



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

**Εξειδικευμένες Χρήσεις και Εφαρμογές του  
Μονωτικού Αερίου SF<sub>6</sub>**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Δημήτριος Ι. Γκίνης**

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος  
- Καθηγητής ΗΜΜΥ ΕΜΠ

Αθήνα: Ιούνιος 2013





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

## Εξειδικευμένες Χρήσεις και Εφαρμογές του Μονωτικού Αερίου SF<sub>6</sub>

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ι. Γκίνης

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος  
- Καθηγητής ΗΜΜΥ ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30 Ιουνίου, 2013

.....  
Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος  
Καθηγητής ΗΜΜΥ ΕΜΠ

.....  
Παναγιώτα Βασιλείου  
Καθηγήτρια ΧΜ ΕΜΠ

.....  
Ηλείας Αβραμόπουλος  
Καθηγητής ΗΜΜΥ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2013

Copyright © Δημήτριος Ι. Γκίνης , 2013  
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.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη διπλωματική εργασία αυτή, γίνεται μια καταγραφή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του τεχνητού αερίου εξαφθοριούχου θείου ( $SF_6$ ). Εξετάζονται οι ιδιότητές του και η χρησιμότητά του ως μονωτικό αέριο στην ηλεκτρική βιομηχανία. Συγκεκριμένα εξετάζεται η υπεροχή του εξαφθοριούχου θείου στους διακόπτες ισχύος, στις γραμμές μεταφοράς και στους μετασχηματιστές. Ακόμα αναλύεται η χρήση του στην βιομηχανία όπως στη χύτευση μετάλλων από μαγνήσιο και αλουμίνιο. Αναφέρονται οι εφαρμογές του σε ηχομονωτικά τζάμια, παραγωγή ημιαγωγών, οφθαλμολογία κ.α. Παρουσιάζεται ο τετραπολικός φασματογράφος μάζας και η ανίχνευση του αερίου σε εγκαταστάσεις από διαρροή. Τέλος γίνεται αναφορά στο φαινόμενο θερμοκηπίου και η συμβολή του εξαφθοριούχου θείου σε αυτό ως ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρομονωτικό αέριο, ηλεκτραρνητικότητα, διηλεκτρική σταθερά, σβέση ηλεκτρικού τόξου, χύτευση μαγνησίου, ιχνηθέτης αερίου, σκιαστικό μέσο, τετραπολικό φίλτρο μαζών, αέριο θερμοκηπίου.

## **ABSTRACT**

In this thesis, there is a record of the physical and chemical properties of artificial gas sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ). Its properties and its usefulness are examined as an insulating gas in electrical industry. More specifically, is considered the superiority of sulfur hexafluoride in power switches, transmission lines and transformers. What is more, in this project, is analyzed its use in the industry such as the casting of metal magnesium and aluminum. There are mentioned applications in soundproof windows, semiconductor manufacturing, ophthalmology etc. There is shown the quadrupole mass spectrometer, and the detection of gas leakage from plants. Finally a reference is made to the greenhouse effect and the contribution of sulfur hexafluoride in this as a powerful greenhouse gas.

## **Key Words**

$\text{SF}_6$  , Gaseous Dielectric, Electron affinity, electric arc extinguishing , magnesium casting, ultrasonic imaging, Quadrupole Mass Spectrometer, greenhouse gases .

## **Ευχαριστίες.**

Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Δέρβο για την βοήθειά του στην αποπεράτωση της Διπλωματικής μου εργασίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο	Σελίδα
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΕΡΙΟ SF <sub>6</sub>	11
2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ SF <sub>6</sub>	14
2.1 Το εξαφθοριούχο Θείο ως ηλεκτρομονωτικό υλικό.	14
2.2 Ηλεκτραρνητικότητα	14
2.3 Διηλεκτρική σταθερά	15
2.4 Διηλεκτρική Αντοχή	15
2.5 Ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου	18
2.6 Άλλες φυσικές ιδιότητες	22
3. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ SF <sub>6</sub> ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	28
3.1 Διακόπτες ισχύος GIS	28
3.2 Γραμμές μεταφοράς GTIL	29
3.3 Μετασχηματιστές Τάσεως – Ρεύματος	30
3.4 Παραπροϊόντα SF <sub>6</sub>	31
4. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ SF <sub>6</sub> ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	35
4.1 Χύτευση Μαγνησίου , Αλουμινίου	35
4.2 Ηχομονωτικά τζάμια.	37
4.3 Ελαστικά Αυτοκινήτων.	38
4.4 Σόλες Παπουτσιών.	38
4.5 Ιχνηθέτης Αερίου ( tracer ) .	38
4.6 Παραγωγή Ημιαγωγών – Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων .	38
4.7 Ιατρική – Οφθαλμολογία	39
4.8 Υπερηχογραφία.	40



Κεφάλαιο		Σελίδα
5.	ΠΑΡΑΠΡΟΙΟΝΤΑ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ SF <sub>6</sub>	42
5.1	Αρχή λειτουργίας των τετραπολικών φίλτρων.	43
5.2	Η Πηγή Ιόντων	46
5.3	Τετραπολικό φίλτρο μαζών.	47
5.4	Ανιχνευτής Ιόντων - Συλλέκτης.	48
5.5	Η μελέτη του καθαρού και ξηρού SF <sub>6</sub> με την χρήση του τετραπολικού φασματογράφου μαζών.	49
5.6	Φάσμα μαζών καθαρού και ξηρού SF <sub>6</sub> .	50
5.7	Ανίχνευση μικρών περιεκτικοτήτων SF <sub>6</sub> στον αέρα	52
6.	ΤΟ SF <sub>6</sub> ΑΕΡΙΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	54
6.1	Φαινόμενο του θερμοκηπίου και SF <sub>6</sub>	54
6.2	Η συγκέντρωση του SF <sub>6</sub> στο περιβάλλον.	56
6.3	Το αέριο SF <sub>6</sub> ως ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου.	57
6.4	Η επίδραση του SF <sub>6</sub> στο φάσμα ακτινοβολίας	58
6.5	Συμπεράσματα	63

