκρασίες περίπου έως 150 °C, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, όπως μέταλλα, κεραμικά, γυαλί, ελαστικό, και χυτές ρητίνες, είναι απόλυτα σταθερά υπό την παρουσία του εξαφθοριούχου θείου. Όταν όμως η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 200 °C σε κάποια υλικά αρχίζουν να προκαλούν φαινόμενα αποσύνθεσης. Στα συνήθη μέταλλα και κράματα που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται σημαντικά φαινόμενα αποσύνθεσης, όταν η θερμοκρασία φθάσει τους 400 έως 600 °C.

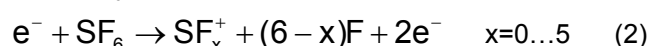
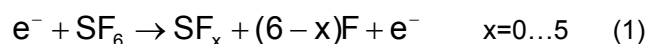
Κάτω από στατικές συνθήκες, οι μερικές εκκενώσεις (PD) μπορεί να προκαλέσουν διάσπαση λόγω της πρόσκρουσης ηλεκτρονίων, της διάσπασης ιονισμού, ή / και της διαχωριστικής δέσμησης ηλεκτρονίων (αντιδράσεις (1) έως (3)). Οι μερικές εκκενώσεις PD είναι μια διαδικασία που γίνεται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες του αερίου, με συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις εκκενώσεις πυράκτωσης και κορώνας. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων είναι πολύ υψηλότερη από τη θερμοκρασία του αερίου. Χρησιμοποιώντας ενδεικτικά τις αντιδράσεις κινητικότητας μεταξύ του SF₄ και του H₂O, η τελευταία μπορεί να υπολογιστεί ότι είναι ~ 350 K. Κατά την διακοπή του ρεύματος σε ένα GIS, εμφανίζονται ηλεκτρικές εκκενώσεις υπό μορφή τόξων (~ 10 έως 30 μs) ή / και σπινθήρων (~ 3 μs). Αυτές οι εκκενώσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τον εκτενή τεμαχισμό του SF₆ σε ενιαία άτομα θείου και φθορίου λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του αερίου 10000 έως 20000 K στη στήλη εκκένωσης. Με την απουσία άλλων ειδών αλληλεπίδρασης το SF₆ θα ανασχηματιζόταν, αλλά η παρουσία π.χ. των ηλεκτροδίων προκαλεί το σχηματισμό φθοριδίων μετάλλων και ένα αντίστοιχο έλλειμμα ατόμων φθορίου στην αέρια φάση, έτσι ώστε να σχηματίζονται δευτερογενή αεριώδη παραπροϊόντα όπως το SF₄ ή το S₂F₂. Επιπλέον, η παραμένουσα υγρασία και ο αέρας σε ένα GIS έχουν μια κρίσιμη επίδραση στην αποσύνθεση του SF₆ και το σχηματισμό των παραπροϊόντων. Με μια συνολική πίεση του SF₆ στη κλίμακα από 50 έως 500 kPa και συγκεντρώσεις H₂O και O₂ μεταξύ 500 έως 1000 ppmv (μέρη ανά εκατομμύριο κατά όγκο), με αυτές τις τιμές μολυσματικών υλικών να είναι χαρακτηριστικές για τα πραγματικά GIS, τα δευτερογενή αεριώδη προϊόντα SxOyFz που δίνονται στις εξισώσεις (4), (7) και (8) βρέθηκε ότι παράγονται μετά από μερικές εκκενώσεις ή εκκενώσεις σπινθήρων / τόξων, όπως συνοψίζονται στην συνέχεια.

1. Οι κύριες αντιδράσεις στις εκκενώσεις χαμηλής θερμοκρασίας είναι μερικές εκκενώσεις, εκκενώσεις πυράκτωσης, και εκκενώσεις κορώνας.

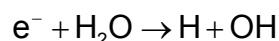


Σχήμα 2.5-1. Περιοχές διαφορετικών χημικών δράσεων σχετικά με το μοντέλο τριών ζωνών για την αποσύνθεση του SF₆ σε εφαρμογές ακίδας πλάκας αρνητικής πολικότητας.

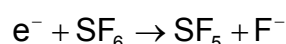
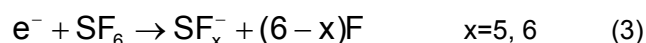
Διάσπαση / ιονισμός λόγω πρόσκρουσης ηλεκτρονίων:



Επίσης

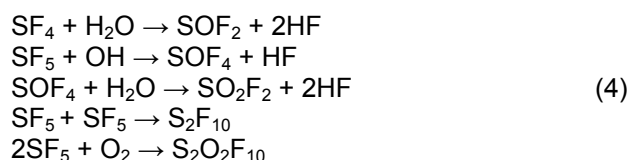


Διαχωριστική Δέσμευση:

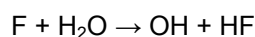
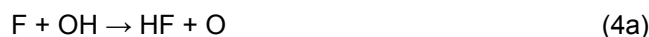
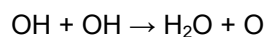


Αυτές οι αντιδράσεις είναι αντιστρέψιμες. Μετά την εκκένωση, τα προϊόντα της αποσύνθεσης ανασυνδυάζονται, με την προϋπόθεση ότι δεν γίνονται δευτερογενείς αντιδράσεις με ατμούς μετάλλων από τους ακροδέκτες, τα τοιχώματα του δοχείου, ή άλλα κατασκευαστικά στοιχεία του GIS.

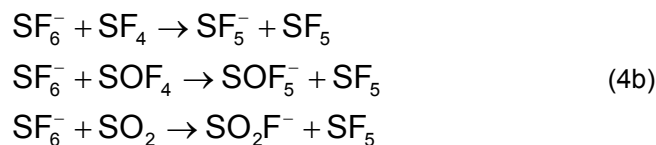
Αντιδράσεις με τα μολυσματικά υλικά:



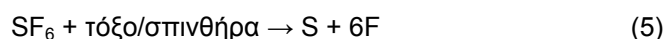
Το O και το HO παρέχονται από τις ακόλουθες αντιδράσεις:



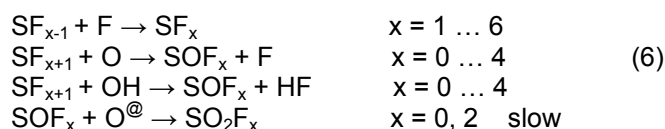
Ο ρυθμός υποβάθμισης των ιόντων του SF₆ στην περιοχή ολίσθησης ιόντων μπορεί να εξηγηθεί από τις ακόλουθες αντιδράσεις. Ο σχηματισμός τους ανταγωνίζεται τις αντιδράσεις μεταφοράς των ιόντων F⁻ μεταξύ του SF₆⁻ και συγκεκριμένων προϊόντων αποσύνθεσης του SF₆, οι ταχύτερες από τις οποίες είναι:

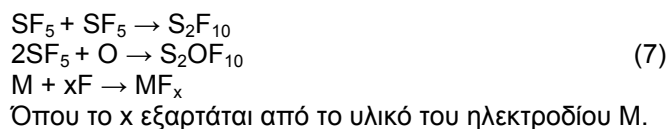


2. Οι κύριες αντιδράσεις στις εκκενώσεις υψηλής θερμοκρασίας οφείλονται σε τόξα / σπινθήρες. Μέσα στη στήλη εκκένωσης (χρονική κλίμακα ~ 10⁻⁶ s) ο συνολικός διαχωρισμός των ατόμων F και S γίνεται σύμφωνα με την αντίδραση



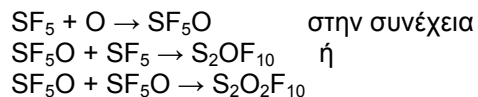
Επανασυνδέσεις ή αντιδράσεις με άλλες ρίζες ~ 10⁻³ έως 100 s μετά από την εκκένωση



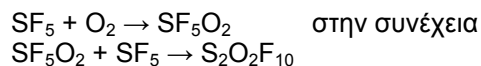


Όπου το x εξαρτάται από το υλικό του ηλεκτροδίου M.

Επίσης:



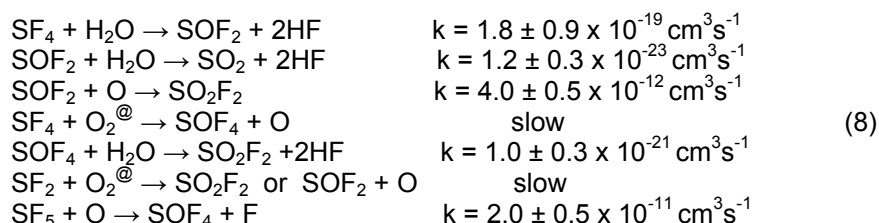
Επίσης



και



3. Έξω από τη στήλη εκκένωσης (κύριος όγκος αερίου, μέχρι ~ 10000 s μετά από την εκκένωση)



Τα άτομα ή τα μόρια που απορροφώνται από τις επιφάνειες των ηλεκτροδίων υποδεικνύονται με το σύμβολο “@”.

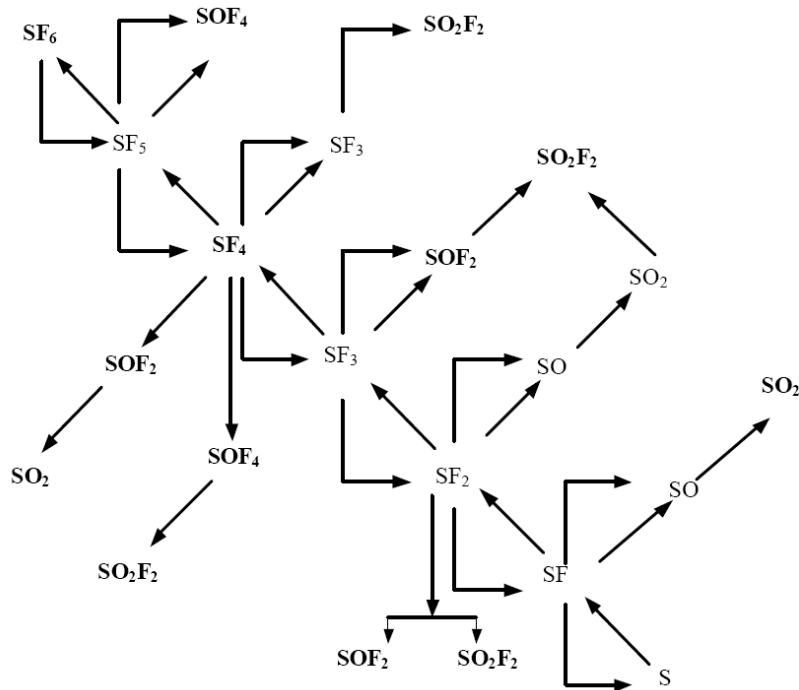
2.5.2. Περιγραφή των αποτελεσμάτων

Το SOF_2 είναι το κύριο παραπροϊόν που σχηματίζεται κάτω από εκκενώσεις τόξου (~ 600 nmol/J), σπινθήρα (~ 16 nmol/J) και κορώνας (~ 3 nmol/J), και μπορεί να υποστεί υδρόλυση σε μικρή έκταση (~ 0,03 %) για να σχηματίσει το SO_2 . Το ποσοστό σχηματισμού του SO_2F_2 (~ 0,5 nmol/J) κάτω από την εκκένωση κορώνας είναι πολύ υψηλότερο απ' ό τι στα τόξα (~ 0,03 nmol/J) και στους σπινθήρες (~ 0,016 nmol/J). Με το ποσοστό σχηματισμού του ~ 0,2 nmol/J, το S_2F_{10} ανιχνεύεται στα πειράματα σπινθήρων, αλλά ποτέ κάτω από τις εκκενώσεις τόξων. Το SOF_4 σχηματίζεται κυρίως στους σπινθήρες (~ 0,22 nmol/J) και τις εκκενώσεις κορώνας (~ 1 nmol/J).

Κάτω από εκκενώσεις χαμηλής θερμοκρασίας μια αύξηση της περιεκτικότητας H_2O οδήγησε σε μια αύξηση του σχηματισμού των SOF_2 , SOF_4 , SO_2F_2 , και του HF , και σε μια μείωση του σχηματισμού του S_2F_{10} . Με την προσθήκη 1% O_2 υπήρξε μια αξιοπρόσεκτη μείωση του S_2F_{10} , μια αύξηση SO_2F_2 και του SOF_4 , και μια μείωση του SOF_2 . Κάτω από τις εκκενώσεις υψηλής θερμοκρασίας, βρέθηκαν τα ίδια αποτελέσματα με τις ακόλουθες διαφορές: Η προσθήκη 1% O_2 προκάλεσε μικρότερη μείωση του σχηματισμού του S_2F_{10} , και επιπλέον, παρατηρήθηκε η εμφάνιση του S_2OF_{10} . Σε αντίθεση με το χημικά αδρανές SF_6 , μερικά από τα παραπροϊόντα είναι τοξικά (ειδικά το S_2F_{10} και το S_2OF_{10}) έτσι ώστε τα τελευταία χρόνια έγιναν πολλά πειράματα για να ερευνηθούν τις διαδικασίες σχηματισμού και αποσύνθεσης αυτών των ειδών αερίου. Όλα τα αεριώδη παραπροϊόντα είναι διαβρωτικά, δηλ. ικανά να αντιδράσουν ειδικά με τα ηλεκτρόδια. Σε ένα GIS αυτή η συμπεριφορά μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικές δυσλειτουργίες, λόγω του σχηματισμού των στρωμάτων μη αγωγιμότητας (nonconductive layers) στα ηλεκτρόδια. Επομένως η μείωση τέτοιων αντιδράσεων θα πρέπει να βελτιώσει την αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής του GIS.

Ο σχηματισμός των δευτερογενών αεριωδών προϊόντων έχει ερευνηθεί από τα πειράματα προσομοίωσης, εντούτοις συχνά χωρίς να εξεταστεί ο αριθμός και η ενέργεια των ηλεκτρικών εκκενώσεων (σπινθήρες) και τα αποτελέσματα στα στερεά υλικά. Είναι βασικός ο υπολογισμός των ηλεκτρικών εκκενώσεων γνωστής ενέργειας μεταξύ των ηλεκτροδίων διαφορετικών υλικών σε ένα θάλαμο προσομοίωσης κατασκευασμένο για αυτό το σκοπό, όπου να συνδυάζεται με την ανάλυση του αερίου και η ανάλυση της επιφάνειας. Με αυτήν την διαρρύθμιση είναι δυνατό να ληφθούν οι

πληροφορίες για τη συσχέτιση μεταξύ των ηλεκτρικών παραμέτρων και των χημικών αντιδράσεων που εμφανίζονται στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων. Με τα βαθμολογημένα σχεδιαγράμματα βάθους SNMS μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα εκείνου του μέρους των διαβρωτικών αεριωδών προϊόντων που έχει αντιδράσει με τα στερεά υλικά. Αυτό γίνεται πιθανό με την σύγκριση με τις μετρήσεις υπολογισμού της ποσότητας με την μέθοδο FTIR που πραγματοποιούνται στο SF₆ matrix αμέσως μετά από κάθε πείραμα εκκένωσης. Αυτές οι έρευνες συνοδεύονται από την ανάλυση επιφάνειας των ηλεκτροδίων που εκτέθηκαν στην ατμόσφαιρα του SF₆ σε ένα διαμέρισμα δοκιμής GIS στο οποίο προκλήθηκαν μερικές εκκενώσεις PD.



- Σημειώσεις:**
- 1) Οι σταθερές αέριες ενώσεις εμφανίζονται με παχύτερους χαρακτήρες.
 - 2) Δεν εμφανίζονται όλες οι δυνατές αντιδράσεις.
 - 3) Τα χρονικά διαστήματα των αντιδράσεων ποικίλουν.
 - 4) Οι αντιδράσεις με το H₂O και το O₂ γίνονται κυρίως έξω από τον όγκο της εκκένωσης.

Σχήμα 2.5-2. Προϊόντα αποσύνθεσης του SF₆ κατά τις ηλεκτρικές εκκενώσεις [Honeywell]

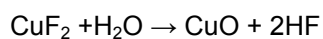
Στερεά και αέρια προϊόντα αποσύνθεσης μπορούν να προέλθουν από τις δευτερογενείς αντιδράσεις με ατμούς μετάλλων, όπως: φθορίδια μετάλλων, σουλφίδια μετάλλων, και οξειδία μετάλλων.

Φθορίδια θείου και άλλα δευτερογενή προϊόντα αποσύνθεσης όπως το SF₄, και οξυφθορίδια θείου όπως τα SOF₂, SO₂F₂, SOF₄. Τέτοια προϊόντα αποσύνθεσης που προέρχονται από εκκενώσεις υψηλής ενέργειας όπως τα ανωτέρω είναι επίσης καλά διηλεκτρικά, οπότε οι επικαθίσεις σκόνης στην επιφάνεια των στερεών μονωτών, δεν εξασθενίζουν την απόδοση των προσβαλλόμενων μηχανημάτων με την προϋπόθεση ότι η υγρασία που υπάρχει μέσα στο GIS είναι πολύ χαμηλή.

Τα φθορίδια μετάλλων μπορούν να εμφανισθούν σαν λευκή, καστανόχρωμη ή γκρι σκόνη μέσα στον εξοπλισμό. Στερεά προϊόντα αποσύνθεσης με μορφή σκόνης είναι πολύ λεπτά και ενδέχεται να μην γίνουν αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι ειδικά όταν βρίσκονται στον αέρα. Η επαφή ή η εισπνοή τέτοιων στερεών προϊόντων αποσύνθεσης θα πρέπει να αποφεύγεται.

Κοινά προϊόντα αποσύνθεσης του SF₆ είναι το τριφθοριούχο αλουμίνιο (Aluminum Trifluoride) AlF₃ το Copper Fluoride CuF₂ και οι ενώσεις βολφραμίου (Tungsten compounds) (π.χ., WF₆, WO₃). Αυτές οι ενώσεις απορροφούν νερό και είναι εξαιρετικά διαβρωτικές.

Αν εκτεθούν στην υγρασία τα προαναφερθέντα προϊόντα αποσύνθεσης, υδρολύονται και σχηματίζουν δευτερογενή προϊόντα όπως φαίνεται στις ακόλουθες εξισώσεις:



Το υδροφθόριο (HF) που σχηματίζεται κατά την διάρκεια αυτών των αντιδράσεων, επιτίθεται δραστικά σε οποιοδήποτε υλικό που περιέχει διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) όπως για παράδειγμα το γυαλί και η

πορσελάνη. Η χρήση τέτοιων υλικών στα GIS όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το SF₆ για την σβέση του τόξου, είναι εφαρμόσιμη μόνο κάτω από συγκεκριμένες ειδικές συνθήκες.

Εν τούτοις με την παρουσία υγρασίας τα πρωτογενή και δευτερογενή προϊόντα αποσύνθεσης του εξαφθοριούχου θείου, σχηματίζουν διαβρωτικούς ηλεκτρολύτες που μπορούν να προκαλέσουν βλάβες και διακοπή της λειτουργίας ειδικά των ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Εάν ο σχηματισμός προϊόντων αποσύνθεσης δεν μπορεί να αποφευχθεί με χρήση ειδικών μεθόδων κατασκευής του GIS, η διάβρωση μπορεί σε μεγάλο βαθμό να περιορισθεί με την απομάκρυνση της υγρασίας και την χρήση ειδικών κατάλληλων υλικών κατασκευής. Ευρέως χρησιμοποιούμενα μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το ασάλι, ο χαλκός και ο μπρούντζος παραμένουν ουσιαστικά ανεπηρέαστα. Αντιθέτως, υλικά όπως το γυαλί, η πορσελάνη, το μονωτικό χαρτί και παρόμοια υλικά μπορούν να υποστούν σημαντικές βλάβες, ανάλογα με την συγκέντρωση των διαβρωτικών ουσιών. Τα μονωτικά υλικά όπως οι εποξικές ρητίνες, το PTFE, το πολυαιθυλένιο, το χλωριούχο πολυβινύλιο, και το οξείδιο πολυμεθυλενίου, επηρεάζονται λίγο ή ανεπαίσθητα.

2.5.3. Συγκεντρώσεις των Παραπροϊόντων του SF₆

Πολυάριθμες μελέτες έχουν χαρακτηρίσει τα παραπροϊόντα του SF₆. Οι καθηγητές Δέρβος και Βασιλείου (2000) έχουν συνοψίσει τους σημαντικότερους (από μεριάς τοξικότητας και κινδύνου) και τις ποσότητες καθενός που σχηματίζεται υπό συνθήκες παρόμοιες με εκείνες που συναντώνται στα switchgear με μόνωση αερίου (GIS) (Πίνακας 2.5-1).

Αυτά τα στοιχεία λήφθηκαν με την έκθεση του SF₆ σε επαναλαμβανόμενη εκκένωση υπό πειραματικές συνθήκες. Τα προϊόντα αποσύνθεσης και οι συγκεντρώσεις που διαμορφώνονται υπό πραγματικές συνθήκες μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και τον τύπο ηλεκτρικής εκκένωσης.

Πίνακας 2.5-1. Αεριώδη παραπροϊόντα αποσύνθεσης του SF₆ και τυπικές συγκεντρώσεις κατά την διάρκεια επαναλαμβανόμενων σπινθηρισμών.

Chemical Formula	Chemical Name	Experimental Concentration (percent by volume) ^a
HF	Hydrogen fluoride	1.0
SOF ₂ (SF ₄) ^b	Thionyl sulfide (sulfur tetrafluoride)	0.5
SOF ₄	Sulfur tetrafluoride oxide	0.085
SiF ₄	Silicon tetrafluoride	0.085
S ₂ F ₁₀ (SF ₅) ^c	Disulfur decafluoride	0.025
SO ₂ F ₂	Sulfuryl fluoride	0.006
SO ₂	Sulfur dioxide	0.002

Ο πίνακας έχει προσαρμοσθεί από τους καθηγητές Δέρβο και Βασιλείου (2000).

a Σημειώστε ότι αυτές οι συγκεντρώσεις αντιπροσωπεύουν τη μετρημένη συγκέντρωση στις πειραματικές συνθήκες που μελετώνται. Οι συνθήκες είχαν σχεδιαστεί με σκοπό να μιμηθούν ένα περιστατικό πραγματικού σπινθηρισμού, εντούτοις, οι πραγματικές συγκεντρώσεις του αέρα κοντά στο GIS θα ποικίλει από αυτά τα στοιχεία.

b Το SF₄ υδρολύεται εύκολα και γίνεται SOF₂.

c Το S₂F₁₀ αναφέρεται από μερικούς συντάκτες ως πενταφθοριούχο θείο SF₅.

Πίνακας 2.5-2: Οριακές τιμές* (Threshold Limit Values - TLV's) του αερίου SF₆ και των Κυρίων Αεριοδών Παραπροϊόντων του.

Όνομα της ένωσης	Formula	Όριο (ppm)	Σημειώσεις
Sulfur hexafluoride	SF ₆	1000	Καθαρό αέριο SF ₆
Thionyl fluoride	SOF ₂	1	Οσμή κλούβιων αυγών. Σημ. 1 και 4
Sulfuryl fluoride	SO ₂ F ₂	5	Σημ. 1 και 4
Thionyl tetrafluoride	SOF ₄	0.5	Ισχυρή οσμή. Σημ. 1 και 4
Sulfur dioxide	SO ₂	2	Ισχυρή οσμή. Σημ. 1, 3 και 4
Hydrofluoric acid	HF	3	Ισχυρή οσμή. Σημ. 1, 3 και 4
Hydrogen sulfide	H ₂ S	10	Οσμή κλούβιων αυγών.
Sulfur tetrafluoride	SF ₄	0.1	Ισχυρή οσμή. Σημ. 2, 3 και 4
Disulfur difluoride	S ₂ F ₂	0.5	Σημ. 2
Disulfur decafluoride	S ₂ F ₁₀	0.025	Σημ. 2 και 5
Sulfur difluoride	SF ₂	1	Σημ. 1 και 4
Tungsten hexafluoride	WF ₆	0.1	Σημ. 1 και 4
Silicon tetrafluoride	SiF ₄	0.6	Σημ. 1 και 4
Carbon tetrafluoride	CF ₄	1000	Σημ. 1 και 4
Carbon disulfide	CS ₂	10	Σημ. 4
Carbon monoxide	CO	50	Σημ. 4

Σημειώσεις: * Αυτές οι τιμές είναι πρότυπα που καθορίζονται για την προστασία έκθεσης των εργαζομένων κατά τη διάρκεια μιας εβδομάδας εργασίας 40 ωρών. Η έκθεση σε αυτές τις συγκεντρώσεις για πολύ καιρό θεωρείται ότι δεν έχει καμία δυσμενή συνέπεια στους υπαλλήλους.

1. Αυτό το αερίωδες παραπροϊόν μας ανησυχεί κυρίως επειδή υπάρχει σε αερίωδη μορφή υπό κανονικές συνθήκες και είναι τοξικό.
2. Αυτό το αερίωδες παραπροϊόν είναι τοξικό αλλά τείνει να αντιδράσει με άλλα παρόμοια αέρια ή με την υγρασία για να σχηματίσει SF₆, SO₂, και HF, ή οξυφθορίδια όπως τα SOF₂, SO₂F₂, και SOF₄.
3. Αυτό το αερίωδες παραπροϊόν είναι πολύ αντιδραστικό ή διαβρωτικό.
4. Είναι δυνατό να φιλτραρισθεί αυτό το αερίωδες παραπροϊόν από το αέριο SF₆ με ροή μέσω ενεργοποιημένων φίλτρων ξυλάνθρακα ή αλουμίνας.
5. Αυτή τη στιγμή, δεν είναι δυνατό να μετρηθεί αυτό το όριο (tlv).

2.5.4. Μετρήσεις για την απομάκρυνση διαβρωτικών συστατικών

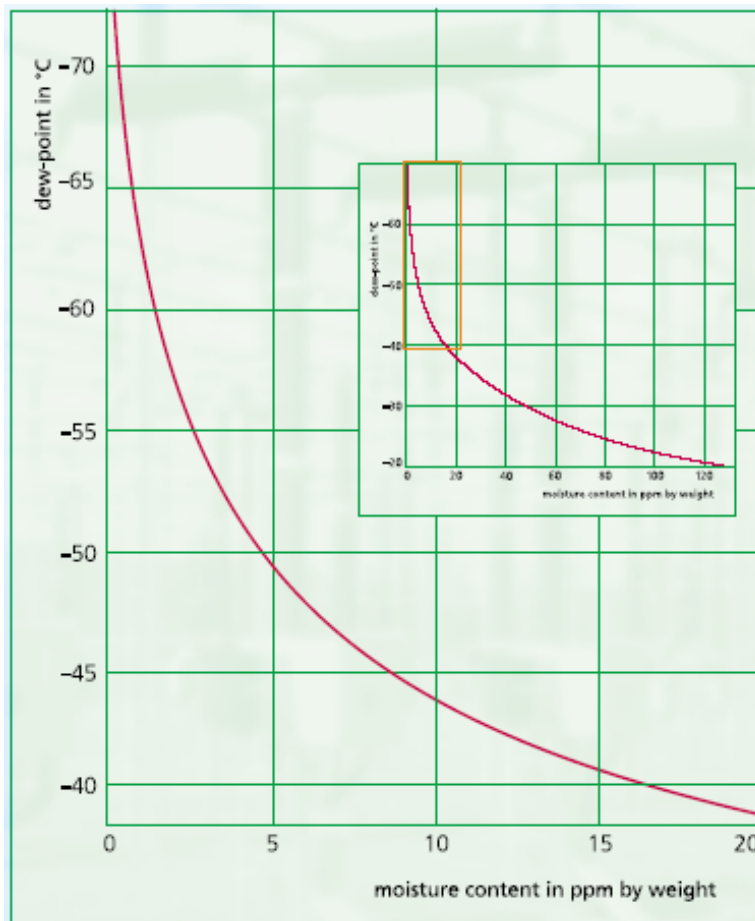
Και η υγρασία, αλλά και τα προϊόντα αποσύνθεσης του εξαφθοριούχου θείου μπορούν σχετικά εύκολα να απομακρυνθούν με απορρόφηση. Οξειδία του αλουμινίου αλλά και μοριακά φίλτρα ή συνδυασμός και των δύο, είναι κατάλληλα για αυτό το σκοπό. Αυτά πολύ αποτελεσματικά και πρακτικά μη αντιστρέψιμα, απορροφούν αυτά τα αέρια και οξειδωτικά προϊόντα. Ταυτόχρονα διατηρούν ένα χαμηλό σημείο εξάχνωσης (Dew Point) στο εμπειροχόμενο αέριο.

Εξαιρετικά κατάλληλα είναι απορροφητικά μέσα με μορφή εσωτερικού φίλτρων, μέσω των οποίων με χρήση αντλιών κυκλοφορεί το αέριο. Αυτή η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή για παράδειγμα στην περίπτωση διακοπών ισχύος με SF₆, όπου μπορούν να εμφανισθούν σημαντικές συγκεντρώσεις προϊόντων αποσύνθεσης λόγω της σβέσης του ηλεκτρικού τόξου.

Επίσης, σε πολλές περιπτώσεις, στατικά φίλτρα παρέχουν ικανοποιητική προστασία.

Στο Σχ. 2.5-3 βλέπουμε την μεταβολή της θερμοκρασίας εξάχνωσης (dew point) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα υγρασίας μέσα στο αέριο.

dew-point in °C	moisture content in ppm by weight
-75	0.148
-70	0.32
-65	0.65
-64	0.75
-63	0.86
-62	1.0
-61	1.15
-60	1.3
-59	1.5
-58	1.7
-57	2.0
-56	2.2
-55	2.5
-54	2.9
-53	3.3
-52	3.6
-51	4.2
-50	4.8
-49	5.4
-48	6.1
-47	6.9
-46	7.8
-45	8.7
-44	10.0
-43	11.0
-42	12.0
-41	14.0
-40	16.0
-39	17.0
-38	20.0



Σχήμα 2.5-3: Μεταβολή της θερμοκρασίας εξάχνωσης (dew point) σε συνάρτηση με την περιεκτικότητα υγρασίας μέσα στο αέριο.

2.5.5. Επίδραση των στερεών μονωτών στην αποσύνθεση του SF₆ λόγω σπινθηρισμών.

Το εξαφθοριούχο θείο (SF₆), είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιημένο μονωτικό αέριο στα circuit breakers υψηλής και πολύ υψηλής τάσης. Όταν ο διακόπτης λειτουργεί, το τόξο που παράγεται προκαλεί τη μερική εξάτμιση των ηλεκτροδίων και του ακροφυσίου, το οποίο αποτελείται από έναν οργανικό μονωτή, περισσότερο συχνά από τεφλόν. Το πλάσμα του τόξου του SF₆ πρέπει στη συνέχεια να εξασθενήσει παρουσία των ακαθαρσιών όπως οι ατμοί μετάλλων, ο άνθρακας, το οξυγόνο και το νερό που προέρχονται από τη διάβρωση και την εξάτμιση του ηλεκτροδίου και του ακροφυσίου. Αυτό σημαίνει ότι η χημική σύνθεση του πλάσματος δεν είναι πλέον αυτή που αντιμετωπίζεται ιδανικά στο καθαρό αέριο.

Υπάρχουν μεγάλες ομοιότητες στην αποσύνθεση SF₆ κάτω από την επίδραση των τόξων και των σπινθηρισμών υψηλής ενέργειας παρουσία των οργανικών μονωτών.