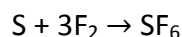
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αιώνας που πέρασε, χαρακτηρίστηκε από έντονη βιομηχανική και τεχνολογική ανάπτυξη και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου για το μεγαλύτερο μέρος των ανθρώπων της γης. Αυτό ήταν το αποτέλεσμα της διεύρυνσης και χρήσης κάθε μορφής ενέργειας όπως για παράδειγμα η ηλεκτρική. Η ευημερία όμως του κοινωνικού συνόλου, υποβαθμίζεται από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρει η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση της ενέργειας και το οικονομικό κόστος για την μείωση αυτών. Η ανάπτυξη της Χημείας και των χημικών εφαρμογών, είναι ένας τομέας της επιστήμης που πρωτοστάτησε στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας. Έτσι λοιπόν ο άνθρωπος εκτός απ' τις χημικές ενώσεις που βρήκε στη φύση, δημιούργησε και άλλες για να τον βοηθήσουν στους σκοπούς του. Μια αέρια χημική ένωση που κατασκεύασε είναι ο εξαφθοριούχος θείος, με χημικό τύπο SF<sub>6</sub>, ο οποίος βρήκε και βρίσκει πολλές τεχνολογικές εφαρμογές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να γνωρίσει στον αναγνώστη αυτό το αέριο, καταδεικνύοντας τις ιδιότητές του και πώς αυτές είναι η αιτία που χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών. Αλλά και την προσοχή που πρέπει να δείχνουμε κατά την διαχείρισή του ώστε να αποφεύγεται η επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Οι εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες που παρουσιάζει, το έχουν κάνει να προτιμάται κατά πολύ από άλλα στοιχεία σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και να βρίσκει εφαρμογές στην μεταλλουργία, στην αεροναυπηγική και αλλού.

## 1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΕΡΙΟ SF<sub>6</sub>

Η σύνθεση του εξαφθοριούχου θείου πραγματοποιήθηκε το 1900 απ' τον Henri Moissan ο οποίος έξη χρόνια αργότερα τιμήθηκε με το βραβείο Nobel για την επιτυχία του να απομονώσει το φθόριο με ηλεκτρολυτική μέθοδο. Η σύνθεση του SF<sub>6</sub> γίνεται με απ' ευθείας αντίδραση αερίου φθορίου με θείο σύμφωνα με την αντίδραση:



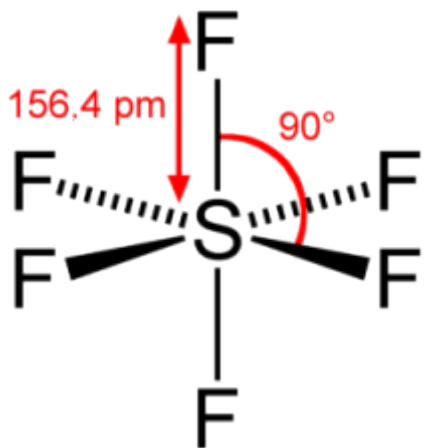
Κατά την παραπάνω σύνθεση, παράγονται και μικρές ποσότητες άλλων φθοριούχων ενώσεων όπως S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> και SF<sub>4</sub>, οι οποίες είναι πολύ δραστικές, σε αντίθεση με το SF<sub>6</sub> που είναι χημικά αδρανές και διαχωρίζονται εύκολα με διάλυμα NaOH. Η χαρακτηριστικότερη ιδιότητα του SF<sub>6</sub> είναι η μεγάλη του χημική αδράνεια. Είναι τόσο αδρανές που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν "συνθετικό ευγενές αέριο". Παρακάτω αναφέρονται οι φυσικές και χημικές ιδιότητές του.

### Φυσικοχημικές ιδιότητες

Εμφάνιση	Άχρωμο, άοσμο, άγευστο, άφλεκτο αέριο
Μοριακός τύπος	SF <sub>6</sub>
Σχετική μοριακή μάζα	146,06
Ειδικό βάρος (αέριο)	6,164 g/L σε πίεση 1 bar (5,1 φορές βαρύτερο του αέρα)
Ειδικό βάρος (υγρό)	1,329 g/cm <sup>3</sup> (σε 25 °C)
Ειδικό βάρος (στερεό)	2,51 g/cm <sup>3</sup> (σε -50,8 °C)
Σημείο τήξης	-64 °C
Αποσύνθεση	500°C
Διαλυτότητα	0,0063 MI/MI ύδατος και 0,408 MI/mLελαίου M/T
Κρίσιμη θερμοκρασία	45,7 °C
Κρίσιμη πίεση	37 atm
Διπολική ροπή	0
Γεωμετρία μορίου	Κανονικό οκτάεδρο

**Πίνακας 1** Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται μερικές από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του SF<sub>6</sub>.

Στο σχήμα 1 φαίνεται η δομή του μορίου στον χώρο .Είναι φανερό ότι καταλαμβάνει την μορφή κανονικού οκταέδρου. Οι πολλές εφαρμογές που βρίσκει το αέριο αυτό στη σύγχρονη τεχνολογία οφείλονται στις φυσικές και χημικές του ιδιότητες. Παρατηρώντας τον πίνακα 1 βλέπουμε ότι το μοριακό του βάρος ( 146,5 ) είναι περίπου 5 φορές βαρύτερο απ' τον αέρα πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να παραμείνει σε ανοικτό δοχείο σαν να ήταν "αόρατο" υγρό. Μπορεί δηλαδή να απομονώσει την επιφάνεια ενός μετάλλου απ' τον ατμοσφαιρικό αέρα σαν μια μεμβράνη. Αυτό βρίσκει εφαρμογή στην μεταλλουργεία, κατά την χύτευση του μαγνησίου προστατεύει απ' την ανάφλεξη. Το ευγενές αέριο Xe ( ατομικό βάρος 131,1) θα είχε την ίδια συμπεριφορά αλλά λόγω του μεγάλου κόστους παραγωγής και επειδή δρα ως ελαφρύ ναρκωτικό δεν ενδείκνυται .