Σύμφωνα με μελέτη του A. M. Casanovas και άλλων, αναλύθηκαν χημικά οι παραγωγές των παραπροϊόντων με χρήση της χρωματογραφίας αερίου και μελετήθηκαν σε σχέση με την διαφοροποίηση της φύσης του υλικού των μονωτών (Megelit, Kel-F (πολυτριφθοροχλωραιθυλένιο), τεφλόν, πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο και νάιλον) και την συγκέντρωσης πρόσθετων ουσιών όπως το O₂ και το H₂O.

Πίνακας 2.5-3: Τα υλικά των μονωτήρων που μελετήθηκαν.

Insulator	Formula
Megelit	$[C_9H_8O_4]_n$
Teflon	$[C_2F_4]_n$
Kel-F	$[C_2F_3Cl]_n$
Nylon	$[N_2C_{12}H_{22}O_2]_n$
Polypropylene	$[C_3H_6]_n$
Polyethylene HD	$[C_2H_4]_n$

2.5.5.1. Αποτελέσματα

(1) Οι στερεοί οργανικοί μονωτές, που μπορούν να περιέχουν φθόριο, ατμοποιούνται μερικώς από μια εκκένωση, ενισχύοντας το σχηματισμό των ειδών που είναι ικανά να παγιώσουν τα άτομα φθορίου που απελευθερώνονται από το SF₆.

(a) Παρουσία ενός οργανικού μονωτή, πραγματοποιείται μια αύξηση μέχρι μία τάξη μεγέθους στα επίπεδα σχηματισμού των σημαντικότερων παραπροϊόντων αποσύνθεσης του SF₆ που είναι τα (SF₄ + SOF₂). Το επίπεδο του S₂F₁₀ πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα περίπου ίσο με το πέντε, και επίσης ενισχύονται και τα επίπεδα των δευτερευόντων ενώσεων (S₂OF₁₀, S₂O₂F₁₀ και S₂O₃F₆). Πρέπει να σημειωθεί, εντούτοις, ότι οι ποσότητες των παραπροϊόντων του SF₆ ήταν σε όλες τις περιπτώσεις ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας του αερίου (>1%) και έτσι δεν θα είχαν μια σημαντική επίδραση είτε λειτουργικά είτε περιβαλλοντικά στον ηλεκτρικό εξοπλισμό που χρησιμοποιεί απορροφητικά υλικά.

(b) Παρουσία των μονωτών, ο σχηματισμός του CF₄ συσχετίζεται με τις πρόσθετες ποσότητες των (SF₄ + SOF₂) που σχηματίζονται.

(2) Η επίδραση των διάφορων μονωτών μπορεί να εξηγηθεί από τις διαφορετικές ποσότητες του μονωτή που ατμοποιείται που οφείλεται ειδικά στη θερμοκρασία κρυσταλλικής τήξης τους.

(3) Ο βαθμός στον οποίο ο μονωτής έχει επιπτώσεις στην αποσύνθεση του SF₆ φαίνεται να εξαρτάται από τα επίπεδα του H₂O και του O₂ που αρχικά ήταν παρόντα στο αέριο. Η ενισχυτική επίδραση του μονωτή αυξάνεται (ή μειώνεται) παρουσία του νερού ή του οξυγόνου για τις ενώσεις των οποίων ο σχηματισμός εμποδίζεται (ή ενισχύεται) από το νερό ή το οξυγόνο. Είναι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της επίδρασης του μονωτή και εκείνων του H₂O ή του O₂ που οδηγούν σε αυτά τα αποτελέσματα. Εξηγούν επίσης τον ελαφρώς ανασταλτικό ρόλο του μονωτή στο σχηματισμό των (SOF₄ + SO₂F₂).

2.5.6. Βιβλιογραφία:

[1] Byproducts of Sulfur Hexafluoride (SF₆), Use in the Electric Power Industry. US EPA Jan 2002.

[2] Influence of Reactive SF_x Gases on Electrode Surface after Electrical Discharge under SF₆ Atmosphere. C. Beyer, H. Jenett, and D. Klockow. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 7 No. 2, April 2000.

[3] Honeywell Accudri SF₆ Gas Analysis Program. Honeywell Fluorine Products.

[4] Solvay Fluor and Derivate. GmbH. Sulphur Hexafluoride.

[5] United States of America – Department of Energie. Chapter 4. Maintenance and Handling of GAS INSULATION. February 1994. Power System Maintenance Manual.

[6] Production of SO₂F₂, SOF₄, (SOF₂ + SF₄), S₂F₁₀, S₂OF₁₀, and S₂O₂F₁₀ in SF₆ and (50-50) SF₆-CF₄ mixtures exposed to negative coronas. C. Pradayrol, A. M. Casanovas, C. Aventin, and J. Casanovas. J.Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 1356-1369.

[7] Decomposition products from negative and 50 Hz ac corona discharges in compressed SF₆ and SF₆/N₂ (10:90) mixtures. Effect of water vapour added to the gas. L. Vial, A. M. Casanovas, I. Coll and J Casanovas. J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) 1681-1692.

[8] Influence of a solid insulator on the spark decomposition of SF₆ and 50% SF₆ + 50% CF₄ mixtures. A. M. Cassanovas, I. Coll, C. Pradayrol, and J Cassanovas. J. phys. D: appl. Phys. 31 (1998) 2835-2845.

**Ανάλυση Αερίων με Τετραπολικό
Φασματογράφο Μαζών**

3. Ανάλυση Αερίων με Τετραπολικό Φασματογράφο Μαζών

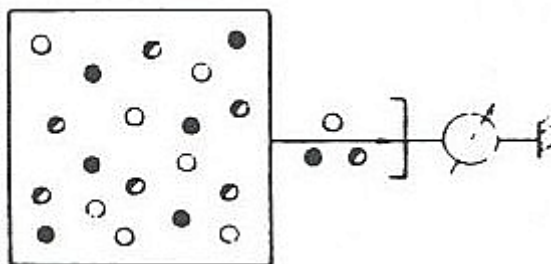
3.1. Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών.

Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών αποτελεί αναλυτική συσκευή η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον χαρακτηρισμό αερίων καθώς και στην ανίχνευση ουσιών με εξαιρετικά χαμηλές περιεκτικότητες (1 ppm) στον ατμοσφαιρικό αέρα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία ενός τετραπολικού φασματογράφου είναι η τοποθέτηση του τετραπολικού φίλτρου μαζών σε χώρο υψηλού κενού (HV) με πιέσεις χαμηλότερες από 10^{-6} mbar, ή σε χώρο εξαιρετικά υψηλού κενού (UHV) με πιέσεις χαμηλότερες από 10^{-8} mbar, ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων και το είδος του τετραπολικού φίλτρου μαζών. Το προς ανάλυση δείγμα αερίου εισάγεται μέσα στον θάλαμο κενού μέσα από ένα διαφορικό σύστημα πιέσεων με εξαιρετικά χαμηλή ροή αερίου προς τον κυρίως θάλαμο κενού, ανεβάζοντας έτσι την συνολική πίεση στον χώρο του τετραπόλου κατά μία ή δύο τάξεις μεγέθους. Στο πρώτο μέρος του παρόντος κεφαλαίου επιχειρείται μία εισαγωγή στις βασικές αρχές λειτουργίας των τετραπολικών φίλτρων μαζών και αναφέρεται η καταλληλότερη επιλογή των υλικών και συνδυασμών των επί μέρους τμημάτων ενός τετραπολικού φασματογράφου για τον ποιοτικό έλεγχο του εξαφθοριούχου θείου. Τονίζεται ότι οι διατάξεις αυτές αποτελούν την μέθοδο αναφοράς και ότι λόγω της υψηλής τους ακριβείας χρησιμοποιούνται και για βαθμονόμηση άλλων αναλυτικών συσκευών, όπως είναι π.χ. ο αεριοχρωματογράφος.

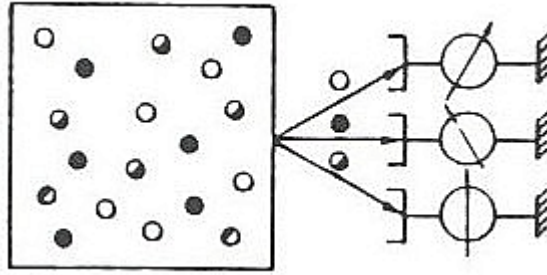
3.1.1. Πλεονεκτήματα καταγραφής μερικών πιέσεων σε συστήματα κενού.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι πληροφορίες που παρέχονται από την καταγραφή της συνολικής πίεσης σε ένα χώρο από τον οποίο γίνεται άντληση αέρος, επαρκούν για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό του συστήματος κενού. Όμως σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως είναι η διαδικασία εναπόθεσης λεπτών υμενίων, η ανίχνευση διαρροών σε συστήματα εξαιρετικά υψηλού κενού, η χημική ανάλυση δειγμάτων (στερεών – υγρών - αερίων) , καθώς και σε πολλές άλλες εφαρμογές. είναι απαραίτητη η γνώση των επιμέρους πιέσεων των συστατικών του εξεταζόμενου χώρου. οπότε η μέτρηση της συνολικής πίεσης καθίσταται λιγότερο χρήσιμη. Η βασική αρχή λειτουργίας για την καταγραφή της συνολικής πίεσης ή των επί μέρους πιέσεων σε θάλαμο κενού δίδεται ποιοτικά από τα σχήματα 3-1 και 3-2 αντίστοιχα.

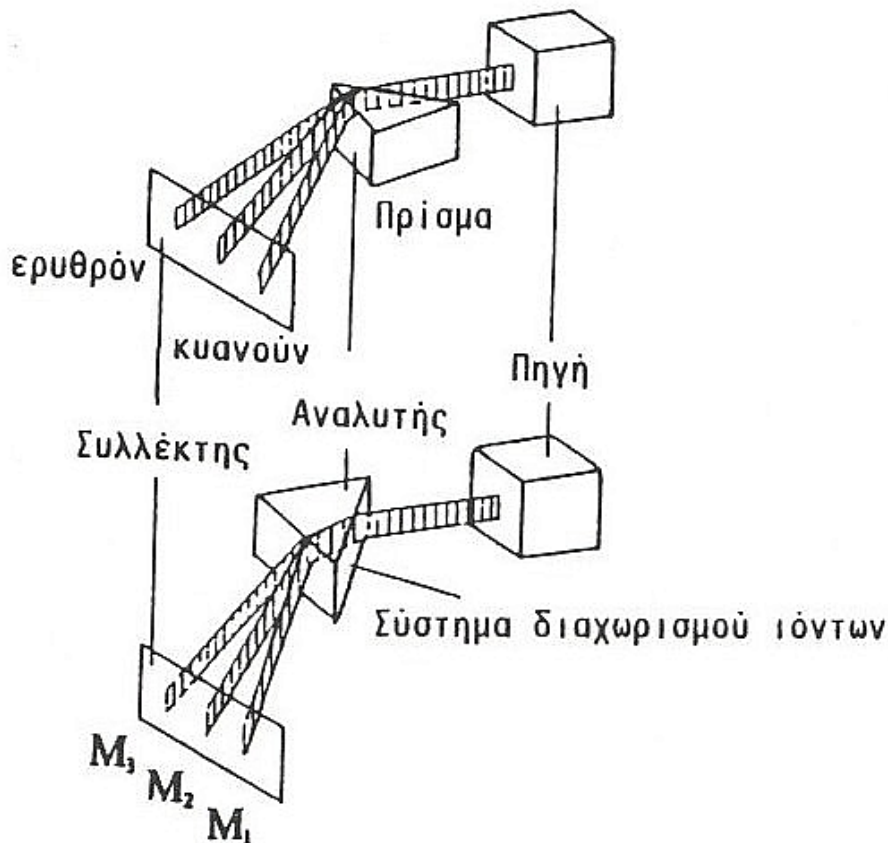
Για την δειγματοληψία των επί μέρους πιέσεων των συστατικών αερίων (και όχι μόνο) δειγμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν όργανα καταγραφής μερικών πιέσεων, όπως τετραπολικοί φασματογράφοι μάζας, μαγνητικοί φασματογράφοι μάζας και φασματογράφοι μάζας χρόνου πτήσεως. Τα ανωτέρω όργανα, συνιστούν μία πιο σύνθετη κατασκευή από τις κοινές πύλες ιονισμού που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των συνολικών πιέσεων σε χώρους όταν ολική πίεση μικρότερη από 10-5 mbar. (Στην περιοχή χαμηλού κενού (100 mbar - 10^{-3} mbar) η συνολική πίεση μπορεί να καταγραφεί με θερμοζεύγος (βιομηχανικοί χώροι) ή με πύλη pirani (καθαροί εργαστηριακοί χώροι).



Σχήμα 3-1. Αρχή καταγραφής συνολικής πίεσης: Χωρίς καταμέτρηση των επιμέρους συνιστωσών.



Σχήμα 3-2. Αρχή καταγραφής μερικών πιέσεων με φασματομετρία μαζών: Διαχωρισμός της επί μέρους σύστασης ή ταυτόχρονη ανίχνευση.



Σχήμα 3-3. Σύγκριση της οπτικής φασματοσκοπίας (άνω) με τη φασματομετρία μαζών (κάτω).

Η φασματομετρία μαζών (mass spectrometry) είναι μία μέθοδος που σχετίζεται με την ανίχνευση ηλεκτρικά φορισμένων σωματιδίων. Παρουσιάζει αντιστοιχία με την οπτική φασματοσκοπία (light spectroscopy) όπως φαίνεται και από το σχήμα 3-3. Η οπτική φασματοσκοπία χρησιμοποιεί το πρίσμα προκειμένου να διαχωριστεί μία δέσμη φωτός στα επί μέρους μήκη κύματος. Στην φασματομετρία μαζών, δημιουργούνται ιόντα (από μία πηγή), τα οποία οδηγούνται μέσα σε ένα σύστημα διαχωρισμού, που τα διαχωρίζει ανάλογα με την αναλογία μάζα / φορτίο (m/e). Ακολουθεί η διαδικασία ανίχνευσης των διαφόρων ιόντων η οποία μπορεί να γίνεται είτε διαδοχικά είτε ταυτόχρονα.

Στην συνέχεια, θα εξετάσουμε τον τετραπολικό φασματογράφο μαζών. Η διάταξη αυτή αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μορφή εργαστηριακού φασματογράφου.

3.2. Η αρχή λειτουργίας των τετραπολικών φίλτρων. Μια γενική περιγραφή.

Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών απαρτίζεται από το σύστημα μέτρησης, το οποίο στην συνέχεια θα αναφέρεται ως αναλυτής (analyzer) και τα όργανα ελέγχου και ενδείξεων.

ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΜΑΖΩΝ

Μίγμα αερίου	⇒	Πηγή ιόντων	Σύστημα διαχωρισμού Ιόντων	Ανίχνευση
m_1 m_2 ; ; m_n		$m_1 \rightarrow m_1^+$ $m_2 \rightarrow m_2^+$; ; $m_n \rightarrow m_n^+$	$m_n^{v+} / v.e$	I_n^{v+}

Σχήμα 3-4. Η σχηματική λειτουργία του αναλυτή.

Γενικά, τα μίγματα των αερίων απαρτίζονται από ουδέτερα σωματίδια (άτομα, μόρια). Το αέριο δείγμα που πρόκειται να αναλυθεί εισάγεται σε χώρο με συνολική πίεση μικρότερη των 10^{-5} mbar και κατευθύνεται προς την περιοχή που είναι τοποθετημένη η πηγή των ιόντων. Η πηγή αυτή μετατρέπει τα ουδέτερα σωματίδια σε ιόντα τα οποία μπορούν να υφίστανται την επίδραση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Τα φορτισμένα σωματίδια οδηγούνται προς το τμήμα διαχωρισμού (τετραπολικό φίλτρο μαζών). Στον χώρο αυτό εφαρμόζονται μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, τα οποία "φιλτράρουν" τα ιόντα. Συγκεκριμένοι συνδυασμοί πεδίων επιφέρουν σταθεροποιητικά αποτελέσματα στην κατεύθυνση της πορείας των ιόντων που περιγράφονται από δεδομένη αναλογία μάζας / φορτίου (m/e), επιτρέποντας έτσι την διέλευσή τους μέσα από το φίλτρο μαζών και την εν συνεχεία ανίχνευσή τους. Όλα τα υπόλοιπα ιόντα εξουδετερώνονται.

Το μετρούμενο ρεύμα ιόντων οφείλεται σε εκείνα τα ιόντα που ολοκληρώνουν την διέλευσή τους μέσα από το φίλτρο. Το μέγεθος αυτό καταγράφεται από μία διάταξη ανίχνευσης ιόντων, κατάλληλα επιλεγμένη για την κάθε εφαρμογή.

Στην συνέχεια, αναλύονται τα επί μέρους τμήματα ενός αναλυτή:

- Η πηγή ιόντων,
- Το τετραπολικό φίλτρο μαζών,
- Ο ανιχνευτής ιόντων.

3.2.1 Η πηγή ιόντων.

Είναι λογικό να ξεκινήσουμε την περιγραφή από την πηγή που δημιουργεί τα ιόντα. Όμως πριν από αυτό, είναι χρήσιμο να αναφερθούν τα απολύτως αναγκαία σε ατομικό και μοριακό επίπεδο.

3.2.1.1. Το ατομικό μοντέλο

Μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι τα άτομα αποτελούνται από τρία στοιχειώδη σωματίδια: Τα νετρόνια και τα πρωτόνια του πυρήνα και τα περιφερειακά ηλεκτρόνια. Η λέξη στοιχειώδη δηλώνει βασική επαναλαμβανόμενη δομή στην μάζα ενός ατόμου. Το μέγεθος των ανωτέρω σωματιδίων είναι τόσο μικρό ώστε πρακτικά είναι αδύνατον να το φαντασθούμε. Κατά συνέπεια δεν είναι λογικό να χρησιμοποιούμε τις κοινές μονάδες μέτρησης μαζών kg (χιλιόγραμμα) ή g (γραμμάρια). Η μάζα των ατόμων περιγράφεται με την βοήθεια του ατομικού μαζικού αριθμού (amu).

$$1 \text{ amu} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια έχουν μάζα περίπου 1 amu. Η μάζα για τα ηλεκτρόνια είναι περίπου 1800 φορές μικρότερη. Κατά συνέπεια, η μάζα των ηλεκτρονίων που ανήκουν σε ένα άτομο δεν συνεκτιμάται όταν εξετάζεται η μάζα των ατόμων, δεδομένου ότι το σύνολο της μάζας προέρχεται ουσιαστικά από τον πυρήνα. Για την περιγραφή που θα ακολουθήσει είναι χρήσιμο να υπενθυμίσουμε ορισμένες βασικές αρχές και ορισμούς.

Τα άτομα είναι ουδέτερα σωματίδια. (Συνολικό φορτίο = 0)

Ο πυρήνας συνίσταται από πρωτόνια και νετρόνια, που καλούνται νουκλεόνια.

Ο αριθμός των πρωτονίων στον πυρήνα ενός ατόμου ονομάζεται ατομικός αριθμός Z.

Ο αριθμός των νουκλεονίων καθορίζει τον μαζικό αριθμό.

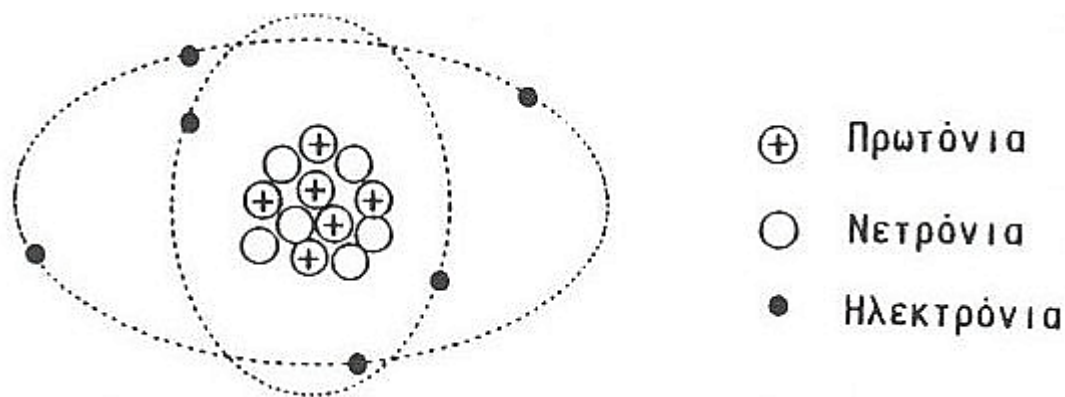
Άτομα που χαρακτηρίζονται από τον ίδιο ατομικό αριθμό συνιστούν το ίδιο χημικό στοιχείο.

Άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου μπορούν να εμφανίσουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων και ονομάζονται ισότοπα,

Τα ισότοπα έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό και διαφορετικό μαζικό αριθμό,

Στοιχεία τα οποία δεν εμφανίζουν ισότοπα ονομάζονται απλά στοιχεία,

Στοιχεία που εμφανίζουν ισότοπα ονομάζονται μικά στοιχεία.



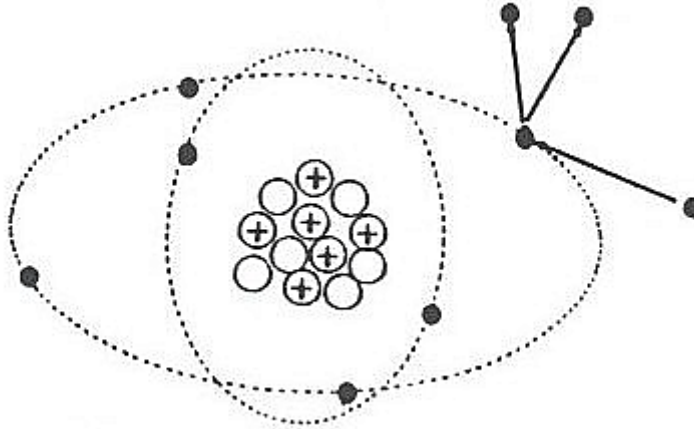
Σχήμα 3-5. Η απλοποιημένη δομή του ατόμου ^{12}C .

Με εξαίρεση τα ευγενή αέρια (που είναι μονοατομικά), όλα τα αέρια απαντώνται με την μορφή μορίων τα οποία απαρτίζονται από δύο ή περισσότερα άτομα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, το υδρογόνο, το άζωτο, και το οξυγόνο υπάρχουν στη φύση σαν διατομικά μόρια (H_2 , N_2 , O_2). Η ακόλουθη ανάλυση βασισμένη στο μοντέλο του ατόμου ισχύει επίσης και για τα μόρια.

3.2.1.2. Η διαδικασία ιονισμού.

Εφ' όσον σε κάθε πρωτόνιο αντιστοιχεί ένα ηλεκτρόνιο, το άτομο ή το μόριο, είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και δεν εκτρέπεται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία.

Όταν τα άτομα ή τα μόρια βομβαρδίζονται από ταχέως κινούμενα ηλεκτρόνια, τότε ένα ή και περισσότερα ηλεκτρόνια μπορούν να εξαχθούν από το σύστημα, (ή μπορεί και να συμβεί η αντίθετη φυσική διαδικασία, δηλαδή να εγχυθούν νέα ηλεκτρόνια). Στις περιπτώσεις αυτές, τα άτομα ή τα μόρια θα σχηματίσουν αντίστοιχα θετικά ή αρνητικά φορτισμένα ιόντα. Το σχήμα 3-6 δείχνει τον τρόπο δημιουργίας ενός θετικού ιόντος.

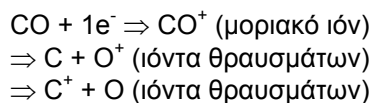


Σχήμα 3-6: Η απλή μορφή ιονισμού του ατόμου ^{12}C :
 $^{12}\text{C} + 1e^- \Rightarrow ^{12}\text{C}^+ + 2e^-$

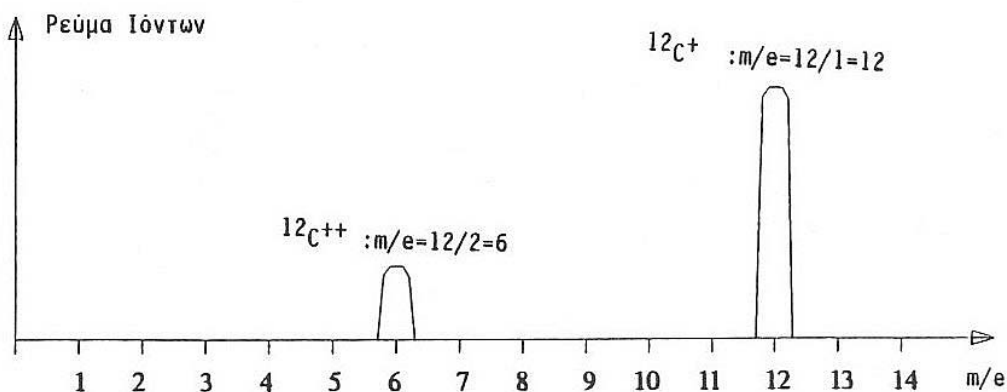
Το πρώην ουδέτερο σωματίδιο βρίσκεται τώρα σε τέτοια κατάσταση ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί. Στο παράδειγμα του σχήματος 3-6, ο $^{12}\text{C}^+$ εμφανίζει αναλογία $m/e = 12/1$ και κατά συνέπεια ανιχνεύεται στη θέση 12, ενώ για την περίπτωση $^{12}\text{C}^{++}$ ισχύει $m/e = 12/2$ οπότε εμφανίζεται στην θέση ανίχνευσης 6 της κλίμακας m/e , όπως παρουσιάζεται ποιοτικά και στο σχήμα 3-7. Κατά συνέπεια, τα ιόντα $^{12}\text{C}^+$ και $^{12}\text{C}^{++}$ δεν μπορούν να ανιχνευθούν ταυτόχρονα από το τετράπολο, επειδή χαρακτηρίζονται από διαφορετικές τιμές m/e .

Εδώ, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πρόσκρουση των ηλεκτρονίων μπορεί να καταλήξει σε θραύση των μορίων. Αυτός ο μηχανισμός ονομάζεται "κατάτμηση" (cracking). Τα θραύσματα που προκύπτουν ονομάζονται "προϊόντα κατάτμησης" και η κατανομή τους "μορφή κατάτμησης".

Παράδειγμα: Για το μόριο μονοξειδίου του άνθρακος,



Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, όσο πιο πολύπλοκα είναι τα αρχικά μόρια, τόσο περισσότερες είναι και οι μορφές των ιόντων που αναμένονται να ανιχνευθούν. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτούνται ιδιαίτερες γνώσεις και χρησιμοποίηση βάσεων δεδομένων που έχουν δημιουργηθεί ειδικά για την ορθή ερμηνεία των λαμβανομένων αποτελεσμάτων.



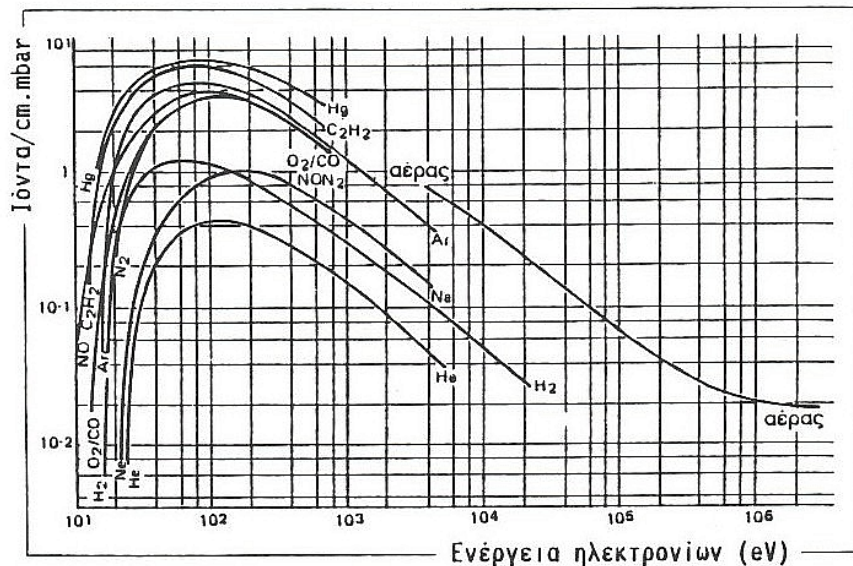
Σχήμα 3-7. Η θέση για το απλά και το διπλά ιονισμένο ιόν άνθρακος σε κλίμακα m/e .

3.2.1.3. Η απαιτούμενη δυναμική ενέργεια των ηλεκτρονίων.

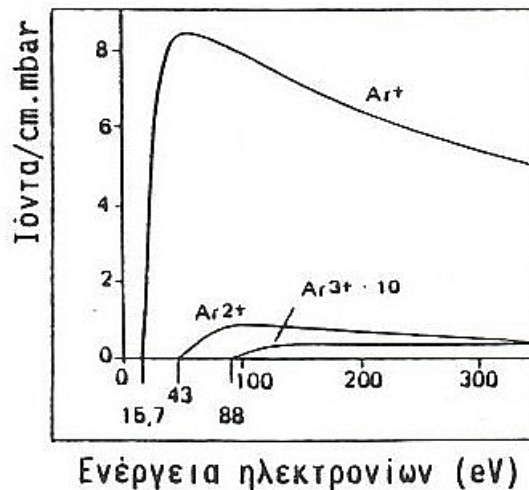
Η ενέργεια των προσπιπόντων ηλεκτρονίων επιδρά πολύ έντονα και στην ποσότητα αλλά και στο είδος των ιόντων που παράγονται (Σχήμα 3-8). Ο ιονισμός αρχίζει να λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένη

ελάχιστη τιμή για την κάθε ουσία. Ο αριθμός των παραγομένων ιόντων (λόγω της πρόσκρουσης των ηλεκτρονίων) αρχικά αυξάνεται με την ενέργεια των ηλεκτρονίων, φθάνει στο μέγιστο για τιμές ενέργειας μεταξύ 50 και 150 eV (ανάλογα με τον τύπο του αερίου) και στην συνέχεια ελαττώνεται βραδέως. Για υψηλότερες τιμές ενέργειας δημιουργούνται πολλαπλά φορτισμένα ιόντα (Σχήμα 3-9). Προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη δυνατή απόδοση, και κατά συνέπεια η βέλτιστη ευαισθησία του οργάνου, χρησιμοποιούνται ενέργειες γύρω στα 100eV.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο όρος "διαφορικός ιονισμός", ο οποίος υπεισέρχεται στα σχήματα 3-8 και 3-9, και ουσιαστικά παρέχει τον αριθμό των παραγομένων ιόντων από ένα ηλεκτρόνιο κατά μήκος διαδρομής 1 cm, για σταθερή θερμοκρασία του αερίου και πίεση 1 mbar.



Σχήμα 3-8. Ο διαφορικός ιονισμός σε συνάρτηση με την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων για συνήθη αέρια,



Σχήμα 3-9. Η παραγωγή διαφορετικών τύπων ιόντων σε συνάρτηση με την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων σε αργό, Ar.