**Σχήμα 1:** Η δομή στον χώρο του SF<sub>6</sub> .

Όμως σχεδόν το 80% της παραγωγής του SF<sub>6</sub> χρησιμοποιείται σε διάφορα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της μηδενικής διπολικής ροπής αλλά και του μεγάλου μεγέθους του μορίου του , το καθιστά άριστο διηλεκτρικό υλικό σε διακόπτες και αγωγούς υψηλών τάσεων. Ειδικά η χρήση του σε διακόπτες υψηλών και υπερυψηλών τάσεων αποτρέπει τον σχηματισμό ηλεκτρικού τόξου που καθιστά αναποτελεσματική την διακοπή ρεύματος (συνεχίζει να κυκλοφορεί ρεύμα ) και καταστρέφει τις επαφές του διακόπτη λόγω ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών. Ένας άλλος λόγος που προτιμάται το SF<sub>6</sub> είναι ότι καθίσταται δυνατή η κατασκευή διακοπών , μετασχηματιστών κ.λπ. εξαρτημάτων σε σχετικά μικρό μέγεθος, κατάλληλων για κλειστούς χώρους σε αντίθεση με τα συστήματα που μονώνονται με αέρα που καταλαμβάνουν πολύ μεγαλύτερο χώρο .Σημαντικές φαίνεται ότι είναι οι εφαρμογές του SF<sub>6</sub> και στον ιατρικό χώρο, αφού η ιδιαίτερα χαμηλή διαλυτότητα στο αίμα, το κάνουν χρήσιμο στην οφθαλμολογική χειρουργική, όπου

χρησιμοποιείται για μακροχρόνια κάλυψη σαν ταμπόν.

Κατά την λήψη υπερηχογραφήμάτων, όταν δεν υπάρχει καλή ορατότητα των αιμοφόρων αγγείων, διοχετεύεται με ένεση SF<sub>6</sub> και έτσι έχουμε ουσία αντίθεσης, που βελτιώνει την εικόνα.

Χρησιμοποιείται ευρύτατα στους διπλούς υαλοπίνακες κατοικιών. Λόγο της μικρής θερμικής αγωγιμότητας, παρεμβάλλεται στο κενό ανάμεσα απ' τους δύο υαλοπίνακες για την επίτευξη υψηλότερης θερμομόνωσης .

Αν και το SF<sub>6</sub> είναι αέριο μη τοξικό, ακίνδυνο και βρίσκεται ακόμα σε πολύ χαμηλά επίπεδα στην ατμόσφαιρα, λόγω της μεγάλης δυναμικότητάς του ως "αέριο θερμοκηπίου" ( 1 Kg SF<sub>6</sub> συμβάλλει όσο 22 τόνοι CO<sub>2</sub> ) καταβάλλονται προσπάθειες να μειωθούν οι χρησιμοποιούμενες ποσότητές του όπως και οι διαρροές του. Κατά τη χρήση του SF<sub>6</sub> ως μονωτικό αέριο στους διακόπτες GIS , λόγω του τόξου που δημιουργείται απ' το άνοιγμα των επαφών , προκαλείται ρήξη ενός ή περισσοτέρων δεσμών S-F με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν προϊόντα ιδιαίτερα διαβρωτικά (π.χ. το HF ) και τοξικά (π.χ. το S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>). Τα προϊόντα αυτά διαβρώνουν τις επαφές των διακοπών, γι' αυτό γίνεται προσπάθεια να αφαιρεθούν με "μοριακά κόσκινα" ή άλλα μέσα. Επειδή πρέπει να αποφεύγεται το άνοιγμα του ηλεκτρικού εξοπλισμού , η ανάλυση του αερίου γίνεται με δειγματοληψία. Οι τεχνικές ανάλυσης των δειγμάτων όπως υπέρυθρης φασματομετρίας (IR), χρωματογραφίας αερίων (GC), φασματοσκοπίας υπέρυθρων με μετασχηματισμό Fourier (FTIR) μας βοηθούν στον ποιοτικό έλεγχο του αερίου για τον εντοπισμό παραπροϊόντων. Στο εργαστήριο μονωτικών υλικών του ΕΜΠ, υπάρχει ο τετραπολικός φασματογράφος μάζας (QMS), με τον οποίο μπορεί να γίνει ανάλυση αερίου για ανίχνευση ουσιών σε εξαιρετικά μικρή περιεκτικότητα.

### **Βιβλιογραφία:**

- [1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων , Κ. Θ. Δέρβος ,Αθήνα 2005.
- [2] Wikipedia : "Sulfur Hexafluoride"
- [3] Η χημική ένωση του μήνα (Σεπτέμβριος 2007)

## 2. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΕΡΙΟΥ SF<sub>6</sub>

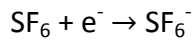
### 2.1 Το εξαφθοριούχο Θείο ως ηλεκτρομονωτικό υλικό.

Το εξαφθοριούχο θείο, ένα αέριο όχι φυσικό, αλλά το παρασκεύασε ο άνθρωπος, δηλαδή ένα ανθρωπογενές αέριο, άρχισε να διατίθεται στο εμπόριο το 1945. Λόγω των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του μελετήθηκε και διερευνήθηκε εκτενώς και έτσι έχει πολλές εφαρμογές στην σύγχρονη τεχνολογία.