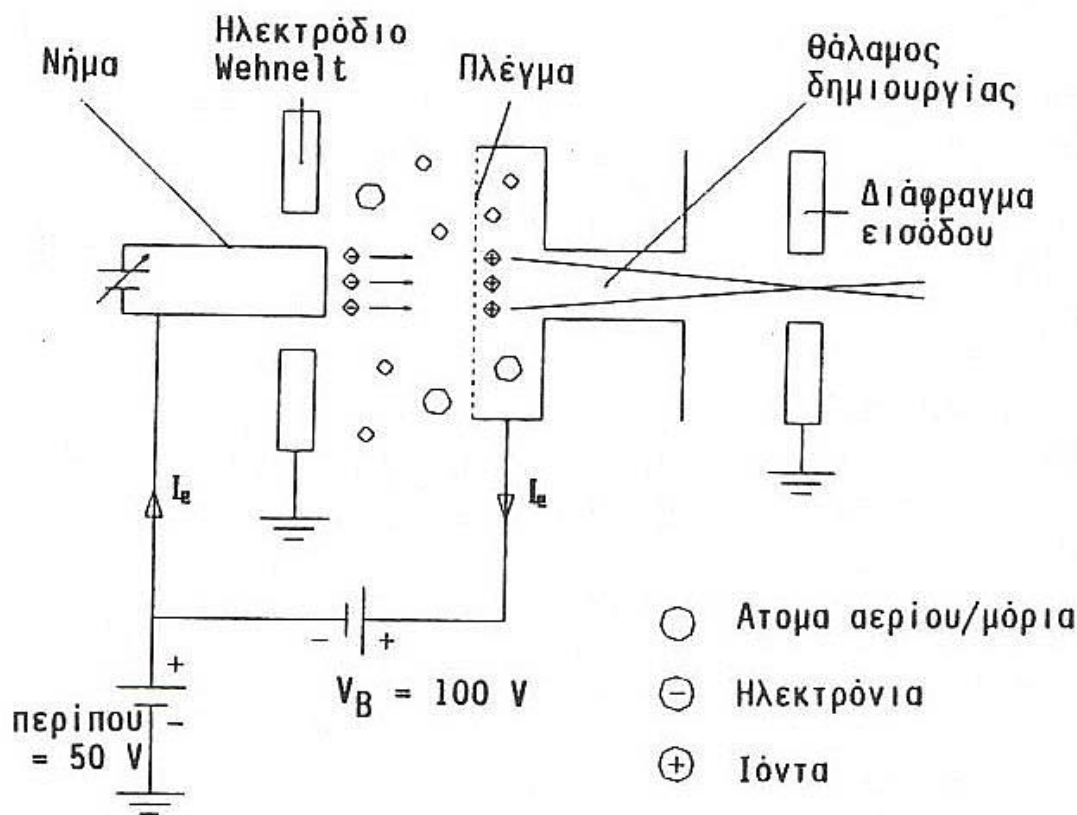
3.2.1.4. Η πηγή ιόντων αξονικής δέσμης.

Θα συνοψίσουμε την σχεδίαση και λειτουργία της πηγής ιόντων και διαδικασίας ιονισμού χρησιμοποιώντας την απλούστερη μορφή πηγής, βασισμένη σε ενεργά ηλεκτρόνια. Το σχήμα 3-10 δίνει το διάγραμμα της ιοντικής πηγής που χρησιμοποιεί το τετράπολο που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων του εξαφθοριούχου θείου.

Περιγραφή της λειτουργίας:

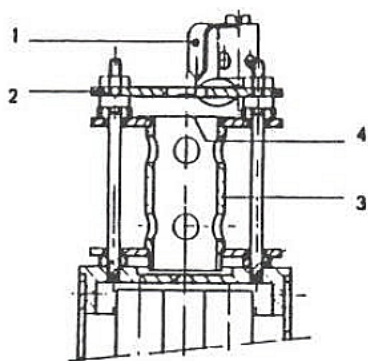
Το δύστηκτο νήμα θερμαίνεται και εκπέμπει ηλεκτρόνια τα οποία εστιάζονται από ένα ηλεκτρόδιο Wehnell. Στην συνέχεια επιταχύνονται προς το πλέγμα με την εφαρμογή ενός δυναμικού U_B , όπου φθάνουν με κινητική ενέργεια 100 eV. Η διαδικασία του ιονισμού που μας ενδιαφέρει πρωταρχικά, λαμβάνει χώρα σε ένα θάλαμο στην άμεση γειτονία του πλέγματος. Τα δημιουργούμενα ιόντα κινούνται ευθύγραμμα και εξέρχονται από τον θάλαμο (αφού πρώτα εστιαστούν κατά κάποιον τρόπο διερχόμενα από το διάφραγμα με τάση περίπου -150 V), και στην συνέχεια εγχέονται προς το μαζικό φίλτρο (το οποίο δεν δείχνεται στο σχήμα).

Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο κενό, αφού ολοκληρώσουν τον σκοπό τους, συλλέγονται από το πλέγμα και ρέουν πίσω προς το νήμα κλείνοντας τον ηλεκτρικό βρόχο. Έτσι συμπληρώνεται το κύκλωμα της εκπομπής.



Σχήμα 3-10. διάταξη λειτουργίας ιοντικής πηγής αξονικής δέσμης.

Ο χαρακτηρισμός "αξονική δέσμη" για την ιοντική πηγή προέρχεται από το γεγονός ότι η ηλεκτρονική δέσμη και η πορεία εξαγωγής των ιόντων βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Το σχήμα 3-11 δείχνει την τομή για μία διάταξη ιοντικής πηγής αξονικής δέσμης. Υπάρχει μία ποικιλία ιοντικών πηγών οι οποίες όμως έχουν σχεδιασθεί έτσι ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις των διαφόρων εφαρμογών και για τον λόγο αυτό δεν θα αναφερθούν επί του παρόντος.



- 1 Νήμα
- 2 Ηλεκτρόδιο Wehnelt
- 3 Θάλαμος δημιουργίας ιόντων
- 4 Πλέγμα

Σχήμα 3-11. Τομή ιοντικής πηγής αξονικής δέσμης και μέρη που την απαρτίζουν.

3.2.1.5. Τα υλικά του νήματος και των ηλεκτρικών συνδέσεων.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του νήματος πυρακτώσεως είναι συνήθως ρήνιο (Re), βολφράμιο (W), και ιρίδιο με επικάλυψη από διοξείδιο του θορίου (Ir-ThO_2). Η κάθε εφαρμογή απαιτεί την κατάλληλη επιλογή υλικού.

Νήματα από ρήνιο χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό των μερικών πιέσεων στην περιοχή του υψηλού κενού επειδή δεν σχηματίζουν σταθερά καρβίδια όπως συμβαίνει στην περίπτωση του βολφραμίου. Ένα άλλο πλεονέκτημα των νημάτων ρηνίου, σε σχέση με το βολφράμιο, είναι ότι το ρήνιο δεν γίνεται εύθραυστο με ανακρυστάλλωση λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών, πράγμα που συμβαίνει στο βολφράμιο.

Μειονέκτημα για το ρήνιο αποτελεί το γεγονός ότι η πίεση των ατμών του είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή του βολφραμίου, για το ίδιο ρεύμα εκπομπής. Κατά συνέπεια, τα νήματα βολφραμίου προτιμώνται στην περιοχή UHV δηλαδή στην περιοχή των πιέσεων που η πίεση του ρηνίου επηρεάζει την συνολική πίεση του χώρου. Λόγω της χαμηλής πίεσης ατμών, τα νήματα βολφραμίου χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Επομένως, οι ιοντικές πηγές πλέγματος για λειτουργία σε UHV συνεργάζονται μόνον με νήματα βολφραμίου.

Νήματα που απαρτίζονται από ιρίδιο με επικάλυψη διοξειδίου θορίου χρησιμοποιούνται μόνο στις εφαρμογές που υπάρχουν ξαφνικές εισοδοι αερίων δεδομένου ότι το ιρίδιο δεν σχηματίζει οξειδία και δεν καταστρέφεται με ανακρυσταλλώσεις. Η θερμοκρασία λειτουργίας των νημάτων αυτών είναι σημαντικά χαμηλότερη από ότι στην περίπτωση των καθαρών μετάλλων, λόγω της σημαντικής μείωσης στο συνολικό έργο εξόδου του υλικού του νήματος (που προέρχεται από την χαμηλή τιμή που χαρακτηρίζει το υλικό της επιφάνειας).

Οι αγώγιμες συνδέσεις τροφοδοσίας στο τετράπολο οφείλουν να εναλλάσσονται ανάλογα με την εφαρμογή. Για την περίπτωση μελέτης αερίων που περιλαμβάνουν κατά τον ιονισμό παράγωγα με βάση το θείο, το καταλληλότερο υλικό για να αποφευχθούν αλληλεπιδράσεις είναι το νικέλιο δεδομένου ότι είναι χημικώς αδρανές ως προς το θείο.

Τα υπόλοιπα μεταλλικά μέρη του τετραπόλου αποτελούνται από ανοξειδωτο χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ οι μονώσεις απαρτίζονται από κεραμικά τα οποία μετά από καθαρισμούς έχουν θερμανθεί μέχρι 2000°C σε περιβάλλον κενού ώστε να γίνει αποβολή των εγκλεισμένων ακαθαρσιών από το μονωτικό υλικό.

3.2.2. Το τετραπολικό φίλτρο μαζών.

Ο διαχωρισμός των διαφόρων ιόντων με βάση την αναλογία m/e επιτυγχάνεται με βάση ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Όταν δεν χρησιμοποιούνται μαγνητικά πεδία για την πραγματοποίηση του φίλτρου

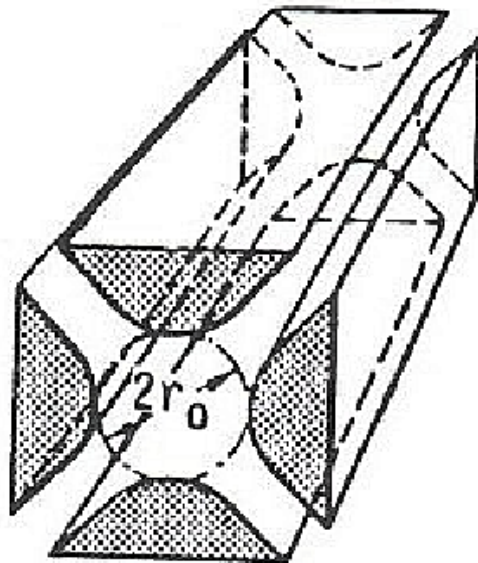
μαζών, πρέπει να χρησιμοποιούνται μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (RF).

Τα μαγνητικά τετράπολα, αν και χρησιμοποιούνται σε άλλου είδους εφαρμογές, εν τούτοις σπάνιως χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των μερικών πιέσεων. Ο RF τετραπολικός φασματογράφος μαζών χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κάλυψη μετρήσεων μερικών πιέσεων.

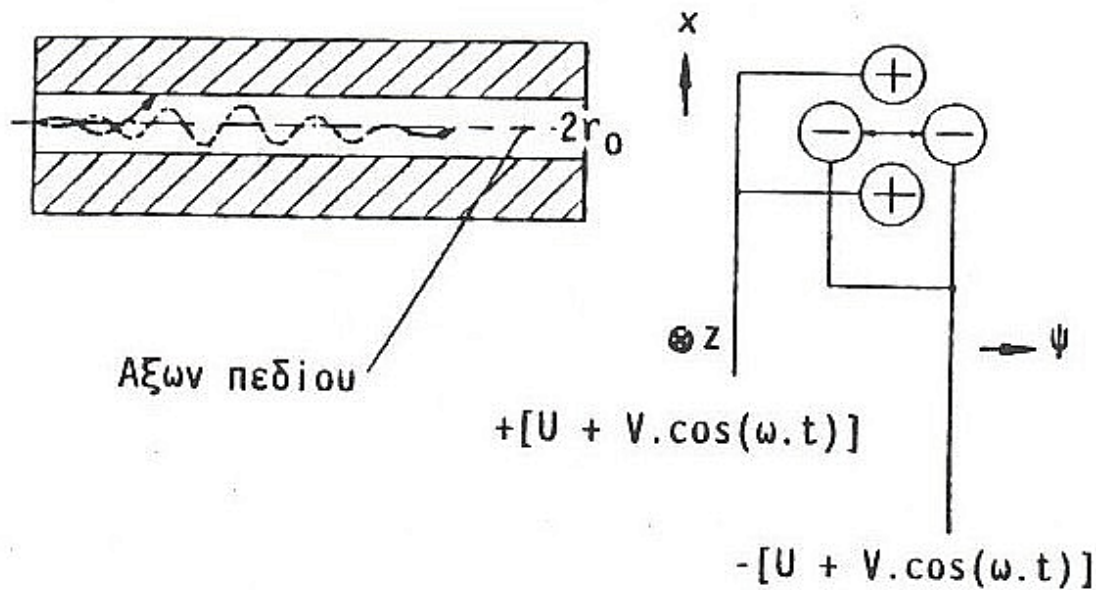
3.2.2.1. Ο τετραπολικός φασματογράφος μαζών.

Τα ιόντα μπορούν να διαχωρισθούν ανάλογα με την τιμή του λόγου "μαζικός αριθμός / φορτίο" σε ένα RF ηλεκτρικό τετραπολικό πεδίο, το οποίο στην ιδανική περίπτωση παράγεται από τέσσερις ράβδους υπερβολικής διατομής τοποθετημένες σε σταθερές ελάχιστες αποστάσεις, $2r_0$, μεταξύ των κυρτών τους επιφανειών (Σχήμα 3-12). Επειδή η κατασκευή υπερβολικών ηλεκτροδίων είναι δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία, στην πράξη α υπερβολικές επιφάνειες αντικαθίστανται από κυλινδρικές ράβδους οι οποίες απέχουν μεταξύ τους κατά $2r_0$ και έχουν ακτίνα κατασκευής $1,144r_0$. Το πεδίο που προκύπτει από την νέα γεωμετρία προσομοιώνει με ικανοποιητική ακρίβεια το ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ υπερβολικών ηλεκτροδίων που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $2r_0$. Οι απέναντι τοποθετημένες ράβδοι είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες. Το δυναμικό που εφαρμόζεται πάνω σε αυτά τα ηλεκτρόδια είναι εναλλασσόμενο RF, της μορφής $V \cdot \cos(\omega \cdot t)$ και υπερτίθεται σε συνεχή τάση U , όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-13.

Όταν τα ιόντα εισέλθουν στο σύστημα διαχωρισμού, ταλαντώνονται κατά μήκος του άξονα του τετραπόλου λόγω της ύπαρξης του εναλλασσόμενου δυναμικού (Σχήμα 3-13). Για προκαθορισμένες τιμές των παραμέτρων V , U , ω , r_0 του πεδίου, μόνον τα ιόντα δεδομένης μάζας ή πιο συγκεκριμένα δεδομένου εύρους μαζών μπορούν να διαπεράσουν το μαζικό φίλτρο. Όλα τα άλλα ιόντα οδηγούνται σε πορεία εκτός του άξονα του πεδίου.



Σχήμα 3-12. Γεωμετρική μορφή του τετραπολικού φίλτρου μαζών.



Σχήμα 3-13. Η κίνηση των ιόντων στο εσωτερικό του φίλτρου και η ηλεκτρική τροφοδοσία της διάταξης.

3.2.2.2. Η αναλυτική περιγραφή για την πορεία των ιόντων στην περιοχή του τετραπολικού φίλτρου.

Το δυναμικό, Φ , στον άξονα του τετραπόλου μπορεί να περιγραφεί σε σύστημα Καρτεσιανών συντεταγμένων από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Phi = \Phi_0 (\alpha x^2 + \beta \psi^2 + \gamma z^2) \quad (1)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση Laplace θα πρέπει να ισχύει $\alpha + \beta + \gamma = 0$. Λαμβάνοντας τους άξονες όπως φαίνεται στο σχήμα 3-13, και επειδή δεν υπάρχει πεδίο κατά μήκος του άξονα των Z. θα ισχύουν οι ακόλουθες οριακές συνθήκες:

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_0, \text{ για } x=0 \quad \text{και } \psi = +r_0 \\ \Phi &= \Phi_0, \text{ για } x = +r_0 \quad \text{και } \psi = 0 \end{aligned}$$

όπου, $\Phi_0 = U + V \cdot \cos(\omega \cdot t)$

Μετά από αντικατάσταση προκύπτει ότι, $\alpha = 1/r_0^2$, $\beta = -1/r_0^2$, και $\gamma = 0$, οπότε η εξίσωση για το δυναμικό του τετραπόλου, γίνεται:

$$\Phi = [U + V \cdot \cos(\omega t)] \cdot \{(x^2 - \psi^2)/r_0^2\} \quad (2)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί τώρα να προσδιορισθεί με παραγωγίσεις,

$$E_x = \frac{-\partial\Phi}{\partial x} = \frac{-2}{r_0^2} \cdot \{U + V \cdot \cos(\omega t)\} \cdot x$$

$$E_\psi = \frac{-\partial\Phi}{\partial\psi} = \frac{+2}{r_0^2} \cdot \{U + V \cdot \cos(\omega t)\} \cdot \psi \quad (3)$$

$$E_z = \frac{-\partial\Phi}{\partial z} = 0$$

Οι δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση των απλά φορτισμένων θετικών ιόντων λαμβάνουν τη μορφή των ακόλουθων σχέσεων:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = e \cdot E_x = \frac{-2e}{r_0^2} \cdot \{U + V \cdot \cos(\omega t)\} \cdot x$$

$$m \cdot \frac{d^2\psi}{dt^2} = e \cdot E_\psi = \frac{+2e}{r_0^2} \cdot \{U + V \cdot \cos(\omega t)\} \cdot \psi \quad (4)$$

$$m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = e \cdot E_z = 0$$

Οι δύο πρώτες εξισώσεις περιγράφουν ταλαντώσεις ιόντων μετά από την επίδραση μιας περιοδικά μεταβαλλόμενης δύναμης. Οι συνεχείς συνιστώσες του πεδίου κατά τον άξονα των x προκαλούν εστίαση στην κίνηση των ιόντων, ενώ οι συνιστώσες κατά τον άξονα των y προκαλούν απόκλιση στη δέσμη ιόντων που ολισθαίνουν με σταθερή ταχύτητα. Κατά την διεύθυνση του άξονα των z , τα ιόντα εμφανίζουν σταθερή ταχύτητα.

Η διαφορική εξίσωση της δυναμικής των ιόντων εμπίπτει στην γενικότερη μορφή της διαφορικής εξίσωσης του Mathieu, υπό την προϋπόθεση ότι γίνονται οι ακόλουθοι μετασχηματισμοί:

$$\omega t = 2\xi, \quad a = \frac{8 \cdot e \cdot U}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2}, \quad q = \frac{4 \cdot e \cdot V}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega^2} \quad (5)$$

Στην περίπτωση αυτή, οι εξισώσεις Mathieu δίδουν,

$$\frac{d^2x}{d\xi^2} + \{a + 2.q.\cos(2\xi)\}.x = 0$$

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} - \{a + 2.q.\cos(2\xi)\}.\psi = 0$$

(6)

$$\frac{d^2z}{d\xi^2} = 0$$

Οι λύσεις των εξισώσεων αυτών είναι απλές και μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες. Για την πρώτη κατηγορία λύσεων π.χ. όταν το ξ (επομένως και το t) τείνει στο άπειρο, οι τιμές για τα x και ψ είναι σαφώς καθορισμένες και οι λύσεις χαρακτηρίζονται σαν "ευσταθείς". Για τη δεύτερη κατηγορία λύσεων, είτε οι τιμές του x είτε οι τιμές του ψ , είτε αμφότερες, εκτείνονται χρονικά σε όλες τις κατευθύνσεις και χαρακτηρίζονται σαν "ασταθείς". Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται σε διάγραμμα $a-q$ όπως φαίνεται στο σχήμα 3-14. Για τα ζεύγη τιμών που βρίσκονται στη γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχούν οι ευσταθείς λύσεις. Με δεδομένες τις τιμές για τα r_0 , ω , U και V , οι ποσότητες για τα a , q , μπορούν να αντιστοιχηθούν με τιμές του λόγου m/e κάνοντας χρήση των σχέσεων μετασχηματισμού (6).

Επίσης, από τους μετασχηματισμούς αυτούς, συνεπάγεται ότι ο λόγος a/q δεν επηρεάζεται από την μάζα των ιόντων, την μεταξύ των ηλεκτροδίων ή την συχνότητα του επιβαλλόμενου πεδίου. Η γραμμή λειτουργίας ενός τετραπόλου προσδιορίζεται από την τιμή του λόγου $2U/V =$ σταθερά, δεδομένου ότι η γραμμή αυτή διέρχεται πάντοτε από την αρχή των αξόνων.

Για ένα τετράπολο που περιγράφεται από το r_0 και λειτουργεί με σταθερή συχνότητα, ω , και δεδομένη αναλογία U/V , μπορεί να προσδιορισθεί το εύρος μαζών, ΔM , για ευσταθή μεταφορά μέσα από το τετράπολο (ανώτερη τιμή q_1 , κατώτερη τιμή q_2). Στην περίπτωση αυτή, η γραφική απεικόνιση των λύσεων των Δ.Ε. Mathieu οδηγεί σε δύο σημαντικές διαπιστώσεις:

- 1) Όσο μεγαλώνει η κλίση της γραμμής λειτουργίας, (αύξηση της τιμής U/V) τόσο μειώνεται το εύρος ευσταθών μαζών, ΔM .
- 2) Σύμφωνα με το διάγραμμα των λύσεων, υπάρχουν δύο ακραίες περιπτώσεις:
 - 2.α Η γραμμή λειτουργίας διέρχεται από το ανώτατο σημείο του χώρου ευστάθειας (δηλαδή $a/q = 2U/V = 0,23699/0,706$ οπότε $U/V = 0,16784$), και
 - 2.β Η γραμμή λειτουργίας για το a , και συνεπώς και για το U , συμπίπτει με τον οριζόντιο άξονα των q .

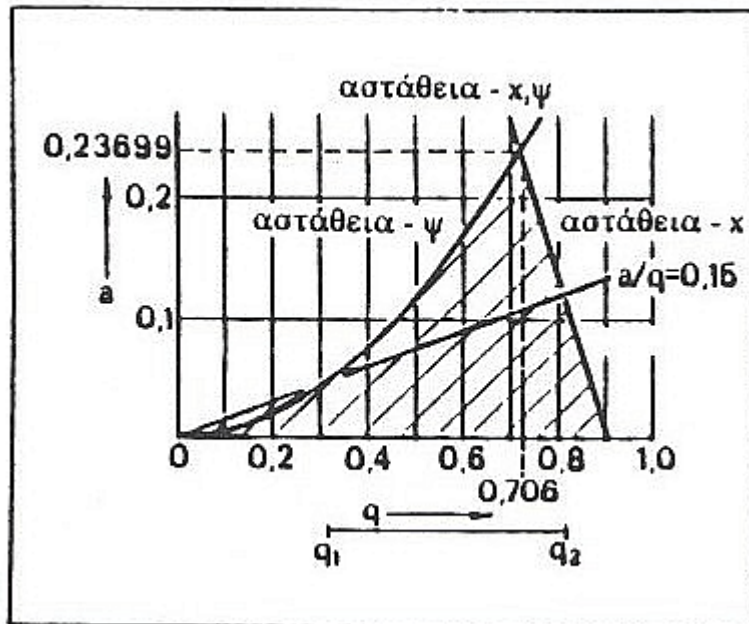
Εις μιν την περίπτωση 2.α ο λόγος $m/\Delta m$ (διακριτική ικανότητα) τείνει στο άπειρο, εις δε την περίπτωση 2.β πρακτικά δεν υπάρχει συνεχής συνιστώσα τάσης ($U=0$) οπότε το τετράπολο συμπεριφέρεται σαν υπεραυτό φίλτρο στο οποίο όλα τα ιόντα με $q < 0,905$ είναι ευσταθή. Το εύρος ευστάθειας γίνεται τώρα,

$$\frac{4.e.V}{0,905.r_0^2.\omega^2} < m < \infty \quad (7)$$

Με διαδοχική μείωση του όρου ω^2 όλο και μεγαλύτερες μάζες θα γίνονται ασταθείς. Αυτός ο ρυθμός λειτουργίας του τετραπόλου αξιοποιείται σε συγκεκριμένες μόνον εφαρμογές.

Αναφέρεται επίσης ότι το μέγιστο εύρος των ταλαντώσεων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά καθώς προσεγγίζονται τα όρια ευστάθειας στο διάγραμμα. Επειδή η διαδικασία του διαχωρισμού γίνεται σε χωρικά περιορισμένο πεδίο ($2r_0$), το εύρος ταλαντώσεως των ευσταθών ιόντων δεν θα πρέπει μόνον να είναι πεπερασμένο, αλλά θα πρέπει να είναι μικρότερο από την τιμή κατωφλίου που καθορίζεται

από τους γεωμετρικούς περιορισμούς του πεδίου. Υπάρχουν συνεπώς ιόντα τα οποία θεωρητικά έπρεπε να διαπερνούν το φίλτρο, αλλά στην πράξη αποκόπτονται.



Σχήμα 3-14. Διάγραμμα ευστάθειας της διαφορικής εξίσωσης Mathieu.

Από την άλλη πλευρά, τα ιόντα θα πρέπει να παραμείνουν στο πεδίο διαχωρισμού για αρκετό αριθμό περιόδων έτσι ώστε να επαυξηθεί το εύρος ταλαντώσεων των ασταθών ιόντων και να γίνει εφικτός ο διαχωρισμός τους. Το μέγιστο δυναμικό επιτάχυνσης των ιόντων κατά την αξονική κατεύθυνση προκαθορίζεται από αυτόν τον περιορισμό και δίνεται από την σχέση:

$$U_{Bmax} \cong 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot \nu^2 \cdot L^2 \cdot m \cdot \left(\frac{\Delta m}{m} \right) \quad (\text{volts}) \quad (8)$$

όπου, ν είναι η συχνότητα σε MHz, L το μήκος του τετραπολικού συστήματος σε cm, $m/\Delta m$ η διακριτική ικανότητα, και m , ο μαζικός αριθμός για το ευσταθές ιόν που διέρχεται από το φίλτρο.

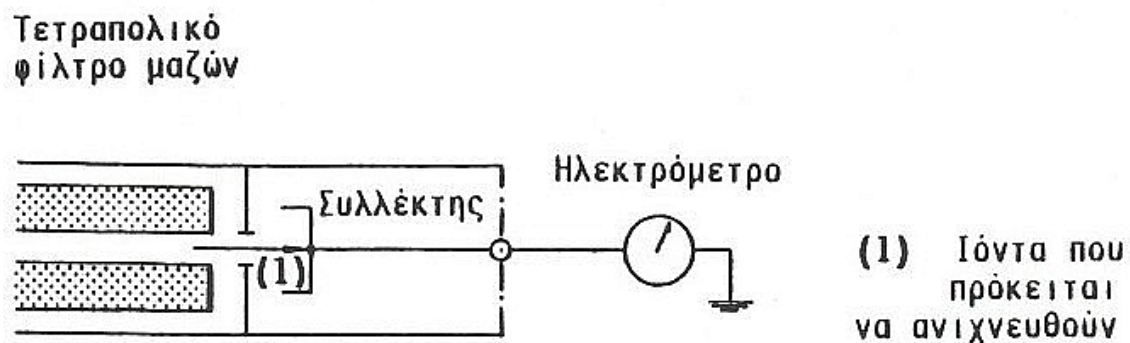
Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της αρχής λειτουργίας ενός τετραπόλου είναι τα εξής: Ο τετραπολικός διαχωριστής μαζών είναι ένα ευσταθές ανιχνευτικό σύστημα. Από τα ιόντα που εισέρχονται στο τετράπολο μόνον αυτά που έχουν δεδομένη τιμή e/m θα ταλαντωθούν σε σταθερή τροχιά με μέγιστο εύρος μικρότερο του r_0 . Η τιμή για το e/m εξαρτάται από την γεωμετρία (r_0) και τις ηλεκτρικές συνθήκες λειτουργίας (ν , U , V). Έτσι, τα ιόντα που διέρχονται μέσα από το φίλτρο διαχωρισμού μπορούν να ανιχνεύονται. Ιόντα με διαφορετικές αναλογίες e/m εμφανίζουν τροχιές με διαδοχικά αυξανόμενο εύρος ταλαντώσεων, έως ότου προσκρούσουν στα μεταλλικά ηλεκτρόδια και εκφορτισθούν. Λόγω αυτής της συμπεριφοράς τα τετράπολα συχνά αναφέρονται και σαν "φίλτρα μαζών".

4.2.3. Ο ανιχνευτής ιόντων.

4.2.3.1 Ο συλλέκτης Faraday.

Τα ιόντα που θα κατορθώσουν να διαπεράσουν το φίλτρο μαζών, ανιχνεύονται ηλεκτρικά. Η μέθοδος ανίχνευσης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την ευαισθησία του οργάνου και την ταχύτητα καταγραφής που απαιτεί η κάθε εφαρμογή.

Η απλούστερη μορφή ανιχνευτή είναι ο συλλέκτης Faraday. Χαρακτηρίζεται από το χαμηλότερο ποσοστό συστηματικών σφαλμάτων, και λειτουργεί με βάση την αρχή ότι τα ιόντα που προσκρούουν στον συλλέκτη θα αποδίδουν τα φορτία τους. Τα επαγόμενα ιοντικά ρεύματα μετατρέπονται σε κατάλληλα σήματα από ένα ευαίσθητο και (όποτε είναι εφικτό) γρήγορο μετατροπέα ρεύματος / τάσης (ηλεκτρόμετρο). Η τάση αυτή χρησιμοποιείται στην συνέχεια σαν ένδειξη της μερικής πίεσης (Σχήμα 3-15).



Σχήμα 3-15. Η αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή Faraday.

3.2.3.2. Δευτερογενής πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων (SEM).

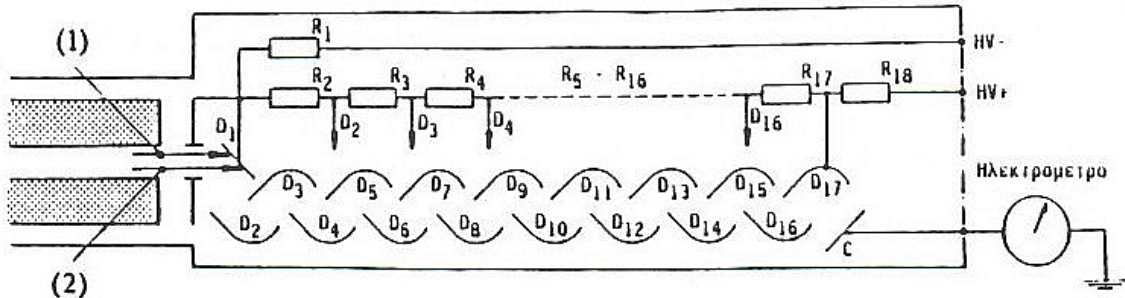
Όταν τα ιοντικά ρεύματα είναι εξαιρετικά ασθενή, (χαμηλότερα από 10^{-14} A), ή όταν απαιτούνται εξαιρετικά γρήγορες μετρήσεις, χρησιμοποιείται σαν πρόσθετη ενισχυτική διάταξη το ανοικτό SEM (Secondary Electron Multiplier). Η γεωμετρία της διάταξης αυτής φαίνεται στο σχήμα 3-16.

Τα ιόντα που πρόκειται να ανιχνευθούν, επιταχύνονται εκ νέου με ένα υψηλό δυναμικό αποκτώντας ενέργειες αρκετών χιλιάδων eV (keV), και στην συνέχεια προσκρούουν στην λεγόμενη δυνόδο μετατροπής (conversion dynode D1). Εκεί απελευθερώνουν ηλεκτρόνια, τα οποία πολλαπλασιάζονται με μία καταρρακτώδη μορφή (cascade) κατά τα διάφορα στάδια ενίσχυσης των δυνόδων. Το λαμβανόμενο κέρδος μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλό, από 10^4 μέχρι και πάνω από 10^8 . Αυτή η υψηλή ενίσχυση καθιστά αυτόν τον τύπο ανιχνευτή εξαιρετικά γρήγορο. Μία χαρακτηριστική ιδιότητα του SEM είναι ότι το σήμα ανίχνευσης προέρχεται από ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτία) και όχι ιόντα (θετικά φορτία) όπως γίνεται στην κλασική περίπτωση ενός ανιχνευτή Faraday.

Η παραγωγή μαλακών ακτίνων-χ, λοιπών φωτονίων, καθώς και άλλων διηγεμένων ουδετέρων σωματιδίων εισάγει στο περιβάλλον μέσον ρεύματα θορύβου που προέρχονται από την απελευθέρωση ηλεκτρονίων στο SEM. Η καθαρή οπτική διαδρομή μέσα στο τετραπολικό μαζικό φίλτρο (μεταξύ του διαφράγματος εισόδου και εξόδου) δεν συνεισφέρει καθόλου στην ελαχιστοποίηση του θορύβου πάνω στα σήματα των μετρήσεων. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος αυτός, ο ανιχνευτής σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι "οπτικά πυκνός", δηλαδή η είσοδος για το SEM να σχηματίζει γωνία 90° με το σύστημα των δυνόδων. Τα ιόντα που επιθυμούμε να ανιχνευθούν θα πρέπει να εκτραπούν κατά την κατεύθυνση της καμπής, (π.χ. με την χρησιμοποίηση ενός ηλεκτροστατικού πεδίου) πριν να εισέλθουν στην περιοχή των δυνόδων (Σχήμα 3-17). Τα υπόλοιπα ανεπιθύμητα σωματίδια πορεύονται ευθύγραμμα και συλλέγονται από το γειωμένο ηλεκτρόδιο. Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει την ανίχνευση ιδιαίτερα χαμηλών μερικών πιέσεων.

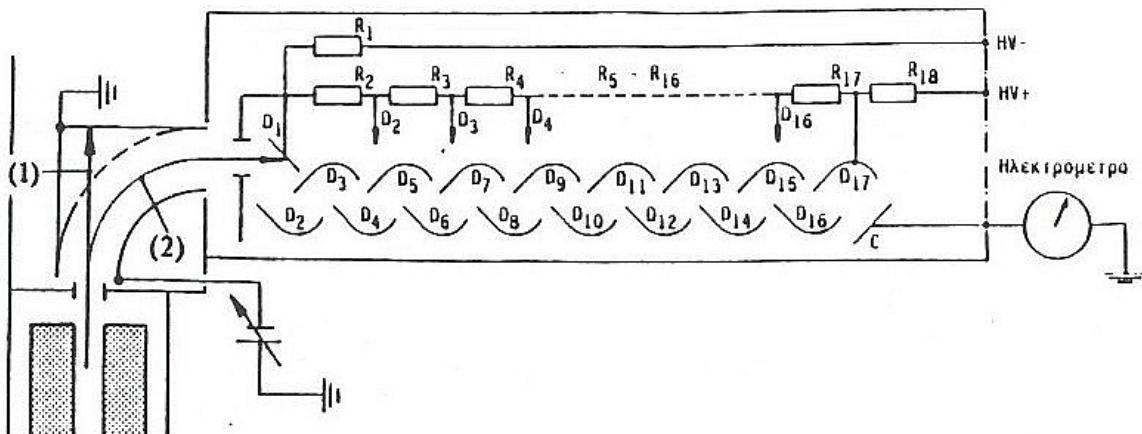
Επίσης, η συγκεκριμένη γεωμετρία επιτρέπει την εφαρμογή δύο διαφορετικών μεθόδων ανίχνευσης:

- 1) Τη χρησιμοποίηση του SEM, πράγμα που προϋποθέτει την ύπαρξη τροφοδοσίας υψηλής τάσης (HV) προκειμένου να εκτρέπονται τα ιόντα προς την δύνοδο μετατροπής D1.
- 2) Τη χρήση συλλέκτη Faraday για εφαρμογές ισχυρών σημάτων, (οπότε προϋπόθεση είναι η απουσία τροφοδοσίας HV). Στην περίπτωση αυτή, τα ιόντα πορεύονται όλα ευθύγραμμα και προσκρούουν στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο από το οποίο γίνεται η ανίχνευση των ιοντικών ρευμάτων με τη χρήση ηλεκτρομέτρου.



Ri Αντιστάσεις καταμερισμού της υψηλής τάσης (HV), Di δύνοδοι, C συλλέκτης, (1) διηγεργμένα ουδέτερα σωματίδια και μαλακές ακτίνες-x, (2) ιόντα που πρόκειται να ανιχνευθούν.

Σχήμα 3-16. Η αρχή λειτουργίας ενός αξονικού SEM.



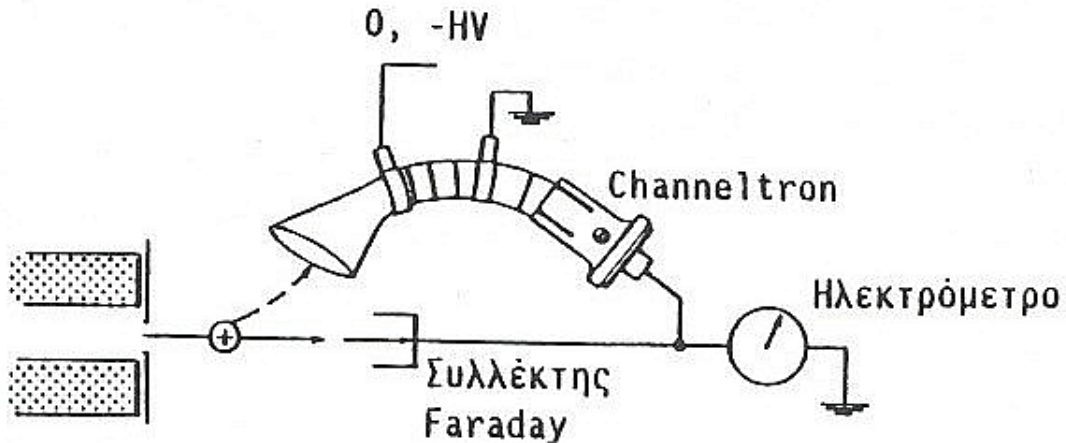
Ri Αντιστάσεις καταμερισμού της υψηλής τάσης (HV), Di δύνοδοι, C συλλέκτης, (1) διηγεργμένα ουδέτερα σωματίδια και μαλακές ακτίνες-x, (2) ιόντα που πρόκειται να ανιχνευθούν.

Σχήμα 3-17. Η αρχή λειτουργίας ενός εγκάρσιου SEM.

3.2.3.3 Το συνεχές SEM, "Channeltron"TM

Τα SEM που προαναφέρθηκαν απαρτίζονται από διακριτά στοιχεία. Υπάρχει όμως και το συνεχές SEM. Ονομάζεται συνεχές επειδή το φαινόμενο του καταρακτώδους κέρδους δεν αναπτύσσεται σε σειρά διακριτών δυνόδων με τους αντίστοιχους καταμερισμούς τάσεων, αλλά κατά μήκος ενός καθορισμένου υμένα χαμηλής αγωγιμότητας ο οποίος έχει προσκολληθεί στο εσωτερικό τοίχωμα ενός καμπύλου υάλινου σωλήνα. Το σχήμα 3-18 παρέχει την σχεδίαση ενός συνεχούς SEM, το οποίο είναι

γνωστό και με την εμπορική ονομασία "Channeltron". που καθιερώθηκε από την εταιρεία Galileo Electro-Optics Corp., USA που το κατασκεύασε αρχικά. Η γεωμετρική διάταξη του σχήματος 3-18 αποτελεί μία υβριδική μορφή χρησιμοποίησής του. Μόλις η υψηλή τάση HV εφαρμοσθεί στο Channeltron, τα ιόντα επιταχύνονται προς τον υάλινο σωλήνα. Τα ιόντα που προσκρούουν στον αγωγίμο υμένα απελευθερώνουν ηλεκτρόνια τα οποία ενισχύονται με συνεχή ρυθμό μέσα στον υμένα. Όταν δεν εφαρμόζεται η υψηλή τάση τα ιόντα πορεύονται ευθύγραμμα και προσκρούουν στον συλλέκτη Faraday ο οποίος έχει τοποθετηθεί στον άξονα της κίνησης των ιόντων.



Σχήμα 3-18. Αρχή λειτουργίας του συνεχούς SEM (Channeltron).

3.3. Πεδία εφαρμογών τετραπολικών φίλτρων.

Για περαιτέρω εξοικείωση παρέχονται ορισμένα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα εφαρμογών των τετραπολικών φασματογράφων μαζών.

Γενική τεχνολογία κενού: Ανάλυση παραμενόντων αερίων σε θαλάμους υψηλού κενού (10^{-6} mbar) και εξαιρετικά υψηλού κενού (10^{-10} mbar)

Έρευνα και ανάπτυξη: Μελέτη αερίων, πλάσματος, υγρών και στερεών ουσιών. Σχετική μέθοδος SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry).

Έλεγχος διαδικασιών: Έλεγχος και παρακολούθηση αντιδραστήρων αερίων σε χαλυβουργίες. Έλεγχος και παρακολούθηση διαδικασίας βιολογικής ζύμωσης, Έλεγχος και παρακολούθηση εξάχνωσης των υλικών.

Ποιοτικός έλεγχος: Στεγανότητα κελύφους ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Παγίδευση αερίων στα διάφορα στάδια της υαλοουργίας. Ανίχνευση διαρροών γενικώς.

Βιοϊατρική: Ανάλυση συστατικών εκπνοής και ανάλυση αίματος BGA (Blood Gass Analysis).

Οι παραπάνω εφαρμογές είναι μόνο ενδεικτικές και αποτελούν ένα μικρό ποσοστό των χρήσεων των τετραπολικών φασματογράφων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: Τιμές m/e μερικών θετικών ιόντων

Η πρώτη στήλη των δεδομένων παρέχει την αναλογία m/e και παραπλεύρως δίδονται μερικά από τα πιθανά (απλά ή διπλά ιονισμένα) θετικά ιόντα .

1	H ⁺				43	C ₃ H ₇ ⁺	CH ₃ CO ⁺		
2	H ₂ ⁺	(He ⁺⁺)			44	C ₃ H ₈ ⁺	CO ₂ ⁺	N ₂ O ⁺	
4	He ⁺				45	C ₂ H ₅ O ⁺	(Alcohol)		
6	C ⁺⁺				46	NO ₂ ⁺	C ₂ H ₅ OH ⁺		
7	N ⁺⁺				48	SO ⁺			
8	O ⁺⁺				50	CF ⁺			
12	C ⁺				55	C ₄ H ₇ ⁺			
13	CH ⁺				57	C ₄ H ₉ ⁺			
14	N ⁺	CH ₂ ⁺	CO ⁺⁺		58	(CH ₃) ₂ CO ⁺	(Aceton)		
15	CH ₃ ⁺	NH ⁺			64	SO ₂ ⁺			
16	O ⁺	CH ₄ ⁺	NH ₂ ⁺		69	CF ₃ ⁺			
17	OH ⁺	NH ₃ ⁺			77	C ₆ H ₅ ⁺	(Phenyl)		
18	H ₂ O ⁺				78	C ₆ H ₆ ⁺	(Benzol)		
19	F ⁺	H ₃ O ⁺			85	C ³⁵ ClF ₂ ⁺	(Freon)		
20	HF ⁺	²⁰ Ne ⁺	Ar ⁺⁺		87	C ³⁷ ClF ₂ ⁺	(Freon)		
22	CO ₂ ⁺	²² Ne ⁺			92,5	¹⁸⁵ Re ⁺⁺			
24	C ₂ ⁺				93,5	¹⁸⁷ Re ⁺⁺			
26	C ₂ H ₂ ⁺				101	C ³⁵ Cl ₂ F ⁺	(Freon)		
27	C ₂ H ₃ ⁺				103	C ³⁵ Cl ³⁷ ClF ⁺	(Freon)		
28	N ₂	C ₂ H ₄ ⁺	CO ⁺		105	C ³⁷ Cl ₂ F ⁺	(Freon)		
29	C ₂ H ₅ ⁺	¹⁵ N ¹⁴ N ⁺			130	C ₂ HCl ₃ ⁺	(Trichlor)		
30	C ₂ H ₆ ⁺	No ⁺			132	C ₂ HCl ₃ ⁺	(Trichlor)		
31	CF ⁺	CH ₂ OH ⁺			134	C ₂ HCl ₃ ⁺	(Trichlor)		
32	O ₂ ⁺	³² S ⁺			136	C ₂ HCl ₃ ⁺	(Trichlor)		
34	H ₂ ³² S ⁺	³⁴ S ⁺	¹⁸ O ¹⁶ O ⁺		149-	Phthalic ester	(Softening agent)		
35	³⁵ Cl ⁺				151	C ₂ ³⁵ Cl ₂ F ₃ ⁺	(Freon)		
36	H ³⁵ Cl ⁺	³⁶ Ar ⁺			153	C ₂ ³⁵ Cl ³⁷ ClF ₃ ⁺	(Freon)		
37	³⁷ Cl ⁺	C ₃ H ⁺			155	C ₂ ³⁷ Cl ₂ F ₃ ⁺	(Freon)		
38	H ³⁷ Cl ⁺	C ₃ H ₂ ⁺	³⁸ Ar ⁺		182	W ⁺			
39	C ₃ H ₃ ⁺	³⁹ K ⁺			183	W ⁺			
40	Ar ⁺	C ₃ H ₄ ⁺			184	W ⁺			
41	C ₃ H ₅ ⁺	⁴¹ K ⁺			185	Re ⁺			
42	C ₃ H ₆ ⁺				186	W ⁺			
					187	Re ⁺			

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: Σχετική πιθανότητα ιονισμού

Η πρώτη στήλη των δεδομένων παρέχει τον χημικό συμβολισμό των αερίων συστατικών και παραπλεύρως φαίνεται η σχετική πιθανότητα ιονισμού (ως προς το άζωτο) για προσπίπτοντα ηλεκτρόνια ενεργείας 100 eV.

He	0,15	HF	1,4	n-C ₅ H ₁₂	6,0
Ne	0,30	CO ₂	1,4	C ₆ H ₁₄	6,6
D ₂	0,35	HCl	1,6	C ₆ H ₆	5,9
H ₂	0,44	N ₂ O	1,7	C ₆ H ₅ Cl	7,0
Air	1,0	Kr	1,0	C ₆ H ₅ CH ₃	6,8
N ₂	1,0	SO ₂	2,1	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	7,8
O ₂	1,0	SF ₆	2,3	CH ₃ OH	1,8
H ₂ O	1,0	Xe	2,4	CH ₃ Cl	3,1
CO	1,05	CH ₄	1,6	CH ₂ Cl ₂	3,7
Ar	1,2	C ₂ H ₆	2,6	CHCl ₃	4,8
NO	1,2	C ₃ H ₈	3,7	CCl ₄	6,0
NH ₃	1,3	C ₄ H ₁₀	4,9	CCl ₂ F ₂	2,7

Πίνακες που βοηθούν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: Πίνακας φυσικών ισοτόπων

Ο πίνακας περιλαμβάνει στήλες με :

Ατομικό αριθμό (Atomic number)

Μαζικό αριθμό (Mass number)

Ονομασία του στοιχείου (Element)

Σχετικό ποσοστό [%] εμφάνισης του ισοτόπου

Χημικό συμβολισμό (Chem. symbol)

(Relative abundance)

Atomic number	Element	Chem. symbol	Mass number	Relative abundance
1	Hydrogen	H	1	99,985
			2	0,01492
2	Helium	He	3	0,000137
			4	99,999863
3	Lithium	Li	6	7,42
			7	92,58
4	Beryllium	Be	9	100
5	Boron	B	10	19,61
			11	80,39
6	Carbon	C	12	98,893
			13	1,107
7	Nitrogen	N	14	99,6337
			15	0,3663
8	Oxygen	O	16	99,759
			17	0,0374
			18	0,2039
9	Fluorine	F	19	100
10	Neon	Ne	20	90,92
			21	0,26
			22	8,82
11	Sodium	Na	23	100
12	Magnesium	Mg	24	78,70
			25	10,13
			26	11,17
13	Aluminium	Al	27	100
14	Silicon	Si	28	92,21
			29	4,70
			30	3,09
15	Phosphorus	P	31	100
16	Sulfur	S	32	95,0
			33	0,76
			34	4,22
17	Chlorine	Cl	35	75,53
			37	24,47
18	Argon	Ar	36	0,337
			38	0,063
			40	99,600
19	Potassium	K	39	93,1
			40	0,0118
			41	6,88

Atomic number	Element	Chem. symbol	Mass number	Relative abundance
20	Calcium	Ca	40	96,97
			42	0,64
			43	0,15
			44	2,06
			46	0,003
21	Scandium	Sc	45	100
			48	0,18
22	Titanium	Ti	46	7,93
			47	7,28
			48	73,94
			49	5,51
			50	5,34
23	Vanadium	V	50	0,24
			51	99,76
24	Chrome	Cr	50	4,31
			52	83,76
			53	9,55
			54	2,38
25	Manganese	Mn	55	100
26	Iron	Fe	54	5,82
			56	91,66
			57	2,19
			58	0,33
27	Cobalt	Co	59	100
28	Nickel	Ni	58	67,88
			60	26,23
			61	1,19
			62	3,66
			64	1,08
29	Copper	Cu	63	69,09
			65	30,91
30	Zinc	Zn	64	48,89
			66	27,81
			67	4,11
			68	18,57
			70	0,62
31	Gallium	Ga	69	60,4
			71	39,6
32	Germanium	Ge	70	20,52
			72	27,43
			73	7,76
			74	36,54
			76	7,76
33	Arsenic	As	75	100

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: (Συνέχεια)

Atomic number	Element	Chem. symbol	Mass number	Relative abundance	Atomic number	Element	Chem. symbol	Mass number	Relative abundance			
34	Selenium	Se	74	0,87	48	Cadmium	Cd	106	1,22			
			76	9,02				108	0,875			
			77	7,58				110	12,39			
			78	23,52				111	12,75			
			80	49,82				112	24,07			
			82	9,19				113	12,26			
35	Bromine	Br	79	50,54	114	28,86						
			81	49,46	116	7,58						
38	Krypton	Kr	78	0,35	49	Indium	In	113	4,28			
			80	2,27				115	95,72			
			82	11,56	50	Tin	Sn	112	0,96			
			83	11,55				114	0,66			
			84	56,90				115	0,35			
			86	17,37				116	14,30			
37	Rubidium	Rb	85	72,15	117	7,61						
			87	27,85	118	24,03						
38	Strontium	Sr	84	0,56	119	8,58						
			86	9,86	120	32,85						
			87	7,02	122	4,72						
			88	82,56	124	5,94						
39	Yttrium	Y	89	100	51	Antimony	Sb	121	57,25			
40	Zirconium	Zr	90	51,46				123	42,75			
			91	11,23	52	Tellurium	Te	120	0,09			
			92	17,11				122	2,46			
			94	17,40				123	0,87			
			96	2,80				124	4,61			
								125	6,99			
		126	18,71									
41	Niobium	Nb	93	100	128	31,79						
42	Molybdenum	Mo	92	15,84	130	34,48						
			94	9,04	53	Iodine	I	127	100			
			95	15,72				54	Xenon	Xe	124	0,09
			96	16,53							126	0,09
			97	9,46							128	1,92
			98	23,78							129	26,44
			100	9,63							130	4,08
		131	21,18									
		132	26,89									
43	Technetium	Tc	-	-	134	10,44						
44	Ruthenium	Ru	96	5,51	136	8,87						
			98	1,87	55	Cesium	Cs	133	100			
			99	12,72				56	Barium	Ba	130	0,10
			100	12,62							132	0,09
			101	17,07							134	2,42
			102	31,61							135	6,59
			104	18,58							136	7,81
		137	11,32									
		138	71,66									
45	Rhodium	Rh	103	100	57	Lanthanum	La	138	0,09			
46	Palladium	Pd	102	0,96				139	99,91			
			104	10,97	58	Cerium	Ce	136	0,19			
			105	22,23				138	0,25			
			106	27,33				140	88,48			
			108	26,71				142	11,07			
			110	11,81								
47	Silver	Ag	107	51,35	59	Praseodymium	Pr	141	100			
			109	48,65								

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: (Συνέχεια)

Atomic number	Element	Chem. symbol	Mass number	Relative abundance
60	Neodymium	Nd	142	27,11
			143	12,17
			144	23,85
			145	8,30
			146	17,22
			148	5,73
			150	5,62
61	Promethium	Pm	—	—
62	Samarium	Sm	144	3,09
			147	14,97
			148	11,24
			149	13,83
			150	7,44
			152	26,72
			154	22,71
63	Europium	Eu	151	47,82
			153	52,18
64	Gadolinium	Gd	152	0,20
			154	2,15
			155	14,73
			156	20,47
			157	15,68
			158	24,87
			160	21,90
65	Terbium	Tb	159	100
68	Dysprosium	Dy	156	0,05
			158	0,09
			160	2,29
			161	18,88
			162	25,53
			163	24,97
			164	28,18
67	Holmium	Ho	165	100
68	Erbium	Er	162	0,14
			164	1,56
			166	33,41
			167	22,94
			168	27,07
			170	14,88
69	Thulium	Tm	169	100
70	Ytterbium	Yb	168	0,14
			170	3,03
			171	14,31
			172	21,82
			173	16,13
			174	31,84
			176	12,73
71	Lutetium	Lu	175	97,41
			176	2,59
72	Hafnium	Hf	174	0,18
			176	5,20
			177	18,50
			178	27,14
			179	13,75
			180	35,24

Atomic number	Element	Chem. symbol	Mass number	Relative abundance
73	Tantalum	Ta	180	0,01
			181	99,99
74	Tungsten	W	180	0,13
			182	26,41
			183	14,40
			184	30,64
			186	28,41
75	Rhenium	Re	185	37,07
			187	62,93
76	Osmium	Os	184	0,02
			186	1,59
			187	1,64
			188	13,3
			189	16,1
			190	26,4
			192	41,0
77	Iridium	Ir	191	37,3
			193	62,7
78	Platinum	Pt	190	0,01
			192	0,78
			194	32,9
			195	33,8
			196	25,3
			198	7,21
79	Gold	Au	197	100
80	Mercury	Hg	196	0,15
			198	10,02
			199	16,84
			200	23,13
			201	13,22
			202	29,80
			204	6,85
81	Thallium	Tl	203	29,50
			205	70,50
82	Lead	Pb	204	1,48
			206	23,6
			207	22,6
			208	52,3
83	Bismuth	Bi	209	100
84	Polonium	Po		
85	Astatine	At		
86	Radon	Rn		
87	Francium	Fr		
88	Radium	Ra		
89	Actinium	Ac		
90	Thorium	Th	232	100
91	Protactinium	Pa		
92	Uranium	U	234	0,0068
			235	0,7205
			238	99,2739

3.4. Η μελέτη του καθαρού και ξηρού SF₆ με την χρησιμοποίηση τετραπολικού φασματογράφου μαζών.

3.4.1. Το εξεταζόμενο υλικό (SF₆).

Το εξαφθοριούχο θείο είναι ένα αέριο με σχετικά υψηλό μοριακό βάρος και ιδιαίτερα μικρή δραστικότητα. Λόγω της χημικής του ευστάθειας (για παράδειγμα δεν έχει παρατηρηθεί αντίδραση με το μοριακό οξυγόνο κατά την διάρκεια των ψυχρών εκκενώσεων) και της διηλεκτρικής του αντοχής, το υλικό αυτό χρησιμοποιείται πλέον σε υψηλό ποσοστό στην ηλεκτρική βιομηχανία σαν αέριο μονωτικό υλικό υψηλών τάσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που αναφέρονται εδώ, προέρχονται από δείγματα που εμπεριέχοντο σε αμεταχείριστες χαλύβδινες φιάλες υπό πίεση, και προέρχονταν από δύο τουλάχιστον διαφορετικούς προμηθευτές εξαφθοριούχου θείου συστημάτων GIS.

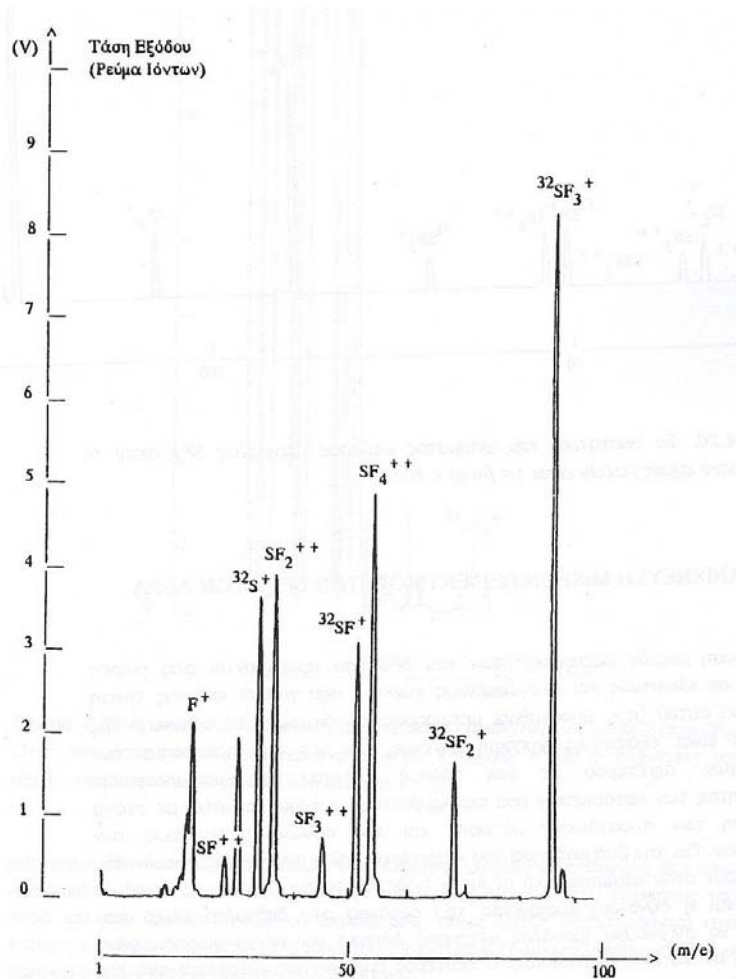
3.4.2. Το φάσμα μαζών για το καθαρό και ξηρό SF₆

Τα πειραματικά αποτελέσματα του σχήματος 3-19 δείχνουν το φάσμα που λαμβάνεται από δείγμα SF₆ εργαστηριακής καθαρότητας, το οποίο δεν έχει καταπονηθεί ηλεκτρικά. Χρησιμοποιήθηκε σύστημα κενού συνολικής πίεσεως 10⁻⁸ mbar, αποτελούμενο από χαλύβδινο κώδωνα αντλούμενο με TMP (Turbo Molecular Pump), αντλητικής ικανότητας 500 l/s. Η είσοδος του αερίου δείγματος στον χώρο του κενού γίνεται με διαφορικό σύστημα πίεσης το οποίο αποκλείει τον διαχωρισμό μαζών. Ο ρυθμός εισόδου του αερίου δείγματος στο σύστημά κενού παραμένει σταθερός και ίσος προς 4 ccm/min. Χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος στην κλασική κλίμακα μαζών m/e=1-100, εφοδιασμένος με πηγή ιόντων αζονικής δέσμης, τετραπολικό σύστημα ράβδων, και δευτερογενή πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων SEM, τοποθετημένο στον ίδιο άξονα με αυτόν του τετραπόλου. Η ενέργεια ιονισμού ήταν 100eV και το ρεύμα εκπομπής 1mA. Τα παρατηρούμενα ιοντικά θραύσματα ξεκινούν από το ατομικό φθόριο στη θέση m/e=19, και τα ισότοπα θείου στις θέσεις m/e=32 και m/e=34. Τα απλά φορτισμένα ιόντα SF⁺, SF₂⁺ και SF₃⁺ για το ισότοπο ³²S βρίσκονται στις θέσεις m/e= 51, 70, και 89 αντίστοιχα. Τα γειτονικά προϊόντα κατάτμησης σε κάθε μία από τις παραπάνω θέσεις υποδηλώνουν τα αντίστοιχα προϊόντα του ισότοπου ³⁴S (ποσοστό αφθονίας 4.4%) και ανιχνεύονται υψηλότερα κατά δύο μονάδες στην κλίμακα m/e. Για λόγους συγκριτικούς παρατίθεται το συνολικό φάσμα για το SF₆ στο σχήμα 3-20 το οποίο έχει εξετασθεί για εύρος m/e μεταξύ 1 και 300. Για την περίπτωση αυτή, ο αναλυτής έχει συνδυασθεί με πηγή ιόντων διασταυρωμένης δέσμης και εγκάρσιο SEM (90° γωνία ως προς την πορεία των ιόντων). Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα, για ενέργεια ιονισμού 100eV το λαμβανόμενο φάσμα για το SF₆ εμπεριέχει προϊόντα, το 60% των οποίων τοποθετείται σε τιμές m/e μεγαλύτερες του 100. Τα ιόντα SF₄⁺ και SF₅⁺ (m/e = 108 και 127 αντίστοιχα) είναι τα νέα συστατικά του δείγματος που εμφανίζονται στην κλίμακα μαζών μεταξύ 100 και 300. Για την χρησιμοποιούμενη ενέργεια ηλεκτρονίων της ιοντικής πηγής (100eV), το υλικό δεν παρουσιάζει τα μοριακά ιόντα (δηλ SF₆⁺).