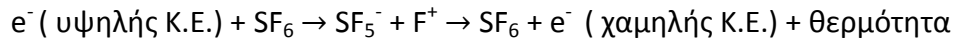
Το αέριο SF<sub>6</sub> σε κανονικές συνθήκες είναι μη τοξικό, άφλεκτο, χημικά αδρανές και σταθερό ( δεν αποσυντίθεται στην αέρια φάση σε θερμοκρασίες μικρότερες από 500 °C ). Λόγω της ηλεκτραρνητικότητάς του (ικανότητα να δεσμεύει ηλεκτρόνια) είναι άριστο ηλεκτρομονωτικό υλικό σε εξαρτήματα διακοπών και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε θερμοκρασίες αρκετά μεγαλύτερες από τους 21 °C. Η τάση διάσπασης του SF<sub>6</sub> είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη απ' αυτή του αέρα σε κανονικές συνθήκες πίεσης . Έχει τη δυνατότητα και ανασχηματίζεται πάλι μετά από διασπάσεις λόγω ηλεκτρικών εκκενώσεων ή τόξων. Τα περισσότερα παραπροϊόντα δεν υποβαθμίζουν την διηλεκτρική του αντοχή και μπορούν αφαιρεθούν σχετικά εύκολα με φιλτράρισμα. Κατά την διάρκεια των ηλεκτρικών τόξων, δεν παράγει κανέναν πολυμερισμό με άνθρακα ή άλλες αγωγίμες εναποθέσεις στον εξοπλισμό, είναι δε συμβατό με τα περισσότερα στερεά μονωτικά και αγωγίμα υλικά που χρησιμοποιούνται. Απαιτείται μεγάλη πίεση για να υγροποιηθεί στους 21 °C και έτσι επιτρέπει να συμπιέζεται έως και 6 ατμόσφαιρες ώστε να καταφέρουμε τα μεγαλύτερα δυνατά αποτελέσματα σε μικρό όγκο εξοπλισμού. Υγροποιείται εύκολα με συμπίεση και αποθηκεύεται φιάλες αερίου ενώ η τιμή του είναι σχετικά χαμηλή.

### 2.2 Ηλεκτραρνητικότητα

Οι άριστες μονωτικές ιδιότητες του SF<sub>6</sub> και η ικανότητά του να σβήνει το ηλεκτρικό τόξο οφείλονται στην ισχυρή ηλεκτραρνητικότητά του αλλά και στο μέγεθος του μορίου του. Ηλεκτραρνητικότητα είναι η ικανότητα ενός ατόμου να έλκει προς το μέρος του, το ηλεκτρόνιο που σχηματίζει δεσμό με άλλα άτομα ή στοιχεία (το F είναι το ηλεκτραρνητικότερο στοιχείο του περιοδικού πίνακα διότι η εξωτερική στοιβάδα είναι κοντά στον πυρήνα, η L, και έχει 7 ηλεκτρόνια αλλά και το F είναι ηλεκτραρνητικό με 6 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα ). Έτσι τυχόν ελεύθερα ηλεκτρόνια με ενέργεια μεταξύ 0,1 eV και 0,05 eV δεσμεύονται προς σχηματισμό ανιόντος SF<sub>6</sub><sup>-</sup> ( resonance capture), σύμφωνα με την εξίσωση:



Το SF<sub>6</sub> είναι αποτελεσματικότερο απ' τον αέρα στην απόσβεση ηλεκτρικού τόξου επειδή η διάμετρος του ατόμου είναι πολύ μεγάλη. Έτσι όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ενέργεια μεγαλύτερη του 0,1 eV, προσκρούσει πάνω στο μόριο, ελαττώνει την κινητική του ενέργεια. Στη συνέχεια δημιουργείται προϊόν F<sup>+</sup> που επανασυνδέεται με το μόριο, αποδεδμεύοντας ηλεκτρόνιο χαμηλής κινητικής ενέργειας και το μόριο παραμένει αναλλοίωτο σύμφωνα με την εξίσωση :

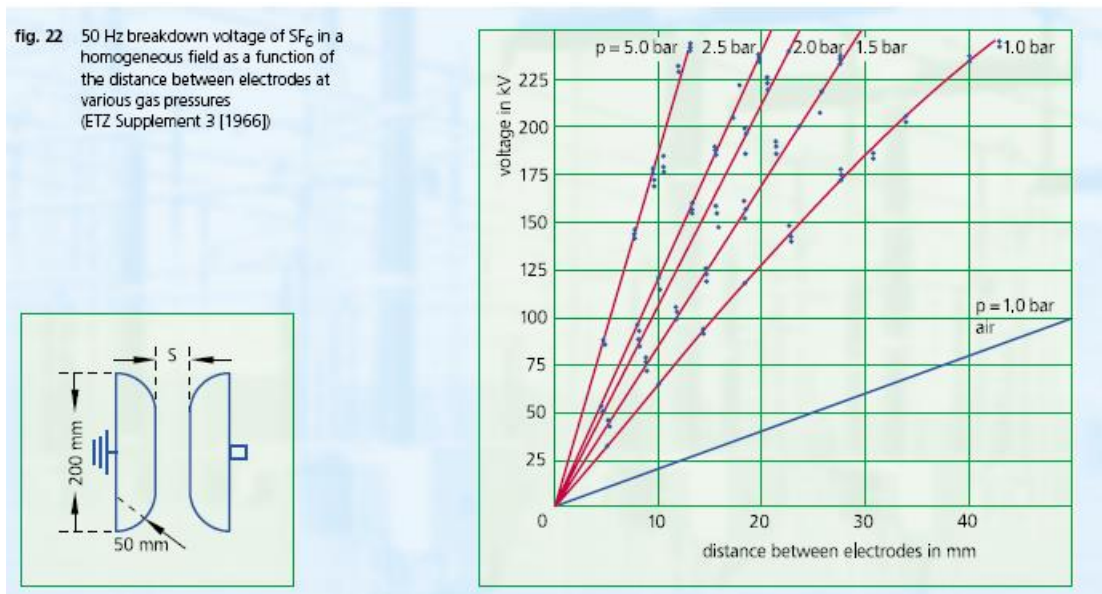


Έτσι τα μόρια του SF<sub>6</sub> ανακόπτουν το φαινόμενο χιονοστιβάδας από τις διαδοχικές και ραγδαία αυξανόμενες προσκρούσεις ηλεκτρονίων .

### 2.3 Διηλεκτρική σταθερά:

Η διηλεκτρική σταθερά του SF<sub>6</sub> είναι 1,0021 στους 20 °C για πίεση 1,0133 bar και συχνότητα 23,340 MHz. Όταν αυξηθεί η πίεση στα 20 bar η διηλεκτρική σταθερά αυξάνεται κατά 6% . Στους 50 °C η διηλεκτρική σταθερά του υγρού SF<sub>6</sub> σε εύρος συχνοτήτων από 10 έως 500 kHz παραμένει σταθερή στην τιμή 1,81±0,02 .

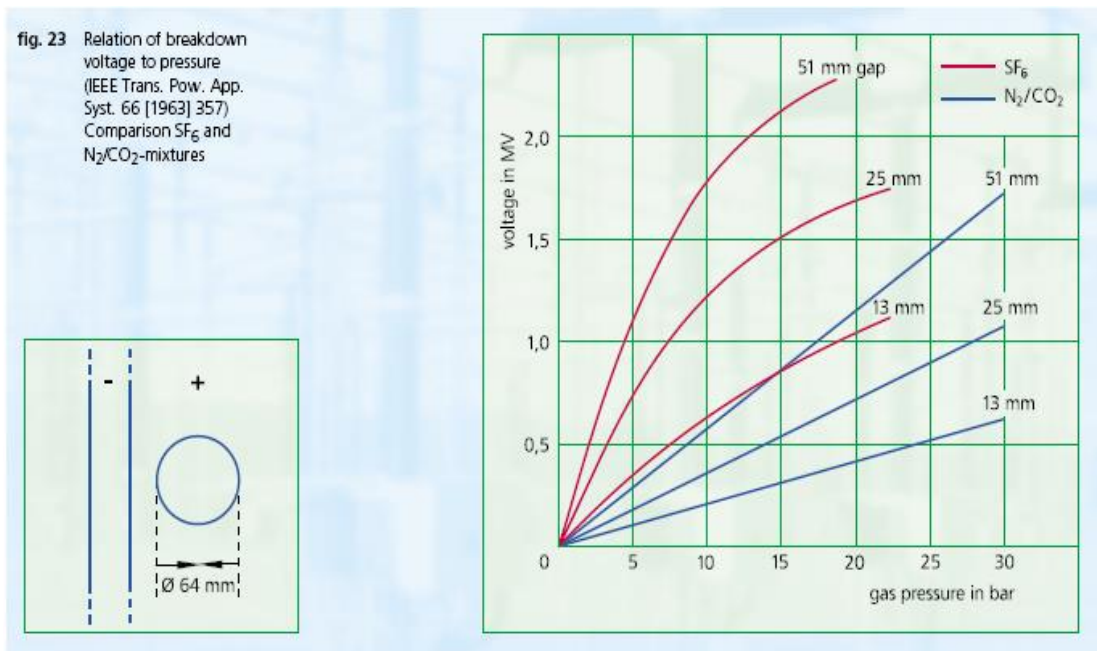
### 2.4 Διηλεκτρική Αντοχή:



**Σχήμα 2.1:** Η τάση διάσπασης του SF<sub>6</sub> σε συχνότητα 50 Hz σε ομογενές μαγνητικό πεδίο συναρτήσε της απόστασης των ηλεκτροδίων για διάφορες τιμές πίεσης του αερίου σε σχέση και με τον αέρα .

Το πολυατομικό μόριο του SF<sub>6</sub> , όπως είδαμε παραπάνω, επιβραδύνει τα ηλεκτρόνια υψηλής κινητικής ενέργειας και έτσι δεν του προκαλούν διασπάσεις. Επομένως το SF<sub>6</sub> είναι πιθανό να διασπαστεί υπό την επίδραση ισχυρών μαγνητικών πεδίων. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η τάση διάσπασης σε πίεση 1 bar σε ομογενές πεδίο του SF<sub>6</sub> είναι 2,5 με 3 φορές μεγαλύτερη απ' αυτή του αέρα.

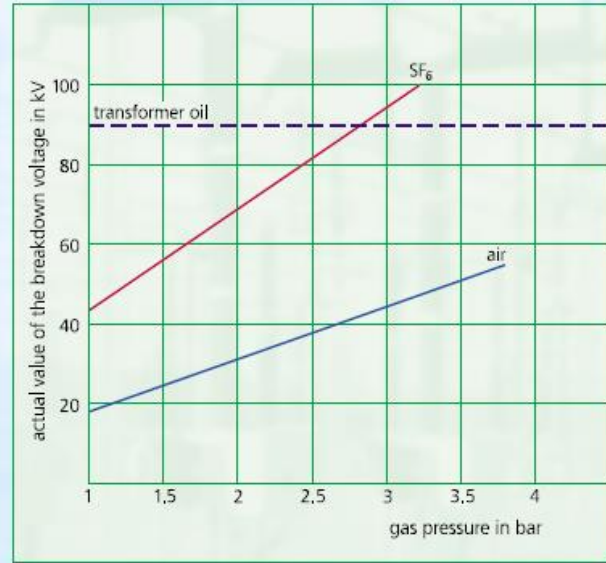
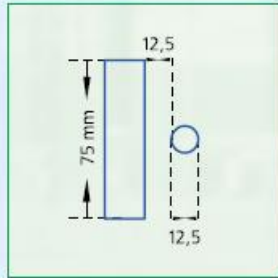
Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η τάση διάσπασης σε ανομοιογενές πεδίο των SF<sub>6</sub> και μίγματος αερίων N<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>



**Σχήμα 2.2:** Η τάση διάσπασης και σε ανομοιογενές πεδίο για διάφορες τιμές κενού συναρτήσει της πίεσης των αερίων.



fig. 24 Breakdown strength of transformer oil, air and SF<sub>6</sub> as a function of gas pressure (Kali und Steinsalz, 3, issue 10 [1963] 319)



**Σχήμα 2.3:** Η αντοχή στην τάση διάσπασης του του αέρα και του ελαίου μετασχηματιστών

Η τάση διάσπασης του SF<sub>6</sub> για πιέσεις που ξεπερνούν τα 2,8 bar είναι μεγαλύτερη και αυτής του ορυκτού ελαίου για μετασχηματιστές (σχήμα 2.3).