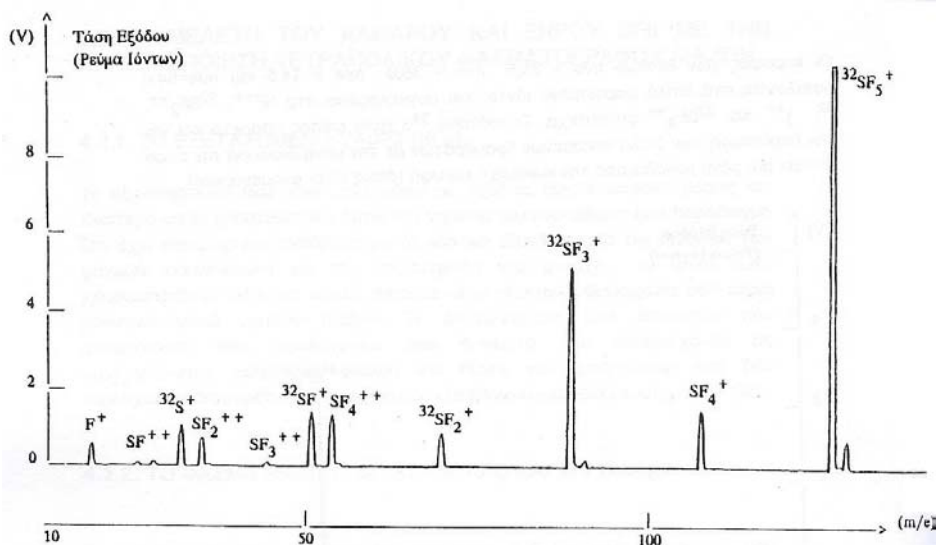
Οι κορυφές των θέσεων m/e = 25.5, m/e = 35.0, m/e = 44.5 και m/e=54.0 οφείλονται στα διπλά φορτισμένα ιόντα, και συγκεκριμένα στα SF⁺⁺, ³²SF₂⁺⁺, ³²SF₃⁺⁺, και ³²SF₄⁺⁺ αντίστοιχα. Το ισότοπο ³⁴S είναι επίσης υπαρκτό και για την περίπτωση των διπλά ιονισμένων θραυσμάτων με την μόνη διαφορά ότι τώρα απέχει μία μόνο μονάδα από την κυρίαρχη κορυφή (όπως είναι αναμενόμενο).

3.4.3. Ανίχνευση μικρών περιεκτικότητας SF₆ στον αέρα.

Η ανίχνευση μικρών περιεκτικότητας του SF₆ που προέρχονται από μικρές διαρροές σε κλειστούς και στεγασμένους χώρους, που γίνεται εκτενής χρήση του υλικού αυτού (π.χ. υποσταθμοί μεταφοράς και διανομής σε κατοικημένες περιοχές) είναι εξαιρετικό χρήσιμη αφ' ενός μεν για την προστασία των εργαζομένων, αφ' ετέρου δε σαν τρόπος ελέγχου της ικανοποιητικής στεγανότητας των κατασκευών που περιλαμβάνουν το αέριο μονωτικό με στόχο τη μείωση των αποστάσεων μόνωσης και του συνολικού μεγέθους των κατασκευών. Για την βαθμονόμηση του κατωτάτου ορίου ανίχνευσης ουσιών που συνυπάρχουν στον ατμοσφαιρικό αέρα, οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι η συνολική ευαισθησία του οργάνου στο δεδομένο υλικό που πρόκειται να ανιχνευθεί (μονάδες μέτρησης A/mbar) και το χρησιμοποιούμενο εύρος της αναλυτικής διαδικασίας.



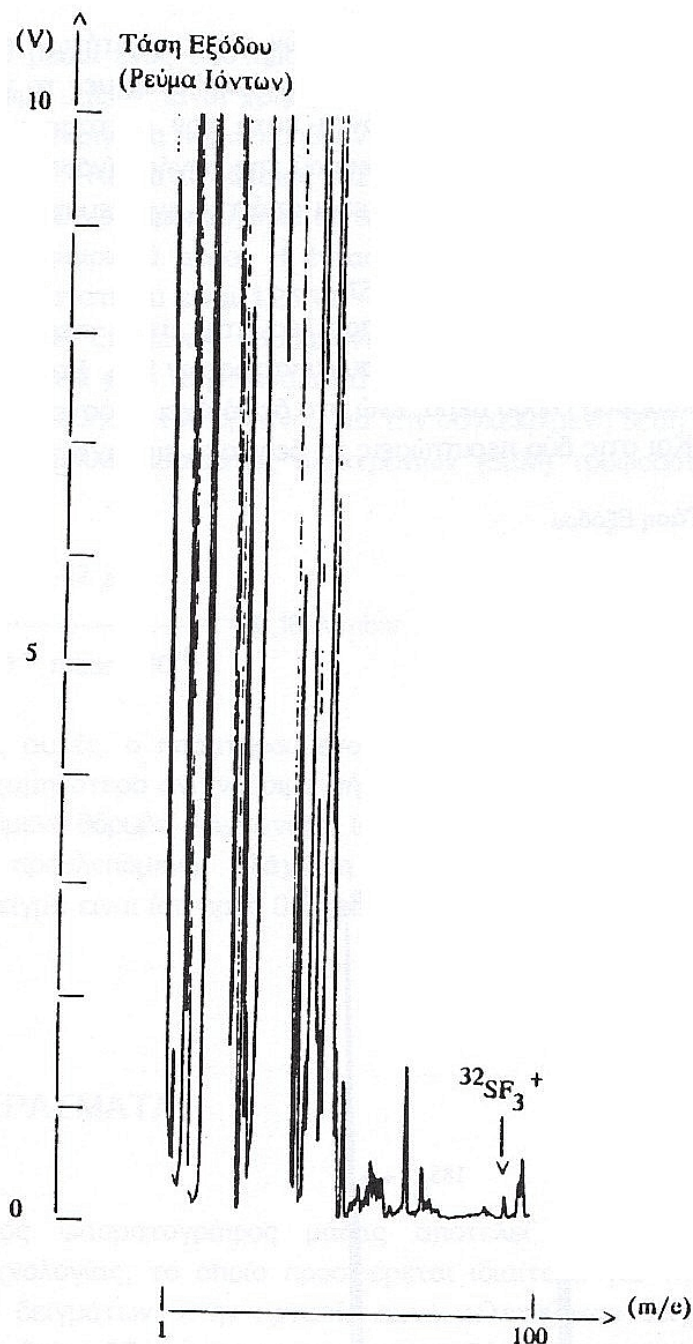
Σχήμα 3-19. Συνιστώσες ιοντικών ρευμάτων σε δείγμα καθαρού και ξηρού SF₆ για εύρος μαζών 1 < (m/e) < 100.



Σχήμα 3-20. Τα συστατικά του φάσματος καθαρού δείγματος SF₆ όταν το εξεταζόμενο εύρος μαζών είναι 1 < (m/e) < 300.

Ο δεύτερος παράγοντας εξαρτάται από την μέγιστη πίεση λειτουργίας του τετραπόλου και τον υφιστάμενο θόρυβο πάνω στο σήμα που πρόκειται να ανιχνευθεί. Ο συνολικός θόρυβος που παρατηρείται στις μετρήσεις εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως, το επίπεδο ηλεκτρονικού θορύβου, τη σκέδαση των ιόντων και σε συγκεκριμένες εφαρμογές, από το υφιστάμενο χημικό

περιβάλλον, δηλαδή από τις ακαθαρσίες που εισέρχονται στην περιοχή του αναλυτή συμπεριλαμβανομένων και των αερίων που τις συμπαρασύρουν. Για τους λόγους αυτούς, στις κλίμακες υψηλής ευαισθησίας, δεν είναι πρακτικά εφικτή η ανίχνευση όλων των επί μέρους κορυφών του φάσματος του αέρα και του περιλαμβανόμενου αερίου SF₆, όπως αυτές παρατηρούνται στα καθαρά και ξηρά δείγματα. Το φάσμα του σχήματος 3-21 αφορά συνθετικό δείγμα αέρος το οποίο εισάγεται στον θάλαμο κενού.

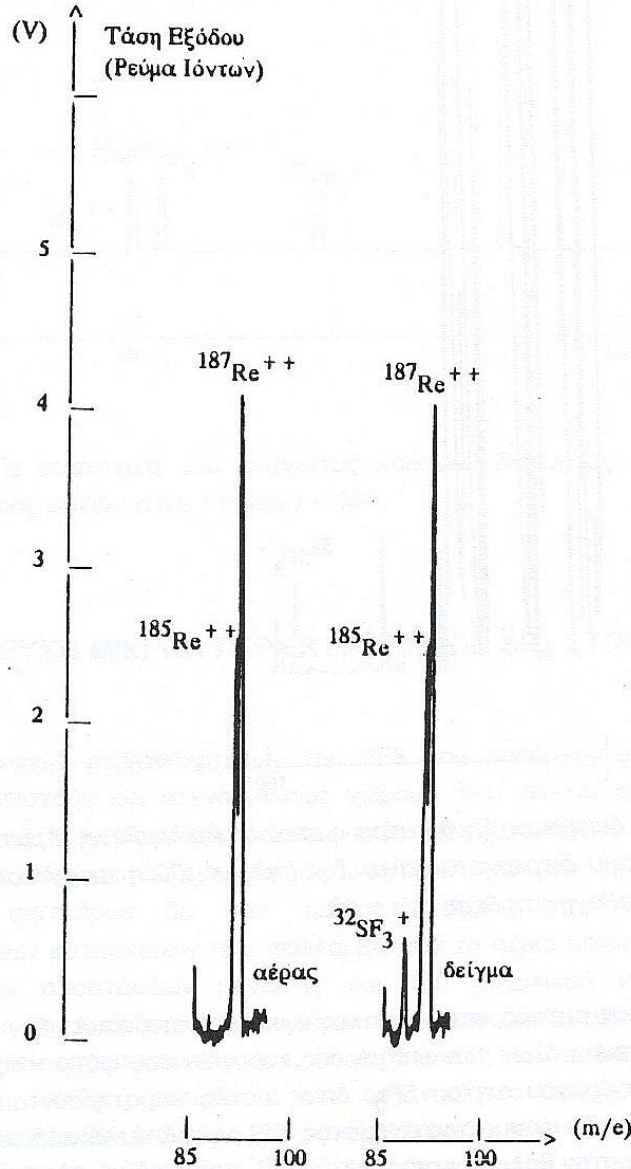


Σχήμα 3-21. Η ανάλυση δείγματος ξηρού αέρα ο οποίος περιλαμβάνει 2 ppm SF₆. Όταν το εύρος μαζών που διερευνάται είναι $1 < (m/e) < 100$ η ανίχνευση του αερίου μονωτικού είναι πιθανή στη θέση $m/e = 89$.

Καθίσταται σαφές ότι η ανίχνευση πρόσθετων συστατικών στην περιοχή των χαμηλών μαζών είναι αδύνατη δεδομένου ότι οι παρατηρούμενες κορυφές εμπεριέχονται στα ισχυρά σήματα των συστατικών του καθαρού αέρα. Σε αντίθεση όμως, τα προϊόντα ιονισμού που βρίσκονται σε υψηλότερες τιμές της κλίμακας m/e, όπως η συγκεκριμένη θέση $m/e = 89$ (SF₃⁺), εμφανίζουν ιδιαίτερα κατάλληλες προϋποθέσεις για τον εντοπισμό μικρών περιεκτικότητων του SF₆ στον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην διαπίστωση αυτή οδηγεί αφ' ενός μεν το γεγονός ότι στις θέσεις αυτές δεν παρατηρούνται ιόντα κατά την εξέταση καθαρών ατμοσφαιρικών δειγμάτων όταν η ενέργεια ιονισμού της πηγής είναι

100eV, αφ' ετέρου δε το σχετικά υψηλό σήμα που προέρχεται από την ανίχνευση SF_3^+ στα δείγματα καθαρού SF_6 .

Το σχήμα 3-22 παρουσιάζει συγκριτικά αποτελέσματα στην περιοχή που ενδιαφέρει άμεσα για τον εντοπισμό χαμηλών συγκεντρώσεων SF_6 . Στο αριστερό τμήμα γίνεται είσοδος καθαρού ξηρού αέρα, ενώ στο δεξιό έχει προστεθεί SF_6 σε περιεκτικότητα 2 ppm. Και στις δύο περιπτώσεις τα δείγματα εισέρχονται στο σύστημα κενού μέσω ενός συστήματος διαφορικής πίεσης το οποίο λειτουργεί χωρίς διαχωρισμό μαζών.



Σχήμα 3-22. Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ δείγματος ξηρού αέρα και μείγματος αέρα με μικρή περιεκτικότητα SF_6 (2ppm). Το εξεταζόμενο εύρος μαζών είναι $86 < (m/e) < 96$. Η πίεση ατμών ρηνίου ανιχνεύεται στις θέσεις 92,5 και 93,5 ενώ το απλά φορτισμένο ιόν SF_3^+ εμφανίζει σαφώς ασθενέστερο ιοντικό ρεύμα στη θέση $m/e = 89$.

Είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι στις γειτονικές θέσεις του SF_3^+ μπορεί επίσης να παρατηρηθούν τα διπλά φορτισμένα ισότοπα του ρηνίου ^{185}Re και ^{187}Re στις θέσεις 92,5 και 93,5 αντίστοιχα. Αυτό είναι αναπόφευκτο αφού χρησιμοποιήθηκε ιοντική πηγή με νήμα Re κατά την εξέταση δειγμάτων ατμοσφαιρικού αέρα. Η ένταση του μετρημένου σήματος για την ανίχνευση του συστατικού είναι $1.25 \cdot 10^{-12}$ A ενώ η συνολική πίεση του θαλάμου είναι $3.5 \cdot 10^{-6}$ mbar. Επομένως λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η περιεκτικότητα του SF_6 στο μίγμα είναι 2 ppm (δηλ αναλογία $SF_6/ατρά = 2/10^6 = 2 \cdot 10^{-6}$), μπορεί να υπολογισθεί η ευαισθησία του οργάνου για την συγκεκριμένη θέση $m/e = 89$, όταν ο δευτερογενής πολλαπλασιαστής ηλεκτρονίων (SEM) τροφοδοτείται με τάση 2300 V.

$$E_{89} = \frac{1,25 \cdot 10^{-12} \text{ A}}{3,5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 0,18 \text{ A/mbar}$$

Στις μετρήσεις αυτές, ο παρατηρούμενος θόρυβος είναι περίπου $2 \cdot 10^{-13}$ A και επομένως το χαμηλότερο ανιχνεύσιμο σήμα για τη θέση $m/e = 89$ (διπλάσιο από τον παρατηρούμενο θόρυβο) λαμβάνεται ίσο προς $4 \cdot 10^{-13}$ A. οπότε προκύπτει ότι, η θεωρητικά προβλεπόμενη, ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση SF₆ στο εξεταζόμενο δείγμα είναι ίση προς 0,6 ppm.

3.5. Συμπεράσματα.

Ο τετραπολικός φασματογράφος μάζας αποτελεί ένα ισχυρό μέσο της σύγχρονης τεχνολογίας, το οποίο προσφέρεται ιδιαίτερα για την συστηματική μελέτη αερίων δειγμάτων. Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν δείγματα καθαρού εξαφθοριούχου θείου SF₆ με τη χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών συνδυασμών τετραπολικών φίλτρων με διαφορετικές ιοντικές πηγές αλλά και δευτερογενή πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων. Το λαμβανόμενο φάσμα για το καθαρό SF₆, όταν η ενέργεια ιονισμού είναι 100eV, έχει πλήρως ερμηνευθεί. Ο πίνακας 3-4. συνοψίζει τις κορυφές που καταγράφησαν στο φάσμα του καθαρού εξαφθοριούχου θείου, όταν η ενέργεια των ηλεκτρονίων που το ιονίζει είναι 100 eV. Η διηλεκτρική γήρανση του αερίου μπορεί να μελετηθεί συστηματικά μόνον με τον προσδιορισμό πρόσθετων συστατικών στα φάσματα καταπονηθέντων δειγμάτων. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον άμεσο ποιοτικό έλεγχο του SF₆ το οποίο εμπεριέχεται στις κατασκευές των υψηλών τάσεων.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι γίνεται εφικτή η ανίχνευση μικρών διαρροών του SF₆ στο περιβάλλον σε περιεκτικότητες μέχρι 0,6 ppm (η τιμή κατωφλίου εξαρτάται από την συγκεκριμένη διάταξη), με τη χρησιμοποίηση ενός τετραπολικού φασματογράφου, ο οποίος θα ελέγχει διαρκώς την κορυφή της θέσης $m/e = 89$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4. Κορυφές φάσματος καθαρού SF₆

Όλα τα ιόντα που περιλαμβάνουν ³⁴S έχουν σχετική αναλογία (4,4%) με το αντίστοιχο ιόν που περιλαμβάνει το ³²S, σύμφωνα με την αναλογία των φυσικών τους ισοτόπων.

A. απλοί ιονισμοί

m/e	19	32	34	51	53	70	72	89	91	108	110	127	129
Ιόντα	F ⁺	³² S	³⁴ S	³² SF ⁺	³⁴ SF ⁺	³² SF ₂ ⁺	³⁴ SF ₂ ⁺	³² SF ₃ ⁺	³⁴ SF ₃ ⁺	³² SF ₄ ⁺	³⁴ SF ₄ ⁺	³² SF ₅ ⁺	³⁴ SF ₅ ⁺

B. διπλοί ιονισμοί

m/e	25,5	26,5	35	36	44,5	45,5	54	55
Ιόντα	³² SF ⁺⁺	³⁴ SF ⁺⁺	³² SF ₂ ⁺⁺	³⁴ SF ₂ ⁺⁺	³² SF ₃ ⁺⁺	³⁴ SF ₃ ⁺⁺	³² SF ₄ ⁺⁺	³⁴ SF ₄ ⁺⁺

3.6. Βιβλιογραφία

[1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2005.

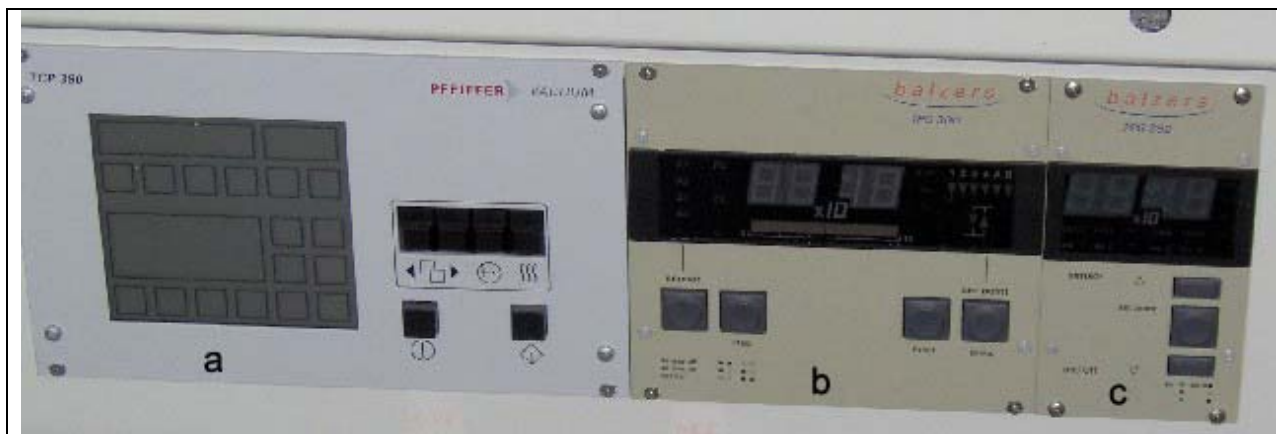
3.7. Παράρτημα: Διάταξη τετραπολικού φασματογράφου μάζας του εργαστηρίου ηλεκτρομονωτικών υλικών.



Γενική άποψη του τετραπολικού φασματογράφου μάζας στο εργαστήριο ηλεκτρομονωτικών υλικών.



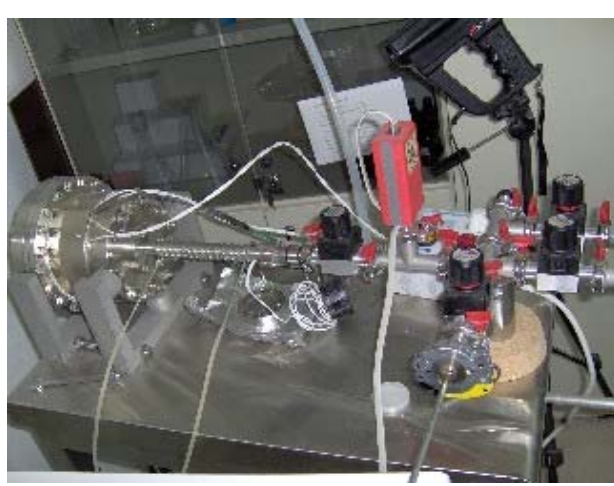
Το όργανο ελέγχου του Τετραπολικού Φίλτρου Μαζών που επιτρέπει την ανίχνευση ιόντων με ανάλυση $1 < amu/q < 200$



Τα όργανα ελέγχου του συστήματος άντλησης θαλάμου και δημιουργίας κενού, α) Ελεγκτής Turbo Molecular Pump, β) Αισθητήρας μέτρησης υψηλού κενού, γ) Ελεγκτής Backing Pressure.



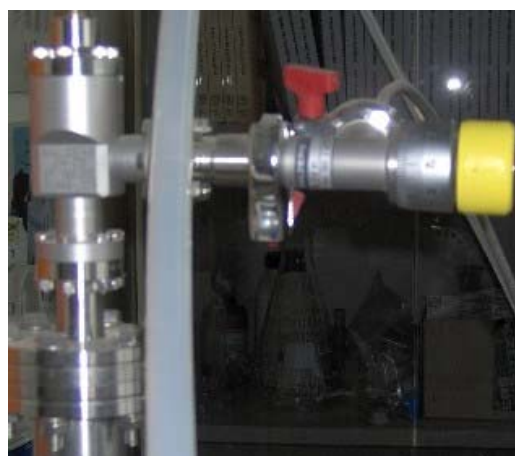
Θάλαμος θερμικής καταπόνησης αερίου πριν από την εισαγωγή του SF₆ στον θάλαμο ψηλού κενού.



Προθάλαμος εισόδου του αερίου προς ανάλυση



Κύριος θάλαμος κενού που εμπεριέχει το τετράπολο μέτρησης.



Βαλβίδες εισαγωγής αερίου στον κύριο θάλαμο.



Αντλία δημιουργίας υψηλού κενού για την άντληση του κυρίως θαλάμου που εμπεριέχει τον φασματογράφο.



Διαβάθμιση περιστροφικής αντλίας κενού για τον έλεγχο της οπίσθιας πίεσεως (Backing Pressure).



Ο ενισχυτής του συστήματος μέτρησης.



Όργανο ελέγχου περιβάλλοντος



Φιάλη με καθαρό αέριο SF₆.



Καταγραφικό Φασμάτων.

Μελέτη Εφαρμογής

4: Μελέτη Εφαρμογής

4.1. Ανάλυση SF₆ θαλάμου του GIS όπου εκδηλώθηκε αστοχία.

4.1.1. Εισαγωγή

Τον Απρίλιο του 2000 εκδηλώθηκε εσωτερικό βραχυκύκλωμα σε ακροκιβώτιο Κέντρου Υπερυψηλής Τάσης GIS, το οποίο και ετέθη εκτός τάσεως. Το κέντρο ήταν τύπου GIS των 400kV και είχε μικρό χρόνο λειτουργίας (περίπου 18 μήνες). Ακολούθησε επισκευή της βλάβης από τον κατασκευαστή, κατά τη διάρκεια της οποίας το γηρασμένο αέριο (εξαφθοριούχο θείο) συλλέχθηκε σε χαλύβδινες φιάλες δεδομένου ότι εμφάνιζε χαρακτηριστική οσμή “rotten egg” (κλούβιου αυγού) και πολλοί από τους θαλάμους είχαν επιμολυνθεί με άνθρακα.

Έγιναν δειγματοληψίες προς ανάλυση των αερίων δειγμάτων SF₆ από τους θαλάμους των ακροκιβωτίων που εκδήλωσαν την αστοχία. Σκοπός των αναλύσεων των αερίων δειγμάτων ήταν ο έλεγχος της ποιότητας του αερίου και ενδεχομένως η διερεύνηση των αιτιών της αστοχίας.

Οι δειγματοληψίες του SF₆ έγιναν με χρήση συρίγγων πολυαιθυλενίου, όγκου 60ml, αποστειρωμένων με ακτίνες-γ, προκειμένου να αναλυθούν τα δείγματα με τετραπολική φασματοσκοπία μάζας και να διερευνηθούν ως προς τη σύστασή τους στο ΕΜΠ.

Συγκεκριμένα, εδόθησαν δείγματα από έξι θαλάμους:

Εφεδρικός πόλος που περιέχει αέριο SF₆ σε πίεση 1,5 atm και δεν έχει καταπονηθεί ηλεκτρικά. (Το δείγμα αυτό χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα αναφοράς).

Ακροκιβώτιο #1. Αέριο από το θάλαμο που εκδήλωσε την αστοχία και ανέπτυξε τόξο ισχύος.

Αποζεύκτης. Αέριο που αναγεννήθηκε με μολυσμένο φίλτρο κατά τη συντήρηση.

Ακροκιβώτιο #2. Αντίστοιχος χώρος με αυτόν που εμφάνισε την αστοχία.

Ακροκιβώτιο #3. Αντίστοιχος χώρος με αυτόν που εμφάνισε την αστοχία.

Ακροκιβώτιο #4. Αντίστοιχος χώρος με αυτόν που εμφάνισε την αστοχία.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι κατά την εκδήλωση της αστοχίας, σε ορισμένους από τους χώρους των ακροκιβωτίων οι φλάντζες στεγανότητας (από εύκαμπτο πολυμερές υλικό) είχαν εσφαλμένα (μεγαλύτερη) διατομή. Οι φλάντζες αυτές χρησιμοποιούνται ως αντικραδασμικές κατά τις μεταφορές.

4.1.2. Η μεθοδολογία ανάλυσης των δειγμάτων:

Χρησιμοποιήθηκε τετραπολική φασματοσκοπία μάζας για ανίχνευση των παραπροϊόντων στη μήτρα του εξαφθοριούχου θείου σε περιεκτικότητες μέχρι 0,1ppm και μαζικούς αριθμούς/φορτίο μεταξύ 1 και 200. Οι πιθανές φασματικές κορυφές για το **καθαρό και ξηρό SF₆** για τα απλά και διπλά ιονισμένα θραύσματά του συνοψίζονται στον πίνακα 4-1α που ακολουθεί.

Πίνακας 4-1α. Κορυφές φάσματος καθαρού SF₆. Ολα τα ιόντα που περιλαμβάνουν ³⁴S έχουν σχετική αναλογία (4,4% σε σχέση με το αντίστοιχο ιόν που περιλαμβάνει ³²S (σύμφωνα με την αναλογία των φυσικών ισοτόπων).

A. Απλοί ιονισμοί.

amu/e	19	32	34	51	53	70	72	89	91	108	110	127	129
Ιόντα	F ⁺	³² S ⁺	³⁴ S ⁺	³² SF ⁺	³⁴ SF ⁺	³² SF ₂ ⁺	³⁴ SF ₂ ⁺	³² SF ₃ ⁺	³⁴ SF ₃ ⁺	³² SF ₄ ⁺	³⁴ SF ₄ ⁺	³² SF ₅ ⁺	³⁴ SF ₅ ⁺

B. Διπλοί ιονισμοί.

amu/e	25,5	26,5	35	36	44,5	45,5	54	55
Ιόντα	³² SF ⁺⁺	³⁴ SF ⁺⁺	³² SF ₂ ⁺⁺	³⁴ SF ₂ ⁺⁺	³² SF ₃ ⁺⁺	³⁴ SF ₃ ⁺⁺	³² SF ₄ ⁺⁺	³⁴ SF ₄ ⁺⁺

Πίνακας 4-1β. Πιθανά παραπροϊόντα για το ηλεκτρικά καταπονημένο SF₆. Οι περιεκτικότητες των παραπροϊόντων στη μήτρα του αερίου καθορίζουν την ηλεκτρομονωτική αντοχή του υλικού όπως την ικανότητα σβέσης τόξων ισχύος. Η τοξικότητα του προσδιορίζεται κυρίως από το παραπροϊόν S₂F₁₀, το οποίο πρέπει να περιορίζεται σε περιεκτικότητες κάτω του 0,01 ppb.

amu/e	20	34	48	64	80	67	86	105	124	83
Ιόντα	HF ⁺	H ₂ S ⁺	SO ⁺	SO ₂ ⁺	SO ₃ ⁺	SOF ⁺	SOF ₂ ⁺	SOF ₃ ⁺	SOF ₄ ⁺	SO ₂ F ⁺

amu/e	102	121	140	115	134	153	172	108	254
Ιόντα	SO ₂ F ₂ ⁺	SO ₂ F ₃ ⁺	SO ₂ F ₄ ⁺	SO ₄ F ⁺	SO ₄ F ₂ ⁺	SO ₄ F ₃ ⁺	SO ₄ F ₄ ⁺	SF ₄ ⁺	S ₂ F ₁₀ ⁺

Όπως, είναι γνωστό, κατά τη χρήση του SF₆ υπεισέρχεται στο σύστημα αέρας ή/και υγρασία με τα παράγωγά της (δηλ. O⁺, OH⁺, H⁺, H₂O⁺). Μετά από την μακρόχρονη ηλεκτρική καταπόνηση ή/και τη σβέση τόξων ισχύος, ενδεχομένως σχηματίζονται παραπροϊόντα του SF₆ (π.χ. HF, H₂S, οξυφθοριούχες, S₂F₁₀ κλπ). Η ακριβής σύστασή τους δίδει σημαντικές πληροφορίες για την γενικότερη κατάσταση του αερίου, είτε από ηλεκτρολογικής, είτε από τοξικής απόψεως. Το είδος και η σύσταση των δημιουργούμενων παραπροϊόντων εξαρτάται από την γεωμετρία των συστημάτων, την γενικότερη κατάσταση του SF₆, την υφιστάμενη ηλεκτρική καταπόνηση (π.χ. ισχύς τόξου και συχνότητα εμφάνισης), πρόσπτωση ακτινοβολίας (π.χ. η αποσύνθεση του SF₆ από τις ακτίνες -X ενισχύεται από την παρουσία οργανικών μονωτήρων) και τέλος, τη γεωγραφική θέση και τις ευρύτερες κλιματολογικές συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί η εγκατάσταση. Στον πίνακα 3β συνοψίζονται τα επικρατέστερα από τα αναμενόμενα παραπροϊόντα για το ηλεκτρικά καταπονημένο και γηρασμένο SF₆ (ισότοπο ³²S), καθώς και οι θέσεις ανίχνευσής τους με την τετραπολική φασματοσκοπία μάζας.

Στην τετραπολική φασματοσκοπία μάζας οι ακριβείς συγκεντρώσεις των ιόντων μπορούν να καθορισθούν από το αντίστοιχο ιοντικό ρεύμα των λαμβανομένων φασμάτων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{ppm}_{(\text{ion})} = I_{(\text{ion})} \cdot 10^6 / P_{(\text{mbar})} \cdot E_{(\text{amu/q})}$$

όπου ppm(ion) είναι η συγκέντρωση των ιόντων σε ppm, I (ion) είναι η ένταση του ρεύματος ιόντων σε (A) για τον εξεταζόμενο μαζικό αριθμό, P (mbar) η πίεση στον χώρο του τετραπόλου την στιγμή της ανάλυσης του συγκεκριμένου μαζικού αριθμού, και E(amu/q) η ευαισθησία ανίχνευσης (A/mbar) στη θέση του συγκεκριμένου ιόντος.

4.1.3. Αποτελέσματα Αναλύσεων:

Στο παράρτημα 1 υπάρχουν τα αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις φασματικές αναλύσεις των δειγμάτων. Η χαμηλή ευαισθησία ανάλυσης καταγράφει τα ιοντικά ρεύματα σε λογαριθμική κλίμακα μεταξύ των τιμών 10⁻⁹ A και 10⁻¹² A, ενώ η υψηλή ευαισθησία ανάλυσης καταγράφει τα αντίστοιχα ιοντικά ρεύματα μεταξύ 10⁻¹¹ A και 10⁻¹⁴ A.

Σκοπός της συγκριτικής μελέτης είναι η ταυτοποίηση των δειγμάτων και ο καθορισμός των επί πλέον συστατικών που υπάρχουν στο ηλεκτρικά καταπονημένο αέριο συγκριτικά με το δείγμα αναφοράς που προέρχεται από τον εφεδρικό πόλο.

Με βάση τη σύσταση του αερίου μπορούν να τεκμηριωθούν συμπεράσματα που επεξηγούν τα αίτια εμφάνισης της αστοχίας, την ποιότητα της αναγέννησης αερίων δειγμάτων, και να χαρακτηριστεί ποιοτικά το επαναχρησιμοποιηθέν αέριο.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων καθώς και τα κυριότερα συμπεράσματα συνοψίζονται στα εξής:

4.1.3.1. Αποτελέσματα που αφορούν τη περιοχή εκδήλωσης της αστοχίας.

A1. Στο θάλαμο του ακροκιβωτίου #1, υπήρξε κατά τη στιγμή της εκδήλωσης της αστοχίας στην μήτρα του SF₆ περισσότερη περιεκτικότητα αέρα –μέχρι και 25 φορές- ως προς τα δείγματα των υπολοίπων θαλάμων.

Το ανωτέρω συμπέρασμα προκύπτει από την ανάλυση των ιοντικών κορυφών 28=N₂ ή/και CO, 14=N, 16=O, 32=O₂ ή/και ³²S, και 40=Ar⁺. Από τις κορυφές ατομικού και μοριακού αζώτου προκύπτει ότι η περιεκτικότητα σε αέρα στον συγκεκριμένο θάλαμο ήταν περίπου κατά $(2 \cdot 10^{-11}A) / (8 \cdot 10^{-13}A) = 25$ φορές περισσότερη από ότι στον εφεδρικό πόλο, που αποτελεί και το δείγμα αναφοράς. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει εάν συγκριθεί η περιεκτικότητα σε αέρα μεταξύ του θαλάμου του ακροκιβωτίου #1 (που εμφάνισε την αστοχία) και όλων των υπολοίπων θαλάμων από τους οποίους παρελήφθησαν δείγματα.

Προσδιορίζεται επίσης ότι, η αυξημένη συγκέντρωση αέρα στη μήτρα του SF₆ προϋπήρξε της εκδήλωσης της αστοχίας, δεδομένου ότι έχει διαταραχθεί η αναλογία μεταξύ N₂/O₂ στη μήτρα του εξαφθοριούχου θείου.

Η παραπάνω διαπίστωση τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι το ατομικό (και μοριακό) οξυγόνο είναι μεν αυξημένο στον θάλαμο του ακροκιβωτίου #1, αλλά μόλις κατά $(4 \cdot 10^{-13}A)/(8 \cdot 10^{-14}A) = 5$ φορές περισσότερο σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Το υπόλοιπο από το οξυγόνο έχει αντιδράσει κατά τη διάσπαση προς δημιουργία στερεών και αερίων παραπροϊόντων. Τα κυριότερα από τα αέρια παραπροϊόντα που κατανάλωσαν το οξυγόνο κατά την εκδήλωση του εσωτερικού βραχυκυκλώματος - και ανιχνεύθησαν- ήταν πρωτίστως CO₂, CO, οξείδια του θείου (SO₂, SO₃ και ασταθείς ρίζες SO⁺) και φυσικά οξυφθοριούχες ενώσεις, οι οποίες προσδίδουν τοξικότητα και χαρακτηριστική οσμή στο καταπονημένο αέριο. Εάν ο αέρας είχε υπεισέλθει στο δείγμα μετά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος θα έπρεπε η αναλογία μορίων οξυγόνου / αζώτου να μην έχει διαταραχθεί.

Η ύπαρξη του αέρα στο αέριο μονωτικό μειώνει έμμεσα τη διηλεκτρική αντοχή του συστήματος και αυξάνει την πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών λόγω των μηχανισμών συνέργειας με τα στερεά μονωτικά.

Είναι γνωστό ότι η τάση διάσπασης του αέρα αυξάνεται δραματικά με την προσθήκη μικρών περιεκτικότητας SF₆. Αντιθέτως, εισαγωγή μικρών περιεκτικότητας ξηρού αέρα στο SF₆ επιφέρουν σχετικά μικρές μειώσεις στην τάση διάσπασης σε ανομοιογενές πεδίο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι προσθήκη 10% αέρα κ.ο. στη μήτρα SF₆ μειώνει μόνον κατά 3% την τάση διάσπασης (IEEE Trans. Pow. App. Sys. Vol. 66 [1963], p.375.). Όμως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα:

Η εισαγωγή του αέρα στο σύστημα εισάγει ταυτόχρονα και ποσοστό υγρασίας, η οποία όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται ότι σε μεγάλο βαθμό παρακρατείται από τα ενεργά (και ακόρεστα) νέα φίλτρα.

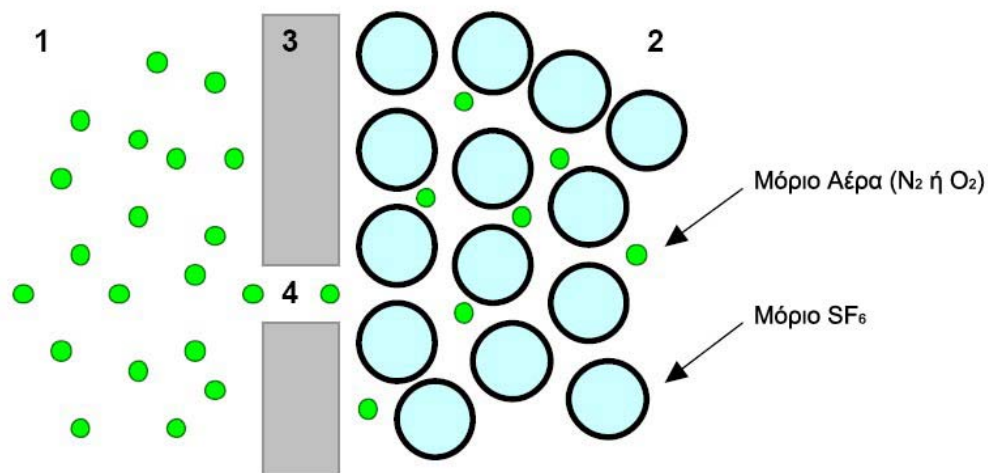
Δεν μπορούν να αγνοηθούν τα επιφανειακά φαινόμενα συνέργειας που αναπτύσσονται πάνω στους στερεούς οργανικούς μονωτήρες που καταπονούνται σε περιβάλλον μήτρας SF₆ που εμπεριέχει οξυγόνο.

Για τους λόγους αυτούς, προκειμένου να αποκλεισθεί η εισαγωγή οξυγόνου στο σύστημα GIS η καθαρότητα του SF₆ πρέπει να κρατείται σε υψηλά ποσοστά (99,9%).

Η είσοδος του αέρα στον θάλαμο ενδεχομένως έγινε κατά την αρχική εγκατάσταση (ανεπαρκής άντληση) ή/και στη συνέχεια, εφόσον υπήρξε κακή στεγανοποίηση από ακατάλληλες φλάντζες.

Το πιθανότερο είναι ότι η ύπαρξη του αέρα στη μήτρα του SF₆ προέρχεται από ανεπαρκή / ελλιπή άντληση του θαλάμου κατά την αρχική εισαγωγή του αερίου στην εγκατάσταση. Λαμβανομένης υπ' όψη της όλης γεωμετρίας των συγκεκριμένων θαλάμων, το γεγονός αυτό είναι πολύ πιθανόν να έχει συμβεί στην πράξη. Στη συγκεκριμένη κατασκευή GIS, η πίεση των θαλάμων παραμένει σταθερή (4 bar) ενώ η κάθε φάση βρίσκεται σε ξεχωριστό θάλαμο. Οι τρεις μεγάλοι όγκοι θαλάμοι αερίου που καθορίζονται μεταξύ της περιοχής των ακροκιβωτίων και του εσωτερικού του κτιρίου της εγκατάστασης GIS επικοινωνούν μεταξύ τους με χάλκινους σωληνίσκους προκειμένου να συνδεθούν σε κοινό αισθητήρα καταγραφής πιέσεων. Όμως, (σύμφωνα με στοιχειώδεις αρχές της τεχνολογίας κενού) η στραγγαλιστική επικοινωνία μεταξύ των θαλάμων αυξάνει την πιθανότητα εσφαλμένης εκτίμησης της ποιότητας του κενού κατά την άντληση της εγκατάστασης και ενδεχομένως συντείνει προς το ενδεχόμενο αυτό.

Η πιθανότητα της βραδείας διείσδυσης αέρα (διάχυσης) στο εσωτερικό των θαλάμων λόγω κακής στεγανοποίησης (από δημιουργία πόρων-μικρορωγμών π.χ. στο εύκαμπτο οργανικό υλικό της ακατάλληλης φλάντζας η οποία παραμορφώθηκε από την υπερβολική σύσφιξη) δεν θα πρέπει επίσης να αποκλεισθεί. Λαμβανομένης υπ' όψη της διαφοράς μεγέθους που υπάρχει μεταξύ των μορίων του αέρα και του εξαφθοριούχου θείου, η υπερπίεση στο θάλαμο GIS είναι μεν περιοριστική αλλά όχι και αποτρεπτική της εισόδου αέρα, δεδομένου ότι το μικρό μέγεθος των μορίων N₂, O₂, επιτρέπει την τοποθέτησή τους στα διάκενα που δημιουργούνται μεταξύ των γειτονικών μορίων του SF₆. Το ενδεχόμενο αυτό παρουσιάζεται σχηματικά ως εξής:



1. Αέρας (1 bar)
2. Εξαφθοριούχο θείο υπό πίεση (4 bar)
3. Χαλύβδινο κέλυφος θαλάμου GIS
4. Θέση κακής στεγανοποίησης-πόρος

Σχήμα 4-1. Μοντέλο που περιγράφει τη διείσδυση των ατόμων του αέρα σε πορώδη τοίχωμα που περιλαμβάνει εξαφθοριούχο θείο υπό πίεση.

A2. Κατά την εκδήλωση του εσωτερικού βραχυκυκλώματος στο θάλαμο του ακροκιβωτίου #1, ουσιαστικά καταπονήθηκε ο στερεός οργανικός μονωτήρας διέλευσης του ακροκιβωτίου ο οποίος επιμόλυνε κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τη μήτρα του SF₆ με πολύ μεγάλη περιεκτικότητα αγωγίμου λεπτομερούς άνθρακα (¹²C⁺, ¹²C⁺⁺), προϊόντα υδρογονανθράκων (C₃H₄⁺), και παραπροϊόντα ατελούς καύσης οργανικού συστατικού (CO⁺) καταναλώνοντας έτσι τις μεγαλύτερες ποσότητες οξυγόνου.

Η εκτεταμένη εισαγωγή του λεπτομερούς άνθρακος (που ανιχνεύεται στη θέση amu/q: ¹²C⁺⁺ = 6, και ¹²C⁺ = 12) στον θάλαμο του αερίου, υποδηλοί ότι, αρχικά το τόξο αναπτύχθηκε επιφανειακά σε οργανικό μονωτήρα (ερπυσμός). Η θέση της αρχικής εκδήλωσης εντοπίζεται από τα ευρήματα στον εποξειδικό μονωτήρα διέλευσης του ακροκιβωτίου που βρίσκεται στο εσωτερικό του θαλάμου GIS. Το αίτιο της δημιουργίας της αστοχίας είναι τα επιφανειακά φαινόμενα συνέργειας μεταξύ του οργανικού μονωτικού και άλλων παραγόντων, ιδιαίτερα δε, της ισχυρής πεδιακής έντασης και της αλλοιωμένης

μήτρας του εξαφθοριούχου θείου το οποίο εμπειρείχε αυξημένη περιεκτικότητα αέρος. Η υψηλή πεδιακή ένταση στη περιοχή εκδήλωσης της αστοχίας πιστοποιείται από το γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ του γειτονικού εξομαλυντού πεδίου και του τοιχώματος του θαλάμου είναι μόλις $\approx 16\text{cm}$ ενώ η εφαρμοζόμενη τάση $\approx 400/\sqrt{3}\text{ kV}$, και η διαφοροποίηση στο αέριο μονωτικό τεκμηριώνεται από την αυξημένη περιεκτικότητα ατομικού-μοριακού οξυγόνου -κατά 25 φορές- σε σχέση με το δείγμα αναφοράς. Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένοι από τους πιθανούς μηχανισμούς που μπορούν να συνεργήσουν πάνω στον μονωτήρα και να οδηγήσουν σε επιτάχυνση των φαινομένων ερπυσμού, επιφέροντας τελικά τη διάσπασή του: σύσταση-κατανομή πληρωτικού μέσου (υπενθυμίζεται ότι, το πληρωτικό μέσον των εποξειδικών μονωτήρων που λειτουργούν στο εσωτερικό των θαλάμων GIS είναι συνήθως δολομίτης ενώ για περιβάλλον αέρος επιλέγονται άλλα πληρωτικά μέσα όπως π.χ. χαλαζίας), υγρασία θαλάμου, θερμοκρασία μονωτήρα, πεδίο-ακτινοβολία χώρου, ανταλλαγή επιφανειακών φορτίων κατά την εξουδετέρωση των ιόντων οξυγόνου κλπ. Η εκδήλωση των ρευμάτων ερπυσμού μειώνει περαιτέρω την διηλεκτρική αντοχή του μονωτήρα δεδομένου ότι αυξάνει και τη θερμοκρασία του. Η ανάπτυξη νηματοειδούς κατανομής ρεύματος κατά το μήκος του μονωτήρα οδηγεί σε καταστροφικό μηχανισμό, γνωστό σαν, δεύτερο μηχανισμό διάσπασης. Κατά το μήκος των αγωγίμων διαύλων αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες που επιφέρουν τήξη ή/και εξάχνωση του μονωτικού υλικού. Τα κυριότερα παραπροϊόντα τήξης του οργανικού μονωτήρα στη μήτρα του αερίου μονωτικού συνήθως συνίστανται σε παράγωγα του άνθρακα. Τα αγωγά παραγωγά του απλά και διπλά ιονισμένου άνθρακα καθιστούν πλέον το αέριο ακατάλληλο για ηλεκτρολογική χρήση.

Επίσης τονίζεται ότι, εάν έχουν παραμείνει επικαθίσεις ($^{12}\text{C}^+$, $^{12}\text{C}^{++}$) σε εσωτερικούς χώρους των θαλάμων GIS και δεν έχουν εντοπισθεί και αποσπασθεί μετά από τη συντήρηση, οι θέσεις αυτές θα χαρακτηρίζονται από αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών στο μέλλον. Τονίζεται επίσης ότι είναι δυνατόν οι δυναμικές γραμμές να έχουν μεταφέρει τον άνθρακα σε μεγάλες αποστάσεις από την αρχική θέση εκδήλωσης της αστοχίας. Ο μονωτήρας διέλευσης ο οποίος ανέπτυξε τον μηχανισμό έναυσης για την εκδήλωση της γενικευμένης αστοχίας δεν ήταν διαθέσιμος κατά την επίσκεψή μας στον ΥΣ. Στο Παράρτημα 2 φαίνεται ένας γειτονικός μονωτήρας στήριξης και διακρίνεται η περιοχή επικάλυψής του με τα προϊόντα άνθρακα.

Άλλα παραπροϊόντα που ανιχνεύονται στο αέριο του ακροκιβώτιου #1 είναι υδρογονάνθρακες C_3H_4^+ με ποσοστά αύξησης $>900\%$, καθώς και, προϊόντα ατελούς καύσης CO^+ με ποσοστά αύξησης στη μήτρα του αερίου $>700\%$. Προφανώς, τα παράγωγα άνθρακος $^{12}\text{C}^+$, $^{12}\text{C}^{++}$, C_3H_4^+ , CO^+ , δεν ανιχνεύονται ούτε στο δείγμα αναφοράς (εφεδρικός πόλος), ούτε στα υπόλοιπα δείγματα που εξετάστηκαν.

A3. Δευτερογενώς, η σβέση του τόξου επέφερε τη δημιουργία παραπροϊόντων του SF_6 επιβαρύνοντας τη μήτρα του SF_6 κυρίως με οξειδία του θείου, αύξηση περιεκτικότητας SO_2 κατά 250% (θέση 64), αύξηση ασταθών ριζών SO^+ (θέση 48) κατά 130%. Η οξύτητα με βάση το HF (θέση 20) αυξήθηκε σε μικρά ποσοστά 20%, ενώ οι πολύ μικρές προσαυξήσεις σε οξυφθοριούχες, SOF^+ δηλώνουν ότι η χρονική διάρκεια εκδήλωσης του τόξου ήταν περιορισμένη. Η χαρακτηριστική οσμή αποδίδεται πρωτίστως στα αυξημένα οξειδία του θείου και στις μικρές –μη ανιχνεύσιμες μονοσήμαντα-περιεκτικότητες H_2S .

A4. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι δεν υπήρξαν αυξημένα ποσοστά υγρασίας στο διασπασθέν αέριο. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι τα φίλτρα λόγω του μικρού χρόνου χρήσης τους ήταν πολύ ενεργά και επομένως παρακράτησαν την υγρασία που ενδεχομένως υπήρξε στον θάλαμο λόγω του αέρα. Επομένως, το σημείο δρόσου του ακροκιβώτιου #1 δεν αναμένεται ότι θα διέφερε ουσιαστικά από τα σημεία δρόσου των υπολοίπων θαλάμων. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει και μία τεράστια αδυναμία του ποιοτικού ελέγχου SF_6 που βασίζεται αποκλειστικά και μόνο στο σημείο δρόσου και όχι στην αναλυτική προσέγγιση ως προς το σύνολο των περιεκτικότητων.

4.1.3.2. Αποτελέσματα που αφορούν δείγματα από θέσεις άλλων ακροκιβωτίων όμοιες με αυτές που εκδήλωσαν την αστοχία (Ακροκιβώτια #2, #3, & #4).

B1. Τα δείγματα αυτά ελέγχονται όμοια ως προς τη σύσταση των παραπροϊόντων τους με το δείγμα αναφοράς του εφεδρικού πόλου. Δεν εμφανίζουν σημεία αλλοιώσεως. Στη μήτρα του SF₆ ανιχνεύονται ίδιες και εντός των αναμενομένων ορίων συγκεντρώσεις για όλα τα δείγματα, σε HF=20, S₂F₂=102, SO₂=64, SOF+ = 67, SOF₂+ = 86, SOF₄+ =124, και SO₂F+. Δεν ανιχνεύονται άλλα παραπροϊόντα.

B2. Τα δείγματα αυτά, μετά από την ηλεκτρική καταπόνηση του ενός και πλέον έτους, δεν έχουν εκδηλώσει γήρανση, ως προς το δείγμα αναφοράς του εφεδρικού πόλου.

Δεδομένου ότι, η γήρανση μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά με την αύξηση της περιεκτικότητας SF₄⁺ στο αέριο μονωτικό, το παραπάνω συμπέρασμα προκύπτει άμεσα εξετάζοντας τις αναλογίες από τις ιοντικές κορυφές 89=SF₃⁺ και 108 = SF₄ μεταξύ του δείγματος αναφοράς και των δειγμάτων που προέρχονται από τους θαλάμους των ακροκιβωτίων #2, #3 και #4. Επίσης τα ποσοστά σε θραύσματα μικρού μοριακού βάρους και οι διπλοί ιονισμοί, που επίσης αποτελούν δείγμα για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του αερίου μονωτικού, παραμένουν αμετάβλητα. Τέλος, δεν παρατηρούνται ισοτοπικά φαινόμενα του θείου (μεταξύ ³²S και ³⁴S).

B3. Το δείγμα που προέρχεται από τον θάλαμο του ακροκιβωτίου #2 εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα αέρα (τουλάχιστον κατά 60%) ως προς το δείγμα αναφοράς, αλλά και τα υπόλοιπα δείγματα των ομοίων χώρων που εξετάστηκαν.

Το ανωτέρω συμπέρασμα προκύπτει από τη συγκριτική μελέτη των κορυφών 14 = N⁺, 16 = O⁺ και 28 = N₂⁺. Για την πιθανή προέλευσή του, ισχύει και εδώ ότι ακριβώς αναφέρθηκε και στην περίπτωση του θαλάμου που εκδήλωσε την αστοχία. Όμως, εδώ η περιεκτικότητα του αέρα είναι κατά πολύ μικρότερη (κατά μία τάξη μεγέθους) συγκριτικά με το θάλαμο του ακροκιβωτίου #1. Δεν παρατηρείται αύξηση των περιεκτικότητων υγρασίας, κατά συνέπεια δεν αναμένεται να υπάρξει και διαφοροποίηση στο σημείο δρόσου. Αυτό αποδίδεται στην ύπαρξη ενεργών και ακόρεστων νέων φίλτρων. Δεν μπορούν να προδιαγραφούν τυχόν φαινόμενα συνέργειας, συνεπώς ο συγκεκριμένος θάλαμος είναι θεμιτό να παρακολουθείται.

Γ. Αποτελέσματα που αφορούν δείγμα από θάλαμο αποζεύκτη (A/Z) το αέριο του οποίου αναγεννήθηκε με μολυσμένο φίλτρο κατά τη διαδικασία συντήρησης.

Κατά τις εργασίες συντήρησης το διασπασθέν αέριο αντλήθηκε μέσα από φίλτρα τα οποία και επιμόλυνε. Στη συνέχεια τα ίδια φίλτρα αρχικά χρησιμοποιήθηκαν (ανεπιτυχώς) για αναγέννηση αερίου όγκου προερχομένου από τον αποζεύκτη (A/Z). Το αποτέλεσμα ήταν να επιμολυνθεί και το αέριο αυτό (εμφάνισε οσμή). Στη συνέχεια έγινε εκ νέου αναγέννηση και μας δόθηκε δείγμα για ανάλυση και έλεγχο της καταλληλότητάς του.

Γ1. Η τελική αναγέννηση του αερίου λειτούργησε ικανοποιητικά στο μεγαλύτερο ποσοστό.

Τα κυριότερα από τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η περιεκτικότητα σε αέρα είναι παρόμοια με αυτή του δείγματος αναφοράς.
- Το τελικό προϊόν εμφανίζει ως προς το δείγμα αναφοράς μικρότερες περιεκτικότητες σε 16=O⁺, 17=HO⁺, 18=H₂O⁺. Αυτό σημαίνει ότι τελικώς υπήρξε αφύγρανση.
- Έγινε παρακράτηση σε οξυφθοριούχες 67=SOF⁺, και 86=SOF₂⁺ με αποτέλεσμα το τελικό δείγμα να εμφανίζει μικρότερα ποσοστά στα ανωτέρω συστατικά, ως προς το δείγμα αναφοράς.
- **Όμως**, υπήρξε αύξηση του παραπροϊόντος SO₂ σε ποσοστό 12% περίπου. Εκτιμάται ότι η επιμόλυνση και εμφάνιση οσμής κατά την αρχική διέλευσή του αερίου μέσα από τα μολυσμένα φίλτρα μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση των οξειδίων του θείου στη μήτρα του SF₆ (που συνδέεται και με την δημιουργία μη ανιχνεύσιμων χαμηλών περιεκτικότητων H₂S). Στη συνέχεια τα οξείδια θείου αφαιρέθηκαν στο μεγαλύτερό τους ποσοστό.
- Δεν υπάρχει διαφοροποίηση ως προς τα υπόλοιπα παραπροϊόντα.

4.1.3. Ανακεφαλαίωση - Τελικά συμπεράσματα.

4.1.3.1. Τα αίτια εκδήλωσης της αστοχίας.

Το αέριο του θαλάμου του ακροκιβώτιου #1 καταπονήθηκε ηλεκτρικά (μερικές εκκενώσεις σε διεπιφάνεια στερεού οργανικού μονωτικού που οδήγησε στην εκδήλωση τόξου ισχύος). Κατά την εκδήλωση της αστοχίας στη μήτρα του SF₆ του συγκεκριμένου θαλάμου υπήρξε αυξημένη περιεκτικότητα αέρα (μέχρι και 25 φορές περισσότερο συγκριτικά με το δείγμα αναφοράς και τα υπόλοιπα εξετασθέντα δείγματα).

Ο μηχανισμός έναυσης της συγκεκριμένης αστοχίας αποδίδεται σε φαινόμενα συνέργειας μεταξύ του εσωτερικού οργανικού μονωτήρα διέλευσης του συγκεκριμένου ακροκιβωτίου και της πλούσιας περιεκτικότητας σε οξυγόνο (ατομικό-μοριακό) στο περιβάλλον αέριο μονωτικό.

Αρχικά αναπτύχθηκαν φαινόμενα ερπυσμού στην επιφάνεια του οργανικού μονωτήρα διέλευσης του ακροκιβωτίου τα οποία οδήγησαν στην αποσύνθεσή του. Το γεγονός αυτό πιστοποιείται από τη σύσταση των κυρίων παραπροϊόντων μετά από την εκδήλωση του εσωτερικού βραχυκυκλώματος. Τα παραπροϊόντα αυτά ήταν ιόντα άνθρακος, υδρογονάνθρακες, και CO. Το περιβάλλον αέριο μονωτικό απορρόφησε την εκλυθείσα θερμότητα. Η δημιουργία των παραπροϊόντων της ατελούς καύσης του οργανικού μονωτήρα κατανάλωσε τις περισσότερες από τις ποσότητες οξυγόνου που υπήρξαν στον θάλαμο κατά τη στιγμή της εκδήλωσης της αστοχίας δημιουργώντας CO. (Τα ιόντα άνθρακος κατέστησαν το αέριο εντελώς ακατάλληλο για περαιτέρω ηλεκτρολογική χρήση και επιμόλυναν το εσωτερικό των θαλάμων. Πλημμελής αφαίρεσή τους κατά τον καθαρισμό εγκυμονεί κινδύνους για πρόκληση μελλοντικών αστοχιών).

Ακολούθησε σχετικά σύντομη σβέση του τόξου από το αέριο μονωτικό, δεδομένου ότι δεν αυξήθηκαν δραστικά οι συγκεντρώσεις των οξυφθοριούχων συστατικών και η οξύτητα του αερίου με βάση το HF. Τα κυριότερα από τα παραπροϊόντα που προέρχονται από την ηλεκτρική καταπόνηση του SF₆ λόγω της σβέσης του τόξου είναι οξείδια του θείου (και ενδεχομένως εξαιρετικά χαμηλή περιεκτικότητα H₂S (το οποίο όμως δεν μπορεί μονοσήμαντα να εντοπισθεί). Η χαρακτηριστική οσμή αποδίδεται κυρίως στο διοξείδιο του θείου, η ολική συγκέντρωση του οποίου υπερτριπλασιασθηκε μετά από την εκδήλωση του εσωτερικού βραχυκυκλώματος.

Είναι γεγονός αναμφισβήτητο ότι, οι αυξημένες περιεκτικότητες αέρα στη μήτρα του SF₆ πίεσεως 4 ατμοσφαιρών, αυξάνουν τη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών (κυρίως με φαινόμενα συνέργειας). Η παρουσία του αέρα στον θάλαμο μπορεί πρωτίστως να αποδοθεί σε ανεπαρκή άντληση των θαλάμων κατά την αρχική εγκατάσταση του συστήματος. Ο συγκεκριμένος θάλαμος ουδέποτε είχε ανοιχθεί ή/και συμπληρωθεί με αέριο από την αρχική του εγκατάσταση και λειτουργία. Το γεγονός ότι οι θάλαμοι των τριών φάσεων στις περιοχές των ακροκιβωτίων επικοινωνούν με στραγγαλιστικούς σωληνίσκους αυξάνει την πιθανότητα εσφαλμένης εκτίμησης της κατάστασης του κενού κατά την διαδικασία πλήρωσης των εγκαταστάσεων με αέριο. (Η επικοινωνία μεταξύ των θαλάμων αποσκοπεί στην καταγραφή των πιέσεων και τον ταυτόχρονο έλεγχο και των τριών χώρων από ένα μόνο αισθητήρα). Άλλη μία παράμετρος που ενδεχομένως έχει συμβάλει μερικώς στα αίτια της εκδήλωσης της αστοχίας είναι η χρησιμοποίηση των ακατάλληλων (αντικραδασικών) φλαντζών για τη στεγανοποίηση των θαλάμων.

4.1.3.2. Χαρακτηρισμός των αερίων δειγμάτων από τους θαλάμους των ακροκιβωτίων #2, #3, & #4.

Τα δείγματα αυτά ελέγχονται όμοια ως προς τη σύσταση των παραπροϊόντων τους (HF⁺, SF₄⁺, S₂F₂⁺, SO₂⁺, SOF⁺, SOF₂⁺, SOF₄⁺, και SO₂F⁺) συγκριτικά με το δείγμα αναφοράς του εφεδρικού πόλου. Μετά από ηλεκτρική καταπόνηση ενός και πλέον έτους, δεν έχουν εκδηλώσει γήρανση και δεν εμφανίζουν σημεία αλλοιώσεων. Δεν ανιχνεύονται άλλα παραπροϊόντα.

Όλα τα δείγματα εμφανίζουν όμοιες χαμηλές περιεκτικότητες υγρασίας και κατά συνέπεια δεν δικαιολογούν διαφοροποιήσεις στα σημεία δρόσου.

Όμως, το δείγμα που προέρχεται από τον θάλαμο του ακροκιβωτίου #2 εμφανίζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα αέρα (τουλάχιστον κατά 60%) ως προς το δείγμα αναφοράς, και τα δείγματα των υπολοίπων θαλάμων που εξετάστηκαν.

Συμπερασματικά τονίζεται ότι η καταγραφή του σημείου δρόσου δεν αρκεί ώστε να καταδείξει μονοσήμαντα την αυξημένη πιθανότητα εκδήλωσης αστοχιών (ιδιαίτερα όταν οι εγκαταστάσεις λειτουργούν με ενεργά / ακόρεστα φίλτρα).

Γ. Αποτελέσματα που αφορούν δείγμα από θάλαμο αποζεύκτη (A/Z).
το αέριο του οποίου αναγεννήθηκε με μολυσμένο φίλτρο
κατά τη διαδικασία συντήρησης.

Το δείγμα του αποζεύκτη (A/Z) εμφανίζει ως προς το δείγμα αναφοράς μικρότερες περιεκτικότητες σε $16=O^+$, $17=HO^+$, $18=H_2O^+$. Αυτό σημαίνει ότι τελικώς υπήρξε αφύγρανση.

Η περιεκτικότητα σε αέρα είναι παρόμοια με αυτή του δείγματος αναφοράς.

Παρατηρείται αύξηση του παραπροϊόντος SO_2 σε ποσοστό 12% περίπου. Εκτιμάται ότι η επιμόλυνση και εμφάνιση της χαρακτηριστικής οσμής κατά την αρχική διέλευσή του αερίου μέσα από τα μολυσμένα φίλτρα μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση των οξειδίων του θείου στη μήτρα του SF_6 . Στη συνέχεια αφαιρέθηκε το SO_2 κατά το μεγαλύτερό του ποσοστό.