Η διηλεκτρική αντοχή του αερίου SF<sub>6</sub> ακολουθεί τον νόμο του Paschen, για τις συνήθεις πιέσεις που έχουν οι ηλεκτρικοί εξοπλισμοί. Ο νόμος Paschen προβλέπει ότι για ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας σε ένα ομογενές πεδίο το δυναμικό εκδήλωσης ηλεκτρικού τόξου ( V<sub>s</sub> sparking potential) σε ένα αέριο εξαρτάται από το γινόμενο πίεσης p, επί την απόσταση d των ηλεκτροδίων .

$$V_s = f(p \cdot d)$$

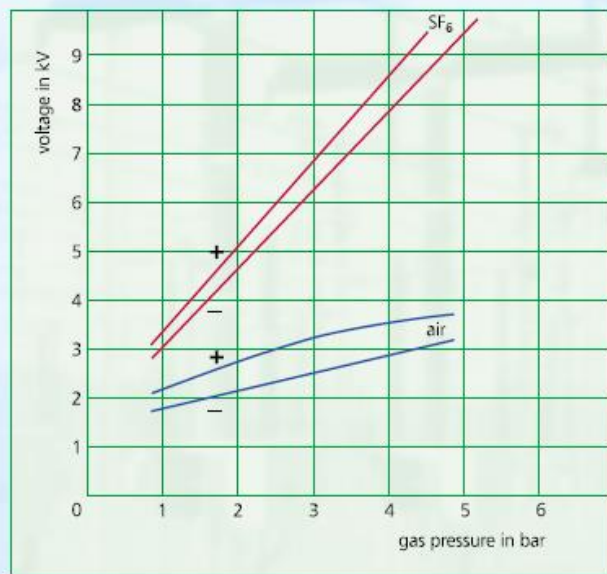
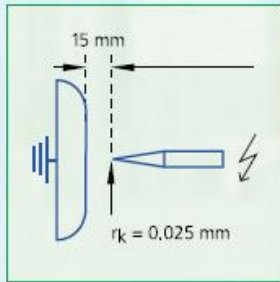
Για σταθερή πίεση του αερίου, ενός ηλεκτρικού εξοπλισμού, ο νόμος Paschen μπορεί να εκφραστεί και απ' τον τύπο :

$$V_s = f(N \cdot d)$$

Όπου N η πυκνότητα των μορίων του αερίου ανά cm<sup>3</sup>. Δηλαδή η αντοχή στην τάση διάσπασης παραμένει πρακτικά σταθερή αφού πλέων την επηρεάζει μόνο η θερμοκρασία . Παρατηρούμε λοιπόν ότι η V<sub>s</sub> είναι ανεξάρτητη της συχνότητας, γι' αυτό χρησιμοποιούμε το SF<sub>6</sub> σαν ιδανικό μονωτικό αέριο σε UHF συστήματα.

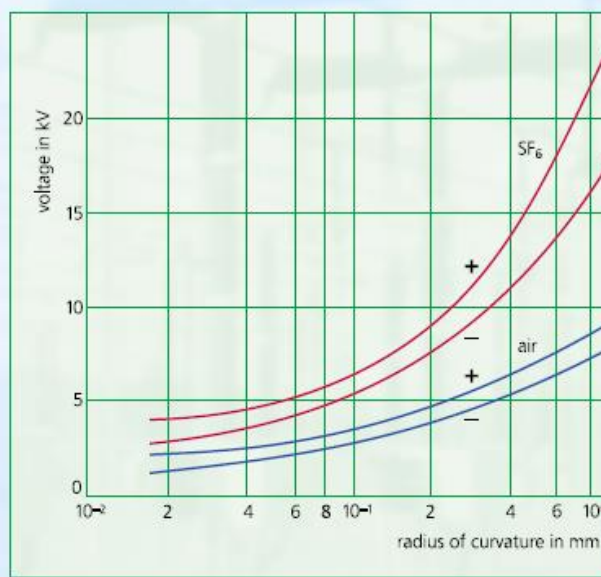
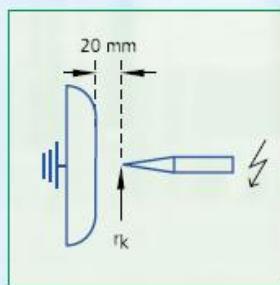
Η τάση έναρξης του φαινομένου Corona για αέρα και SF<sub>6</sub> για διάφορες τιμές πίεσης αερίου σε σταθερή απόσταση d και καμυλότητα r<sub>k</sub> ηλεκτροδίου(σχήμα 2.4).

fig. 25 Dependence on pressure of the Corona-onset voltage in SF<sub>6</sub> and air (ETZ, Supplement 3 [1966])



Σχήμα 2.4: Η τάση έναρξης του φαινομένου Corona για τον αέρα και το SF<sub>6</sub>

fig. 26 Corona-onset voltages for SF<sub>6</sub> and air as a function of the radius of curvature K at atmospheric pressure (ETZ, Supplement 3, [1966])