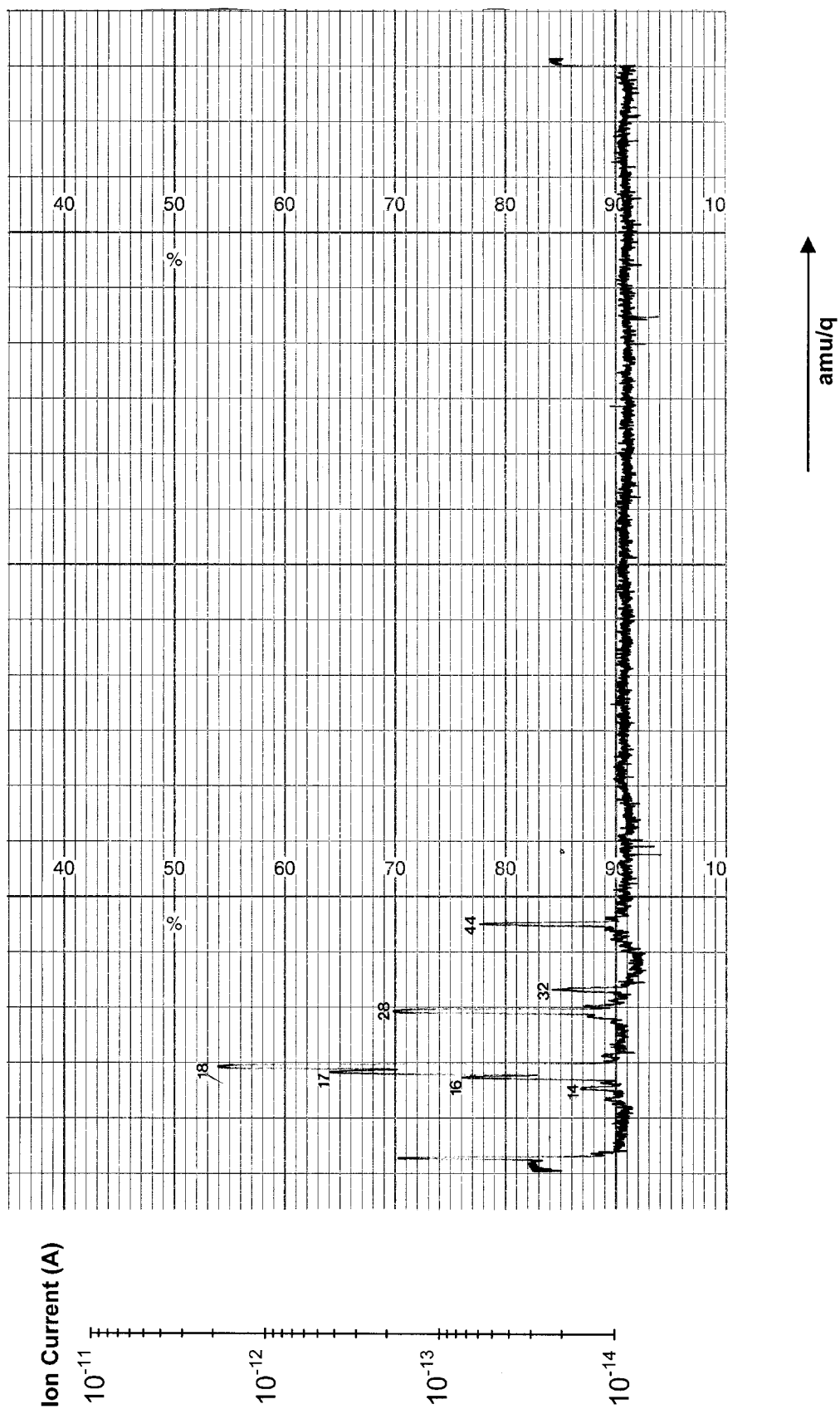
Παρατηρείται διαφοροποίηση των συγκεντρώσεων των οξυφθοριούχων $67=SO_2^+$, και $86=SO_2^+$ δεδομένου ότι το τελικό δείγμα εμφανίζει μικρότερα ποσοστά των συγκεκριμένων συστατικών, ως προς το δείγμα αναφοράς. Δεν υπάρχει διαφοροποίηση ως προς τα υπόλοιπα παραπροϊόντα.

Από τα δείγματα που αναλύθηκαν στο εργαστήριό μας εκτιμάται ότι, μετά από τη συγκεκριμένη διαδικασία συντήρησης, η αλλοίωση της μήτρας του αερίου δεν είναι πλήρως αντιστρεπτή. Όμως, τα καταγραφέντα παραπροϊόντα βρίσκονται εντός των φυσιολογικών τους ορίων.

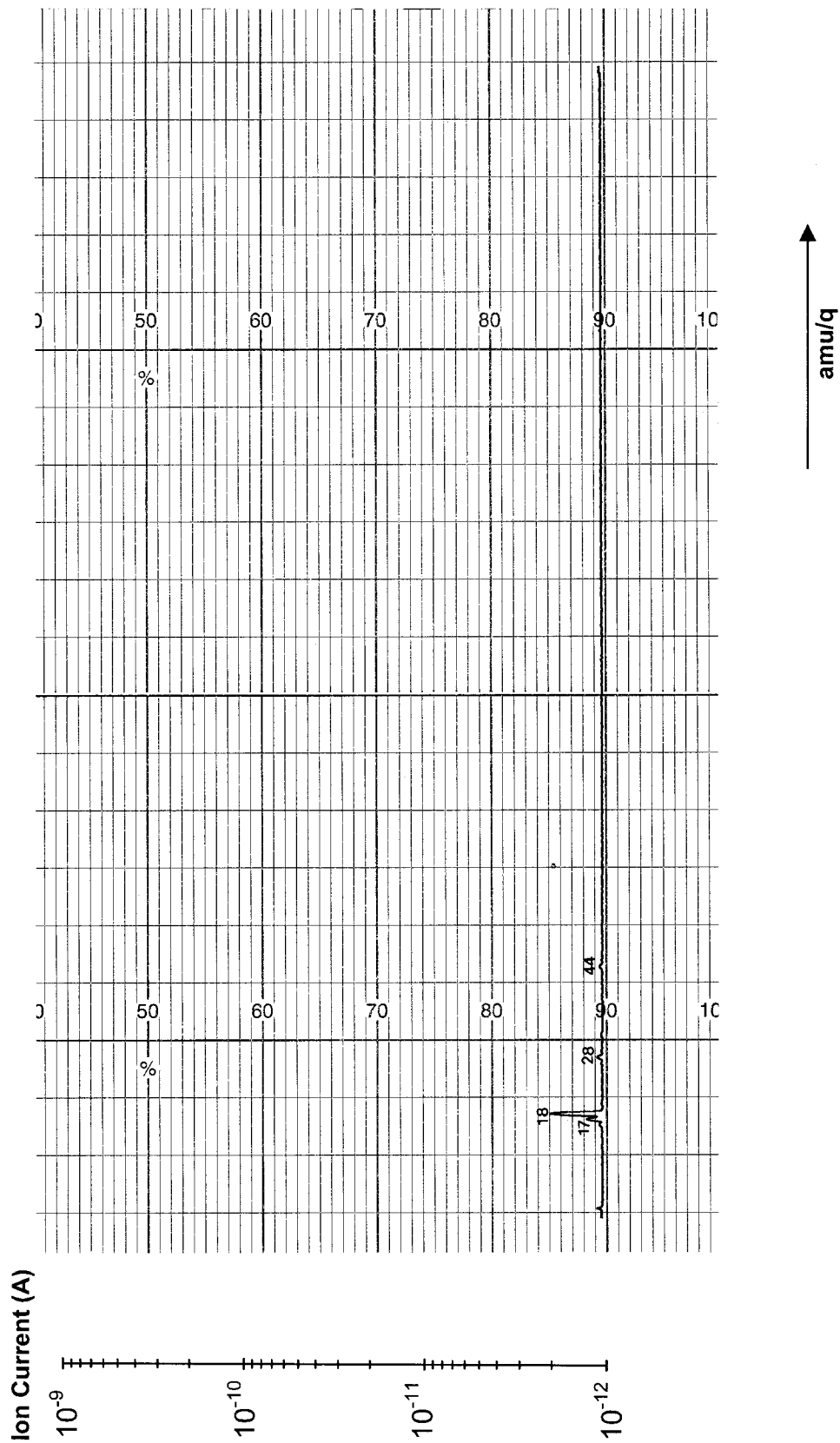
Σημείωση: Η ανωτέρω μελέτη συνετάχθη το 2000 υπό την επίβλεψη και τις οδηγίες του καθηγητή Κωνσταντίνου Θ. Δέρβου

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι. ΦΑΣΜΑΤΑ

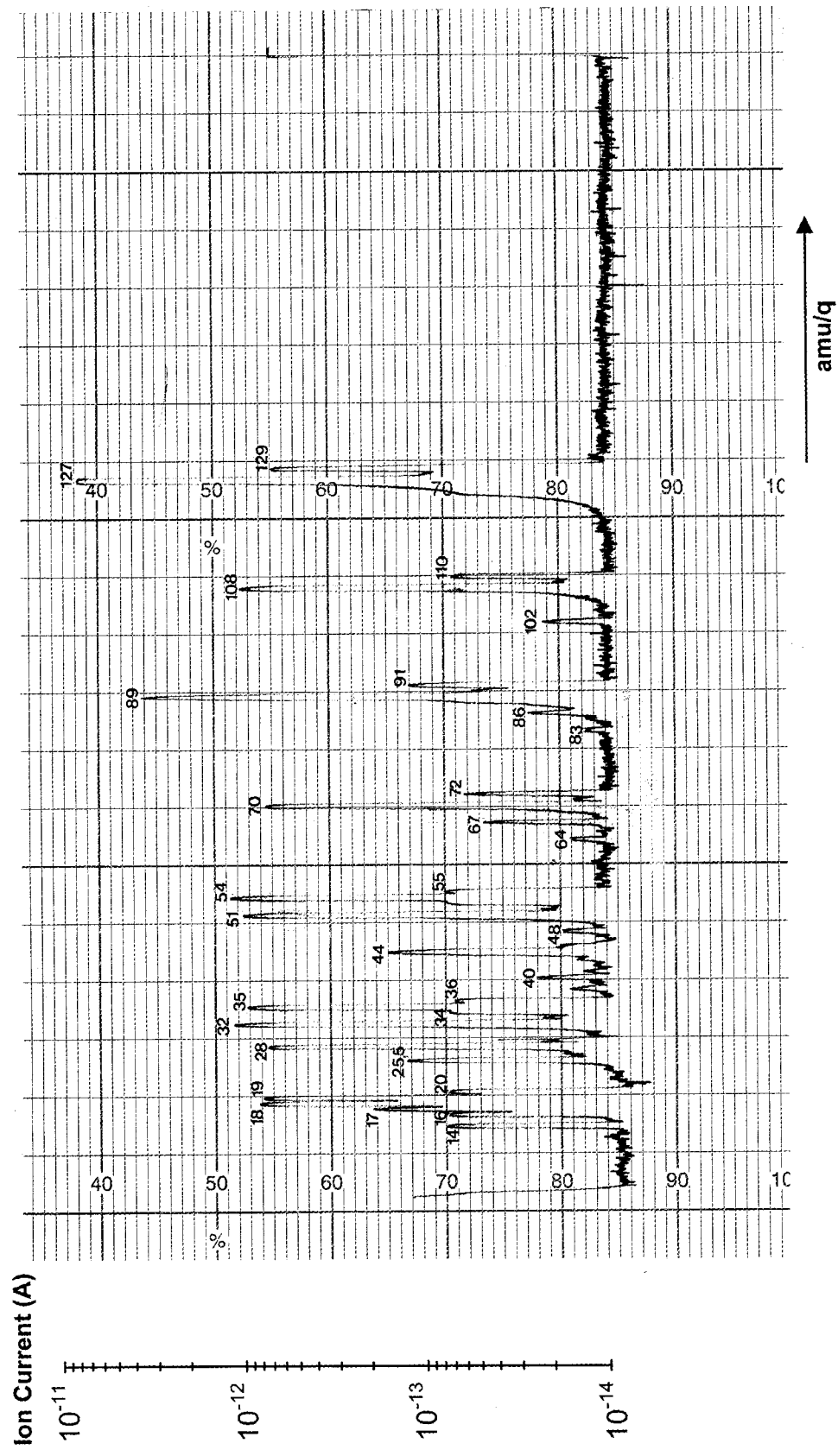
Sample ID: Background
Date: 12-6-2000
Total pressure: $1 \cdot 10^{-7}$ mbar
Scanning speed: 3s/amu
Gain: AUTO, Scale: 10^{-11} A
Comments: UHV



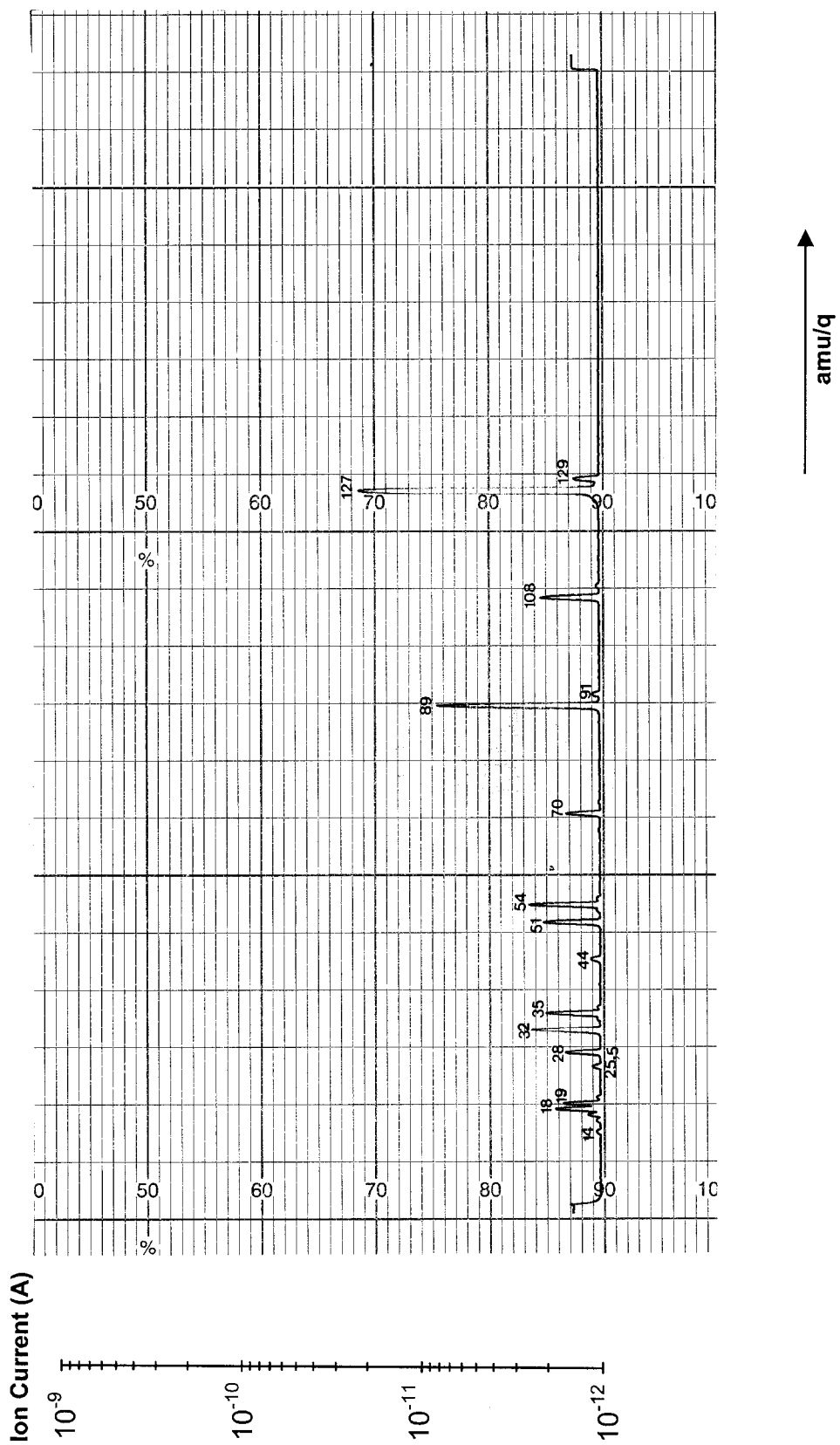
Sample ID: Background
Date: 12-6-2000
Total pressure: $1 \cdot 10^{-7}$ mbar
Scanning speed: 3s/amu
Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
Comments:UHV



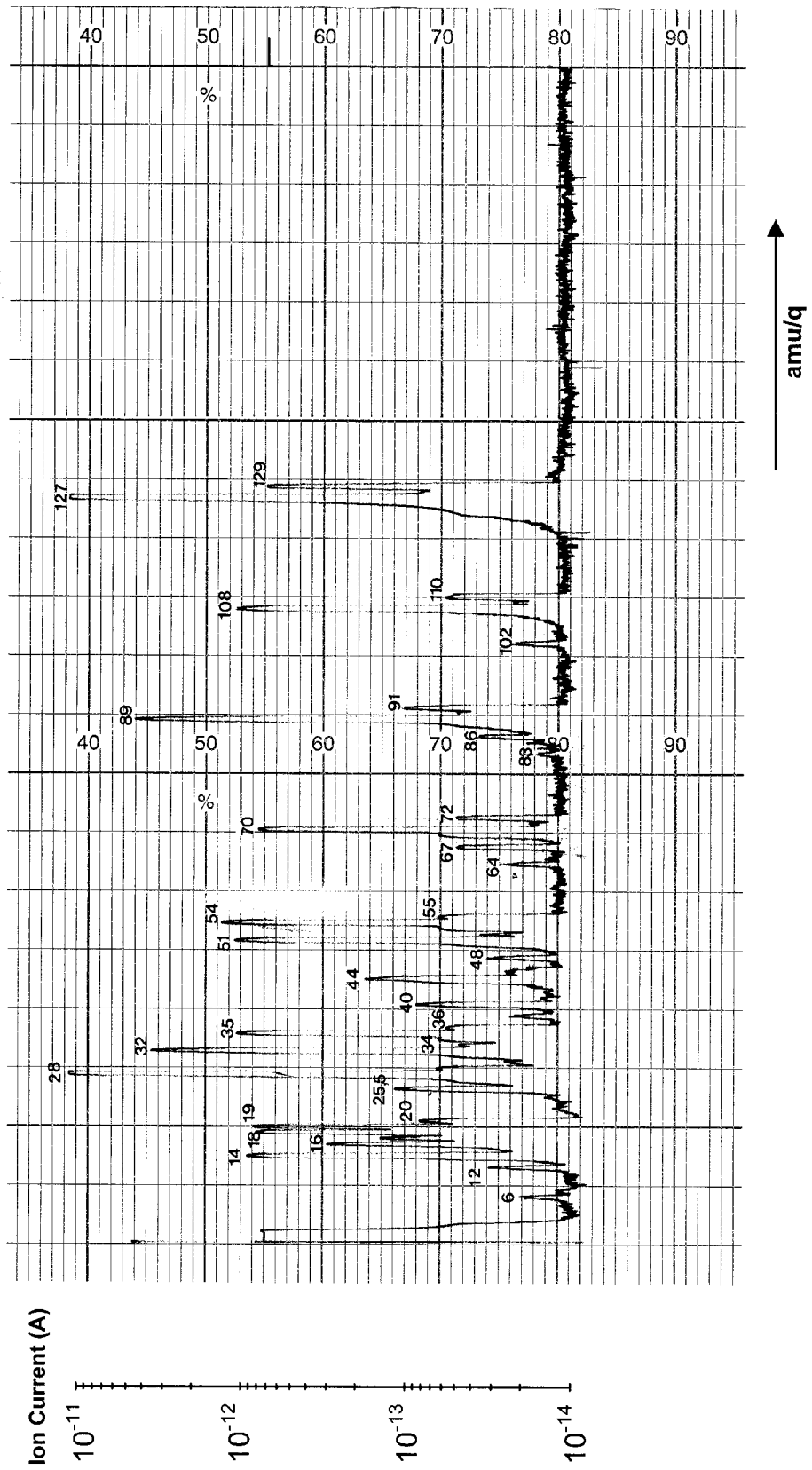
Sample ID Πρωτογενές αέριο από εφεδρικό πόλο
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1,1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-11} A
 Comments: (αναγωγή των ιοντικών κορυφών με βάση το SF₃)



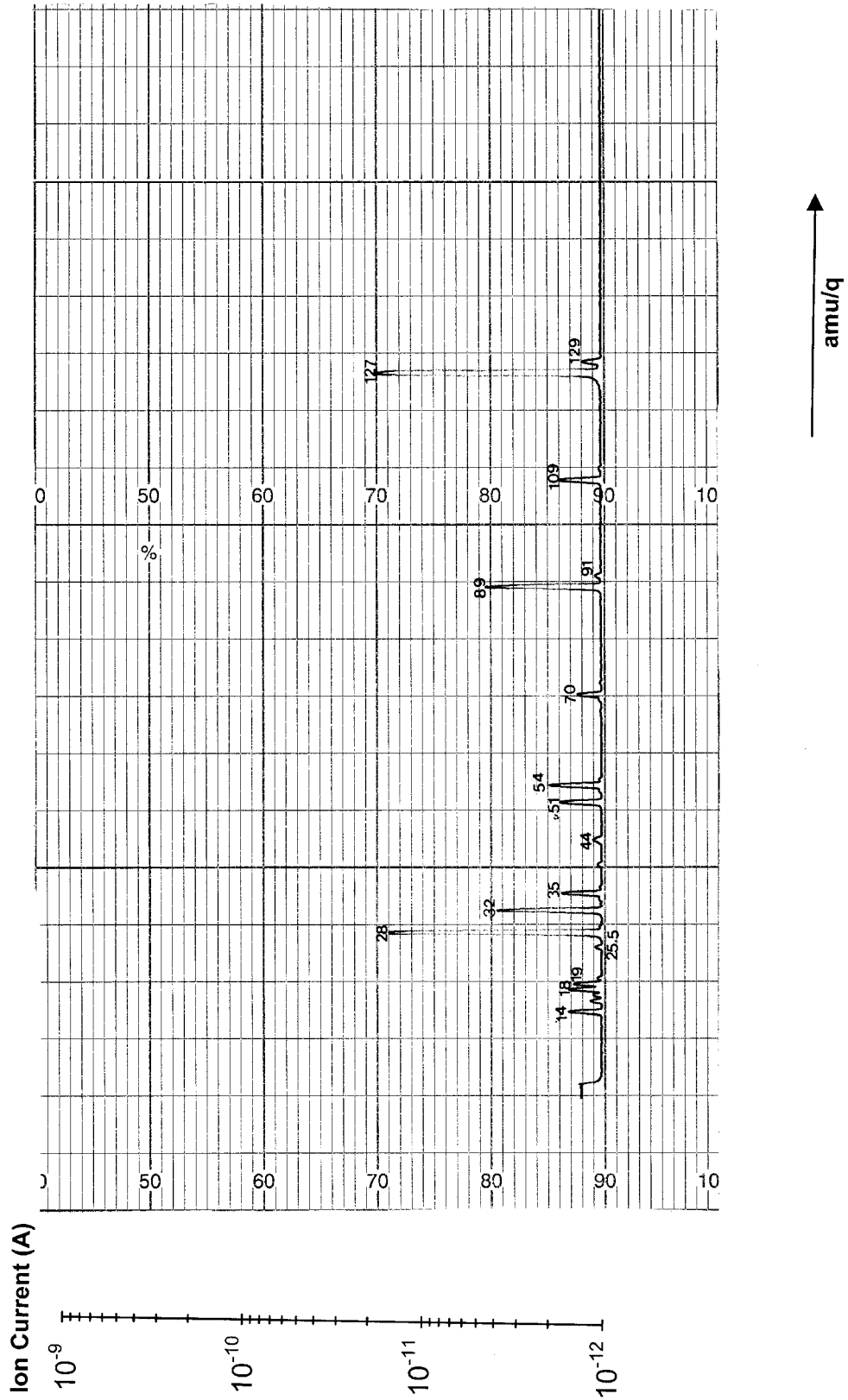
Sample ID: Πρωτογενές αέριο από εφεδρικό πόλο
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
 Comments:



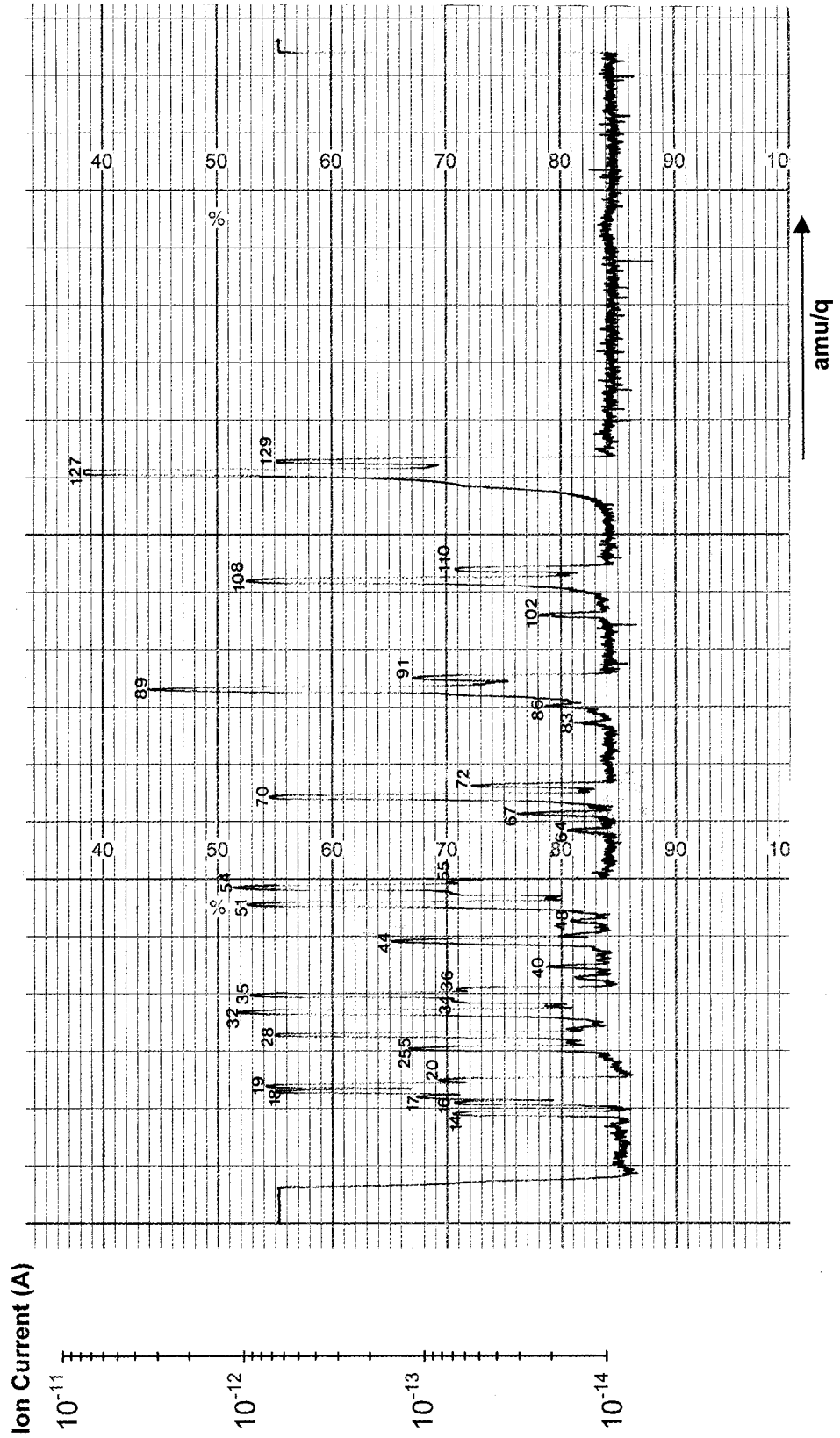
Sample ID: BUSHING 1.
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $3 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-11} A
 Comments: Θάλαμος που αστόχησε.
 Ιονικά ρεύματα ανηγμένα στο SF₃



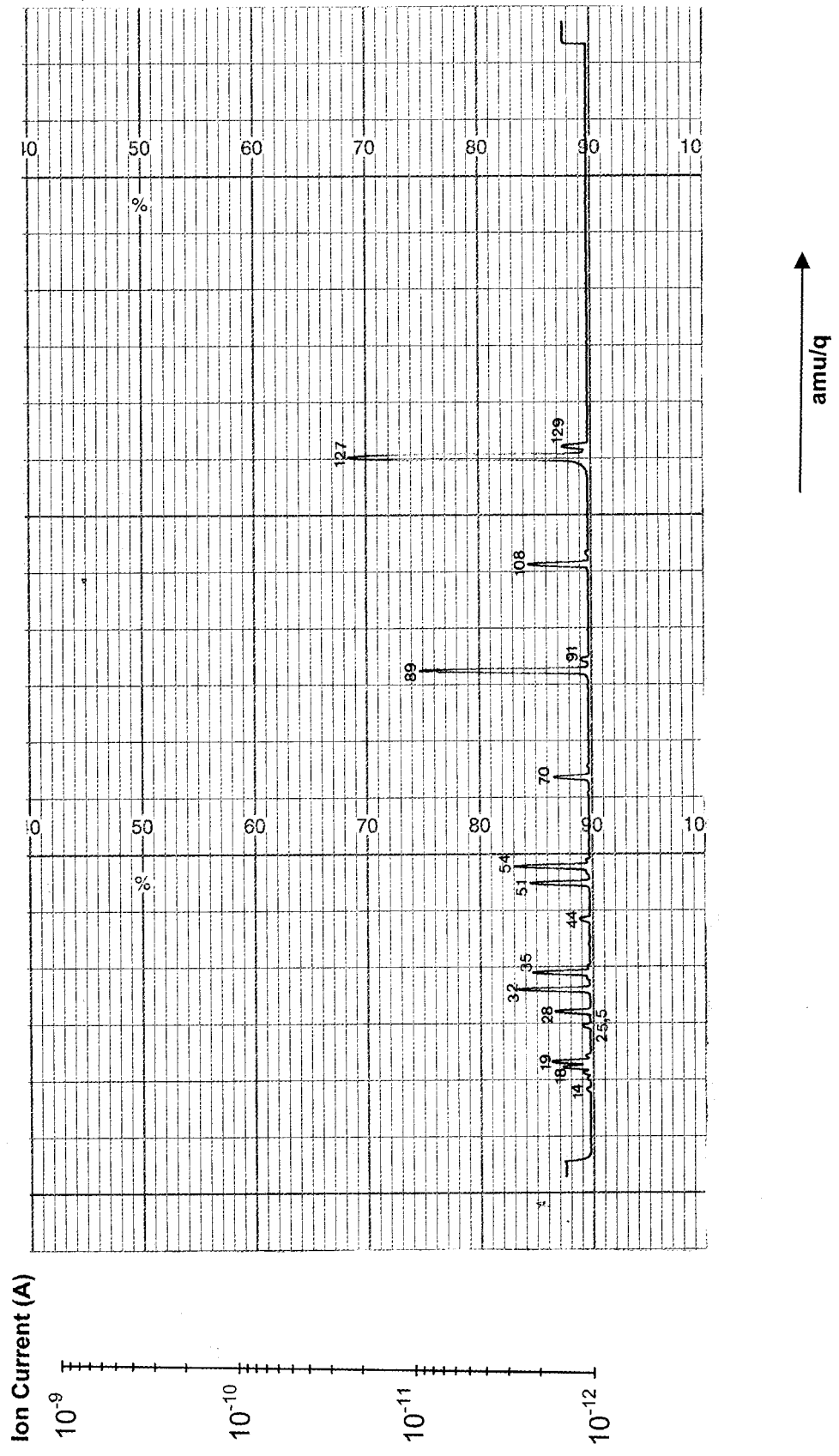
Sample ID: BUSHING 1.
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
 Comments: Θάλαμος που αστόχησε



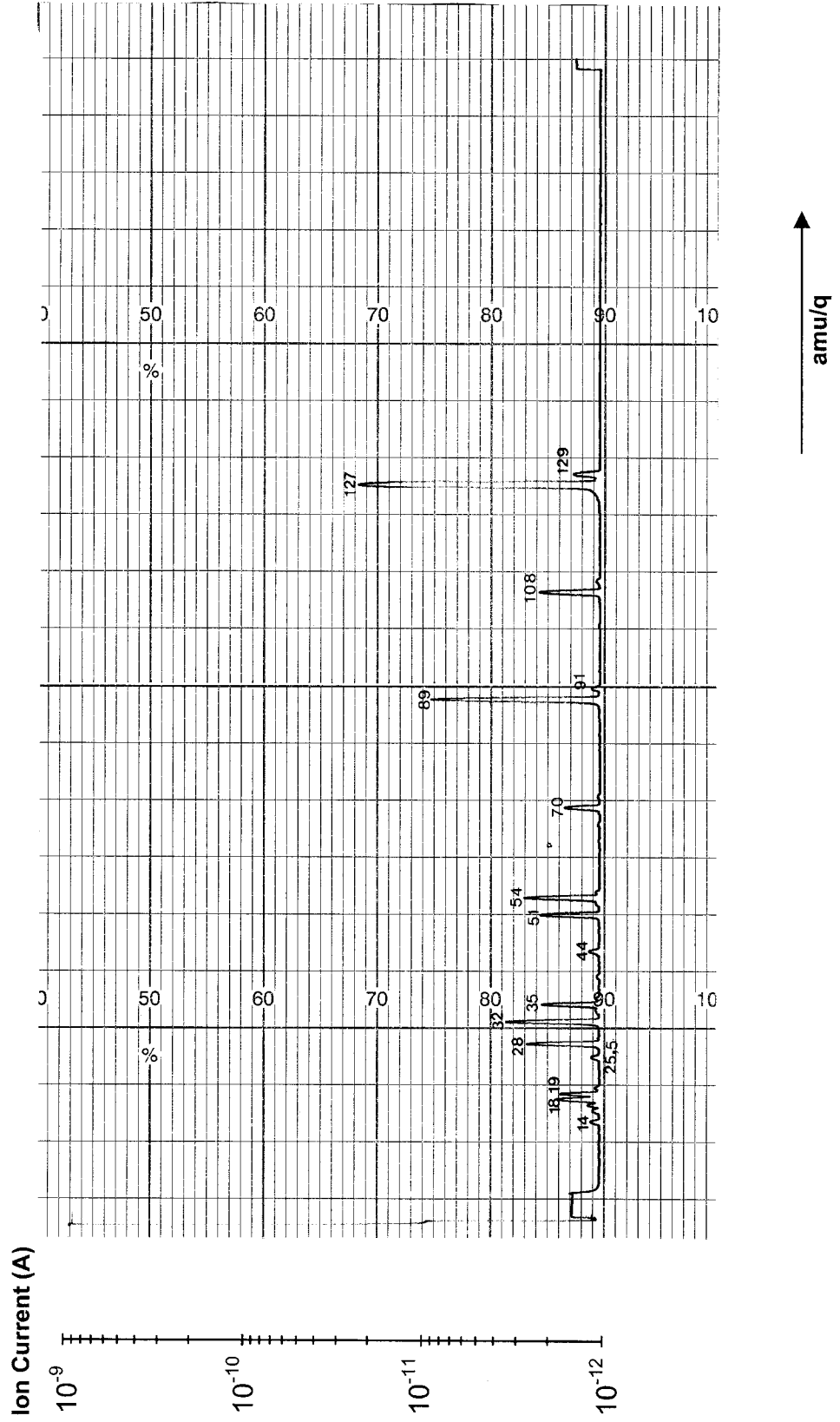
Sample ID: A/Z
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-11} A
 Comments: αναγεννήθηκε με κεκορεσμένα φίλτρα.
 Ιοντικά ρεύματα ανηγμένα στο SF₃



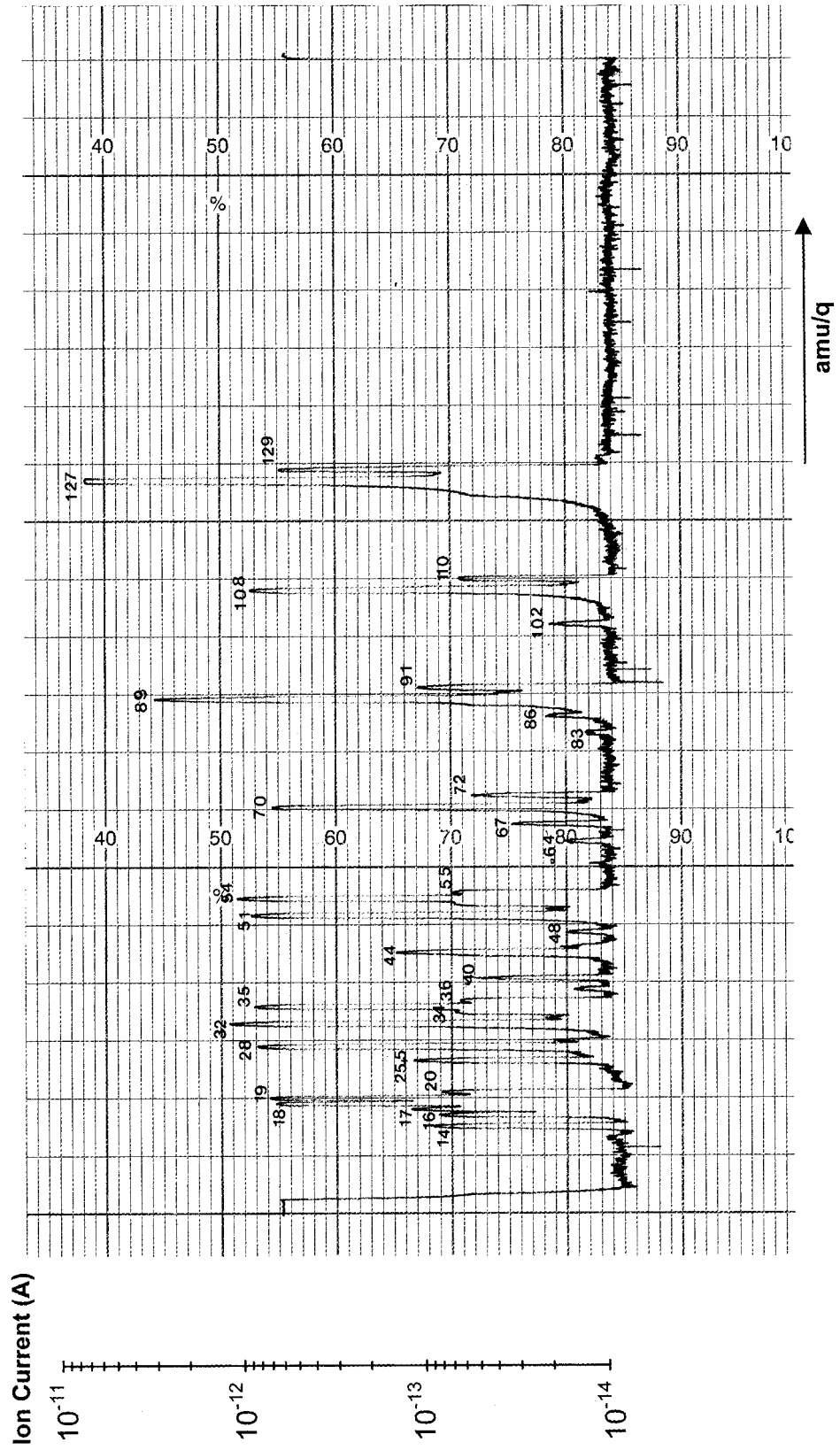
Sample ID: AZ
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1,1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
 Comments: αναγεννήθηκε με κεκορεσμένα φίλτρα



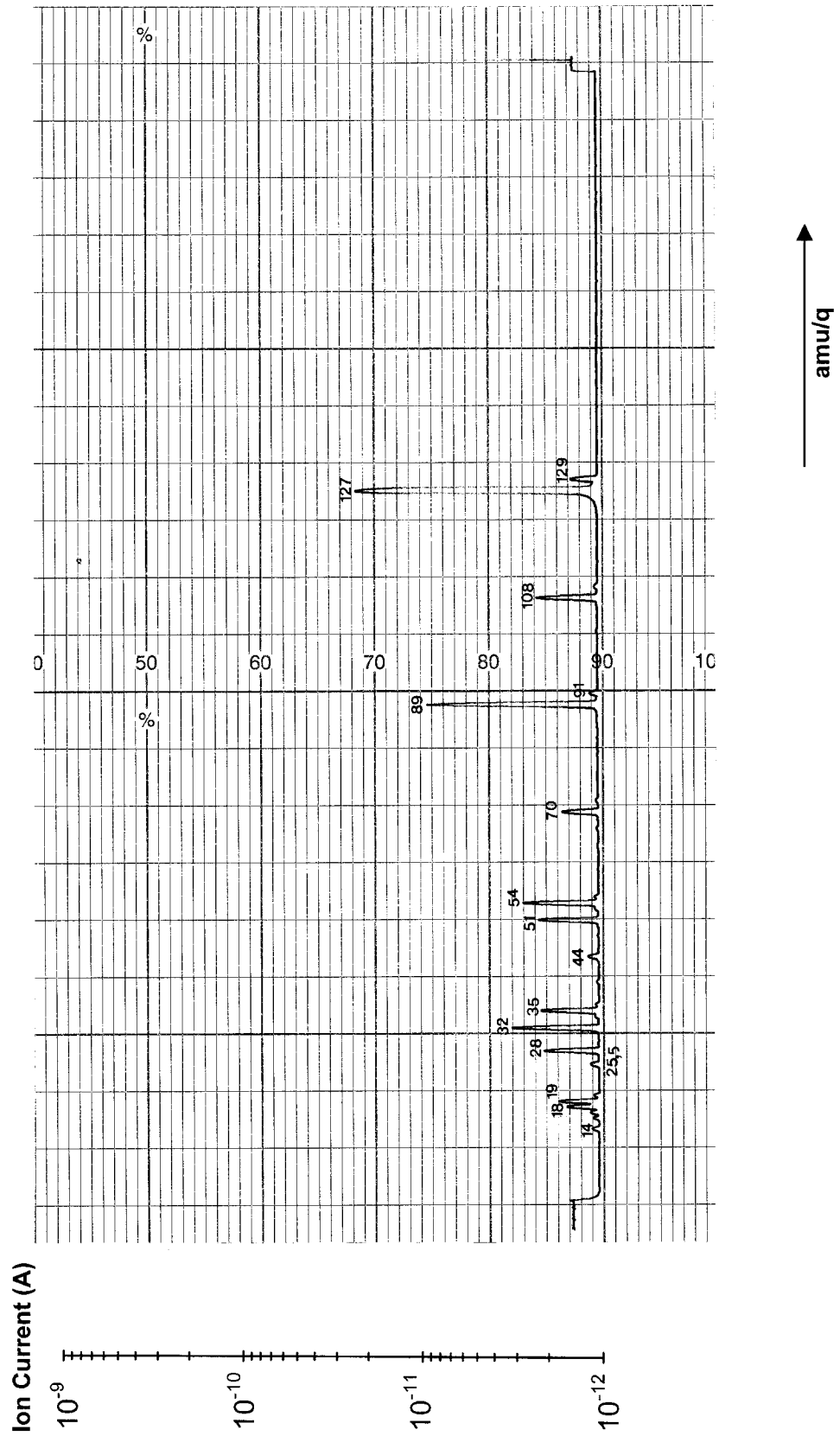
Sample ID: BUSHING 2.
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1.1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
 Comments: NC



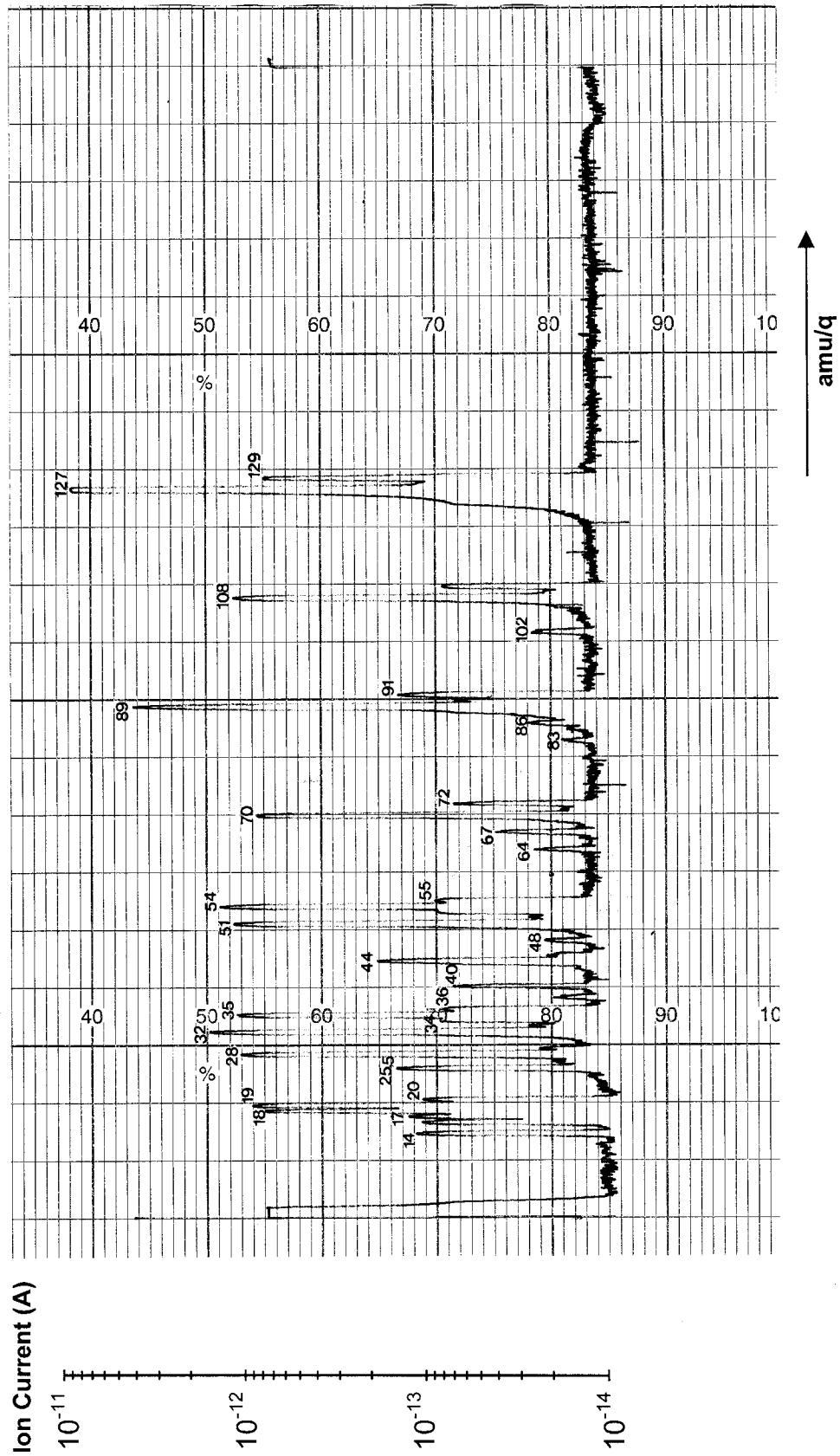
Sample ID: BUSHING 3.
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1,1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-11} A
 Comments: Ιονικά ρεύματα ανηγμένα ως προς το SF₃.



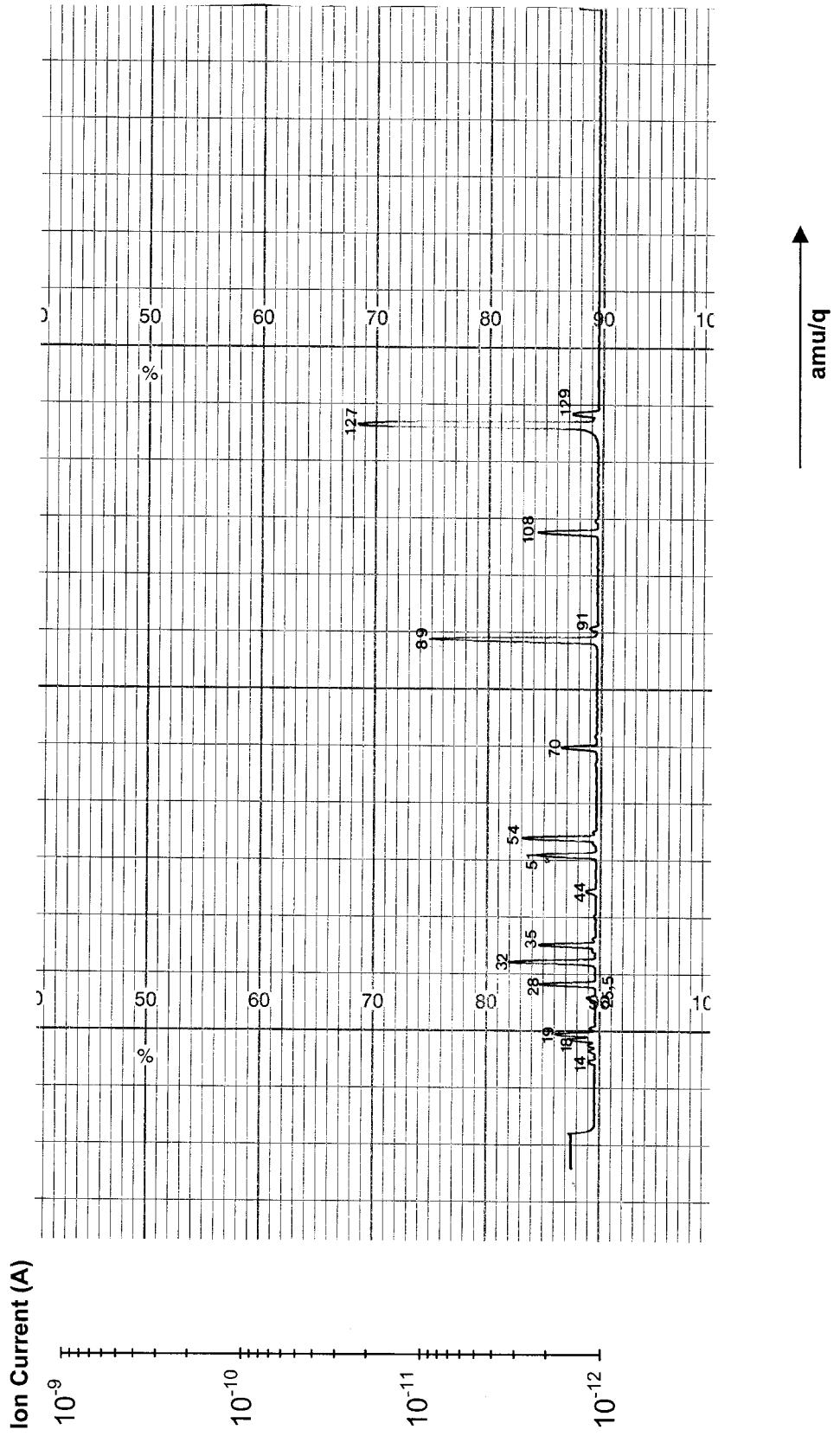
Sample ID: Λαύριο 5. BUSHING P-800
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1,1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
 Comments: NC



Sample ID: BUSHING 4.
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1.1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-11} A
 Comments: Ιοντικά ρεύματα ανηγμένα ως προς SF₃.



Sample ID: BUSHING 4.
 Date: 12-6-2000
 Total pressure: $1,1 \cdot 10^{-5}$ mbar
 Scanning speed: 3s/amu
 Gain: AUTO, Scale: 10^{-9} A
 Comments: NC



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ. ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΛΙΚΟ.



Φωτογραφία από τη θέση ανάπτυξης του εσωτερικού βραχυκυκλώματος στις εγκαταστάσεις του GIS. Οι θάλαμοι των ακροκιβωτίων είναι μεν ξεχωριστοί για την κάθε φάση, αλλά το αέριο είναι κοινό για όλους τους θαλάμους (υπάρχει διασύνδεση με χάλκινους σωληνίσκους σε δύο τουλάχιστον θέσεις). Στους συγκεκριμένους θαλάμους το SF₆ βρίσκεται σε πίεση 4 ατμοσφαιρών.

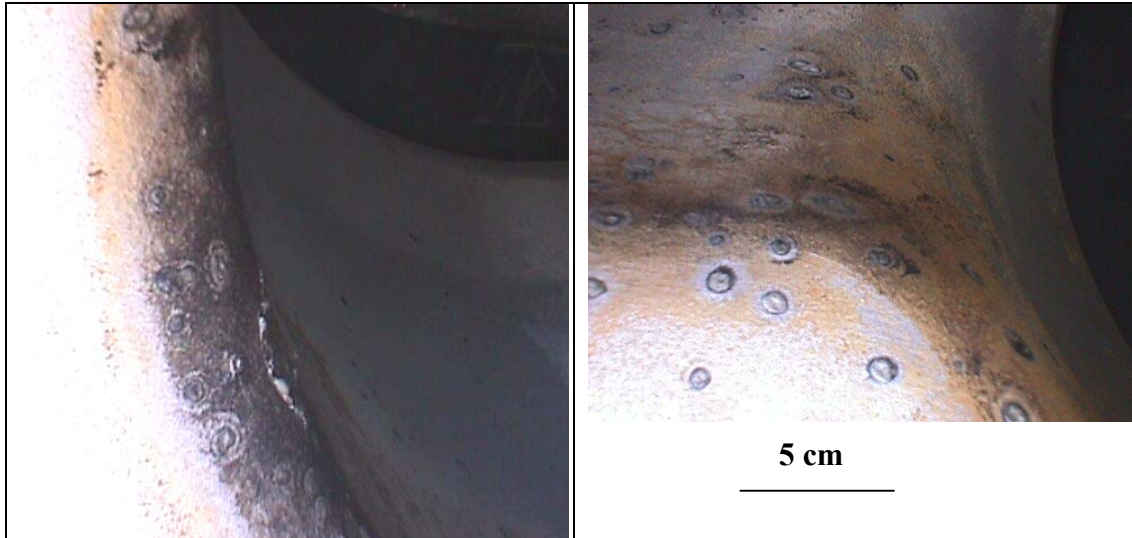


Μία από τις χαλύβδινες φιάλες αποθήκευσης SF₆ (κατά IEC 376) στο KYT GIS προς μεταφοράν του ηλεκτρικά καταπονημένου αερίου οι οποίες θα πρέπει να είναι εφοδιασμένες με ειδική βαλβίδα απομόνωσης (κατά DIN 477) για την περίπτωση που υπάρχουν διαβρωτικά παραπροϊόντα. Ειδική μέριμνα χρειάζεται στην περίπτωση που η περιεκτικότητα HF στη μήτρα του SF₆ ανέλθει άνω του 2% κβ.

Χαρακτηριστικά: μέγιστος όγκος = 600l, μέγιστη πίεση δοκιμής 70 ατμόσφαιρες.



Ο θάλαμος που υπέστη το εσωτερικό βραχυκύκλωμα μετά από την εξαγωγή του από την εγκατάσταση.



Η εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου που εκδήλωσε το βραχυκύκλωμα παρουσιάζει σαφώς εστιασμένες θέσεις τήξης της εσωτερικής χαλύβδινης επιφάνειας του θαλάμου, που υποδηλοί πολλαπλές απολήξεις τόξων, (σε αντίθεση με άλλες αστοχίες GIS στον Ελλαδικό χώρο που έχουν αναπτύξει μηχανισμό «glow-discharge» ο οποίος εξαπλώνεται μεν σε μεγάλη έκταση από τη θέση εκδήλωσης του βραχυκυκλώματος αλλά δεν παρουσιάζει έντονη εστίαση σε συγκεκριμένα σημεία.



Ο εξομαλυντής πεδίου από ΑΙ που βρίσκεται τοποθετημένος στη θέση εκδήλωσης του εσωτερικού βραχυκυκλώματος παρουσιάζει ορισμένες επιφανειακές αλλοιώσεις από τήξη και έχει επικαλυφθεί από προϊόντα του τόξου –κυρίως άνθρακα που προέρχεται από τη φθορά του μονωτήρα διέλευσης (και λιγότερο του μονωτήρα στήριξης) που κατασκευάζονται από εποξειδική ρητίνη και πληρωτικό μέσον με βάση τον δολομίτη.



Ο κυλινδρικός αγωγός αλουμινίου που υπήρχε στο εσωτερικό των θαλάμων GIS στην περιοχή εκδήλωσης του βραχυκυκλώματος δεν φέρει ουσιαστικές εκτεταμένες αλλοιώσεις. Διακρίνονται επίσης οι απολήξεις για τις διασυνδέσεις του.



Ο εφεδρικός πόλος που χρησιμοποιήθηκε για την παροχή του δείγματος αναφοράς SF₆ περιείχε αέριο σε πίεση 1,5 ατμοσφαιρών όμοιο με αυτό που είχε εγκατασταθεί στους θαλάμους του κέντρου GIS. Το αέριο αυτό είχε τοποθετηθεί κατά την εγκατάσταση του Κέντρου Υπερυψηλής Τάσης και ουδέποτε είχε καταπονηθεί. Επομένως αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό «δείγμα-μάρτυρα» της ποιότητας του αερίου που αρχικά είχε τοποθετηθεί στους θαλάμους των εγκαταστάσεων.



Τα φίλτρα παρακράτησης υγρασίας και λοιπών παραπροϊόντων του SF₆ στο θάλαμο του ακροκιβώτιου #1 βρίσκονται κοντά στη θέση αρχικής εκδήλωσης της αστοχίας και εμφάνισαν έντονη προσβολή, επικάλυψη άνθρακος και οξείδωση.



Μονωτήρας διέλευσης/στήριξης του αγωγού που υπέστη αλλοιώσεις από το εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Ο μονωτήρας έχει επικαλυφθεί με παραπροϊόντα από αγωγίμο άνθρακα.

5. Συμπεράσματα

Το Εξαφθοριούχο Θείο είναι ένα ανώτερο διηλεκτρικό αέριο για σχεδόν όλες τις εφαρμογές υψηλών τάσεων. Είναι εύχρηστο, έχει εξαιρετικές ιδιότητες μόνωσης και διακοπής του τόξου, και έχει αποδειχθεί η απόδοσή του τις τελευταίες δεκαετίες χρήσης και έρευνας. Έχει σαφώς ανώτερη απόδοση από τον αέρα και το μονωτικό λάδι που χρησιμοποιήθηκε στον εξοπλισμό ΥΤ πριν από την ανάπτυξη του SF₆.

Στην εργασία αυτή έγινε αναφορά στον ποιοτικό έλεγχο δηλαδή τη ποσοτική ανάλυση των προϊόντων αποσύνθεσης του SF₆, που λήφθηκε από θάλαμο GIS ΥΤ όπου εκδηλώθηκε αστοχία. Έγινε χρήση της Τετραπολικής Φασματομετρίας Μάζας (QMS) για την ανάλυση του αερίου. Αυτή η τεχνική παρέχει την απαραίτητη ευαισθησία για τον καθορισμό των συγκεντρώσεων των παραπροϊόντων του εξαφθοριούχου θείου της τάξης των ppm (μέρη ανά εκατομμύριο κατά όγκο). Έτσι επιτυγχάνουμε την μεγιστοποίηση της μελλοντικής λειτουργίας του εξοπλισμού, σχεδιάζοντας κατάλληλα και καθοριστικά την έκταση των επιθεωρήσεων και τη συντήρηση των υποσταθμών ισχύος. Επίσης μπορούμε να διαγνώσουμε τις αιτίες μιας αστοχίας ή βλάβης του εξοπλισμού ώστε να βελτιώσουμε την αξιοπιστία του συστήματος στο μέλλον επιτρέποντας την ασφάλεια του προσωπικού και την προστασία του περιβάλλοντος.

6: Βιβλιογραφία

- [1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2005.
- [2] Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆, (NIST Technical Note 1425), L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, D.S. Green. November 1997.
- [3] Gas analysis by infrared spectroscopy as a tool for electrical fault diagnostics in SF₆ insulated equipment. HM Heise, R Kurte, P Fischer, D Klockow, PR Janissek. Fresenius J Anal Chem (1997) 358: 793-799.
- [4] Sulphur Hexafluoride, Solvay Fluor und Derivate.
- [5] SF₆ Switchgear H M Ryan & G R Jones, IEE Power Engineering Series 10.
- [6] Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry. L. G. Christophorou, J. K. Ithoff, and R. J. Van Brunt. IEEE Electrical Insulation Magazine. 1997
- [7] Byproducts of Sulfur Hexafluoride (SF₆), Use in the Electric Power Industry. US EPA Jan 2002.
- [8] Influence of Reactive SF_x Gases on Electrode Surface after Electrical Discharge under SF₆ Atmosphere. C. Beyer, H. Jenett, and D. Klockow. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 7 No. 2, April 2000.
- [9] Honeywell Accudri SF₆ Gas Analysis Program. Honeywell Fluorine Products.
- [10] Maintenance and Handling of GAS INSULATION. United States of America – Department of Energy. Chapter 4, February 1994. Power System Maintenance Manual.
- [11] Production of SO₂F₂, SOF₄, (SOF₂ + SF₄), S₂F₁₀, S₂OF₁₀, and S₂O₂F₁₀ in SF₆ and (50-50) SF₆-CF₄ mixtures exposed to negative coronas. C. Pradayrol, A. M. Casanovas, C. Aventin, and J. Casanovas. J.Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997) 1356-1369.
- [12] Decomposition products from negative and 50 Hz ac corona discharges in compressed SF₆ and SF₆/N₂ (10:90) mixtures. Effect of water vapour added to the gas. L. Vial, A. M. Casanovas, I. Coll and J Casanovas. J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) 1681-1692.
- [13] Influence of a solid insulator on the spark decomposition of SF₆ and 50% SF₆ + 50% CF₄ mixtures. A. M. Cassanovas, I. Coll, C. Pradayrol, and J Cassanovas. J. phys. D: appl. Phys. 31 (1998) 2835-2845.
- [14] Oak Ridge National Laboratory Health & Safety Research Division, 50th Anniversary.
- [15] Ion Mobility Spectrometry for On-site Sensing of SF₆ Decomposition. O Soppart, P Pilzecker, JI Baumbach, D Klockow, E Trimbade. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 7 No.2, April 2000, 229-233.
- [16] Equipment Monitoring Selection as a part of Substation Automation. W J Bergman PSS, Circuit Breaker Monitoring IEEE Switchgear Meeting Pittsburgh, PA November 11, 1999.