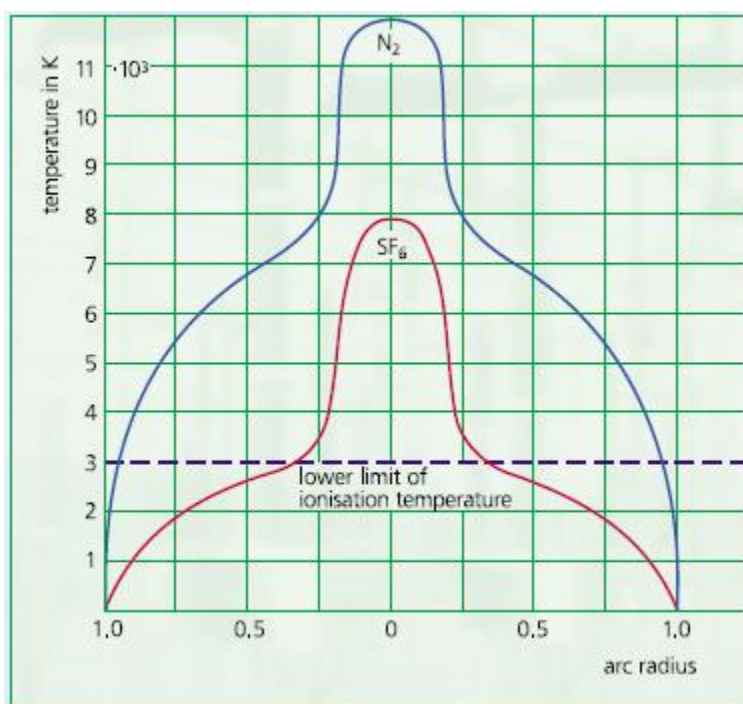


Σχήμα 2.5: Η τάση έναρξης του φαινομένου Corona στον αέρα και το SF<sub>6</sub> για διάφορες τιμές της ακτίνας καμπυλότητας ηλεκτροδίου.

## 2.5 Ικανότητα σβέσης ηλεκτρικού τόξου

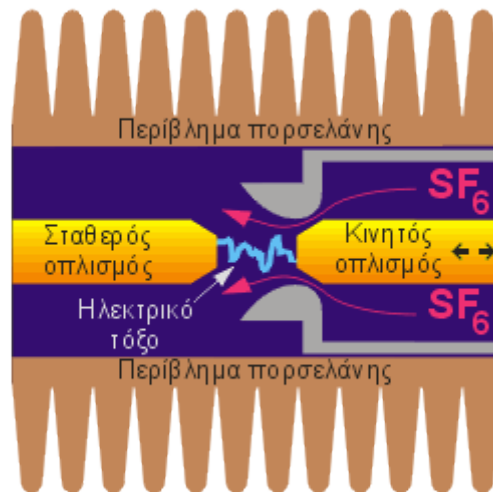
Εκτός απ' τα ευεργετικά αποτελέσματα λόγω της ηλεκτραρνητικότητάς του (δέσμευση ηλεκτρονίων, αποφυγή φαινομένου χιονοστιβάδας), στην ικανότητα γρήγορης σβέσης τόξου σημαντικό ρόλο παίζει και η δυνατότητα ψύξης του εξαφθοριούχου θείου. Για την ψύξη του SF<sub>6</sub> εξετάζουμε τρεις θερμικές ιδιότητες.

Την ειδική θερμότητα η οποία σε δεδομένη πίεση και θερμοκρασία, είναι η ποσότητα θερμοκρασίας που απαιτείται για να αυξηθεί κατά ένα βαθμό θερμοκρασίας η μοναδιαία μάζα  $SF_6$ . Την ειδική θερμική αγωγιμότητα η οποία είναι η ποσότητα θερμότητας που απάγεται στη μονάδα του χρόνου, από μια μοναδιαία επιφάνεια του αερίου, για διαφορά μιας μονάδας θερμοκρασίας. Τέλος τα χαρακτηριστικά απαγωγής θερμότητας μελετημένα μέσα από το ιξώδες του αερίου. Έτσι η παραγόμενη θερμότητα απ' την πρόσκρουση ηλεκτρονίων διαχέεται ταχύτατα. Στο σχήμα 2.10 φαίνεται ο συντελεστής ιξώδους του αερίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας. Η χαμηλή τιμή του ιξώδους μας δηλώνει, την μηδαμινή αντίσταση του αερίου στην ροή του. Είναι δηλαδή ένα αέριο που ρέει ταχύτατα και απάγει την δημιουργούμενη θερμότητα στο χώρο. Έτσι ο χρόνος σβέσης τόξου με μονωτικό  $SF_6$  είναι περίπου 100 φορές μικρότερος απ' ότι ο αέρας. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσει το  $SF_6$  και το άζωτο κατά τον ιονισμό ηλεκτρονίων. Ενώ στο επόμενο σχήμα 2.7 φαίνεται το ρεύμα που μπορεί να διακόψει το  $SF_6$ , ο αέρας και μίγμα αυτών για διάφορες τιμές πίεσης εξοπλισμού ώστε να μην έχουμε ηλεκτρικό τόξο.



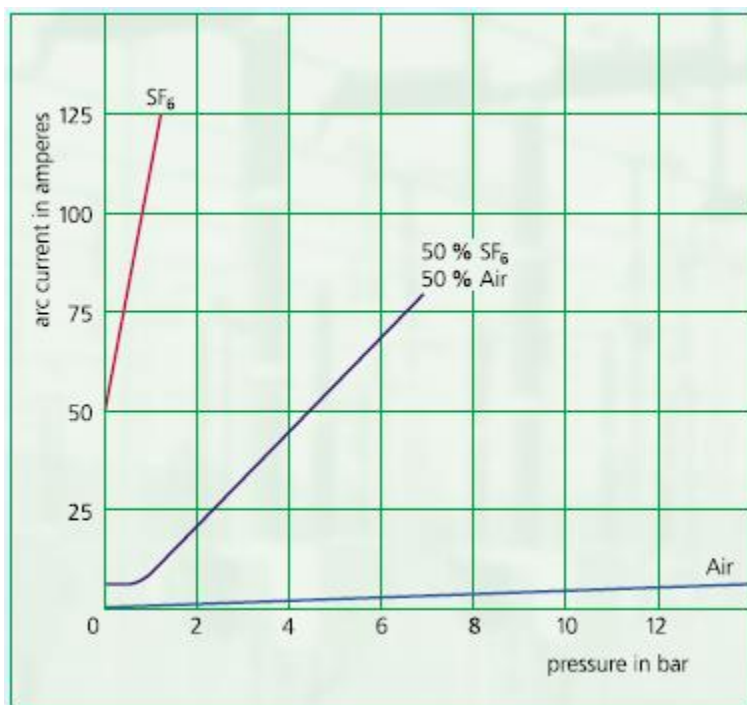
**Σχήμα 2.6:** Η διαφορά θερμοκρασίας  $SF_6$  και αζώτου για διάφορες τιμές καμπυλότητας ηλεκτροδίου

Στην εικόνα 1 φαίνεται η αρχή λειτουργίας διακόπτη (GIS) με μόνωση SF<sub>6</sub>. Κατά την διακοπή του κυκλώματος ρέει SF<sub>6</sub> απ' τον δεξιό χώρο (υψηλότερης πίεσης) προς τ' αριστερά και σβήνει το ηλεκτρικό τόξο.

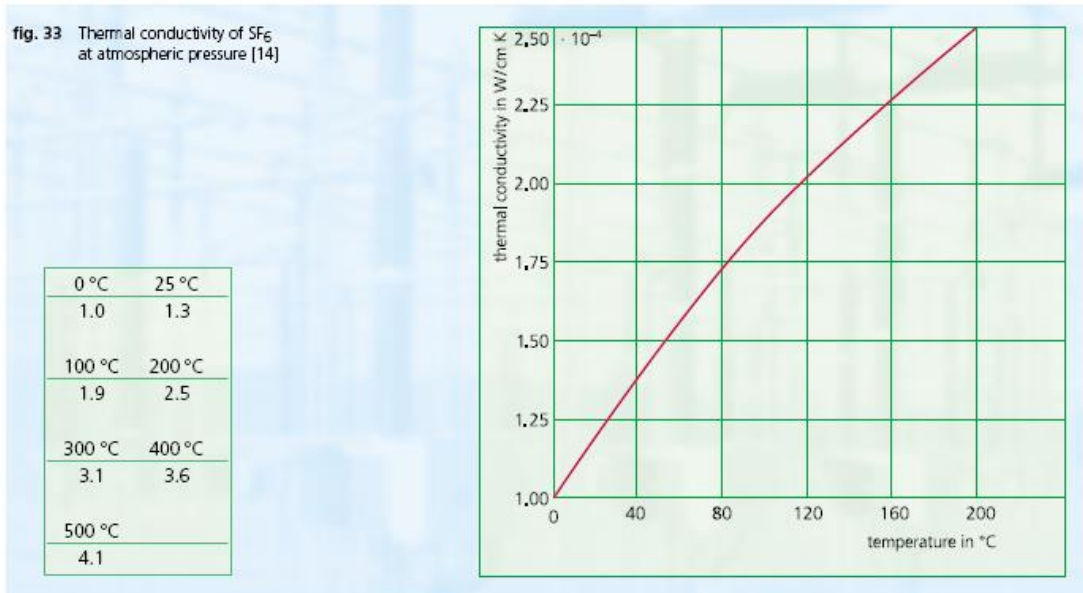


**Εικόνα 1 :** Αρχή λειτουργίας διακόπτη (GIS) για σβέση τόξου.

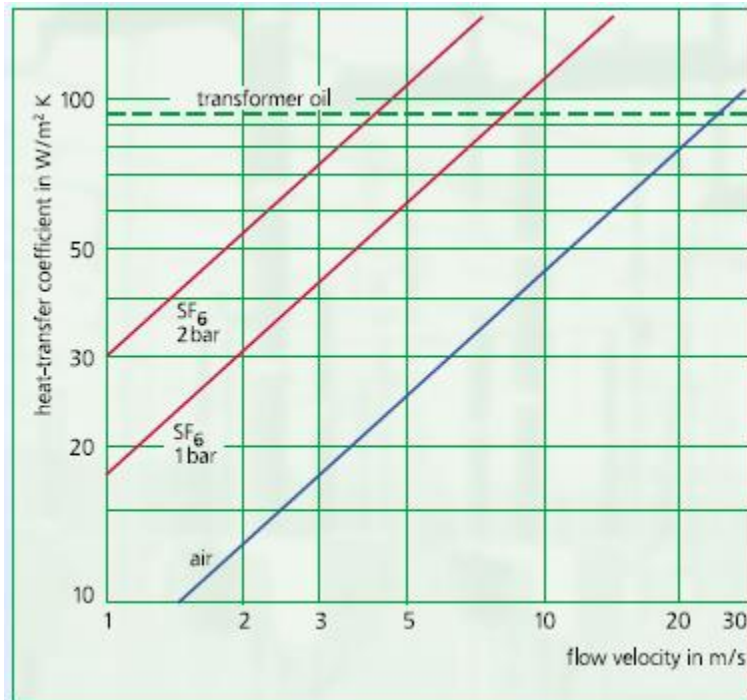
Στα σχήματα 2.8 και 2.9 φαίνεται η υπεροχή του SF<sub>6</sub> στη απαγωγή θερμότητας σε σχέση με τον αέρα και το λάδι μετασχηματιστών .



**Σχήμα 2.7:** Η ικανότητα σβέσης τόξου SF<sub>6</sub>, αέρα και μίγματος αυτών για διάφορες τιμές πίεσης στον εξοπλισμό.



**Σχήμα 2.8:** Η Θερμική αγωγιμότητα του SF<sub>6</sub> σε πίεση μιας ατμόσφαιρας.



**Σχήμα 2.9:** Ο συντελεστής απαγωγής θερμότητας του SF<sub>6</sub> και του αέρα συγκρινόμενα με το λάδι μετασχηματιστή.

## 2.6 Άλλες φυσικές ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες του SF<sub>6</sub> για τις οποίες έχει γίνει ιδανικό στις εφαρμογές του είναι ότι είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό, μη εύφλεκτο, με μοριακό βάρος 146 είναι πέντε φορές βαρύτερο απ' τον αέρα. Παρακάτω αναφέρονται διάφορες άλλες χρήσιμες φυσικές ιδιότητες.

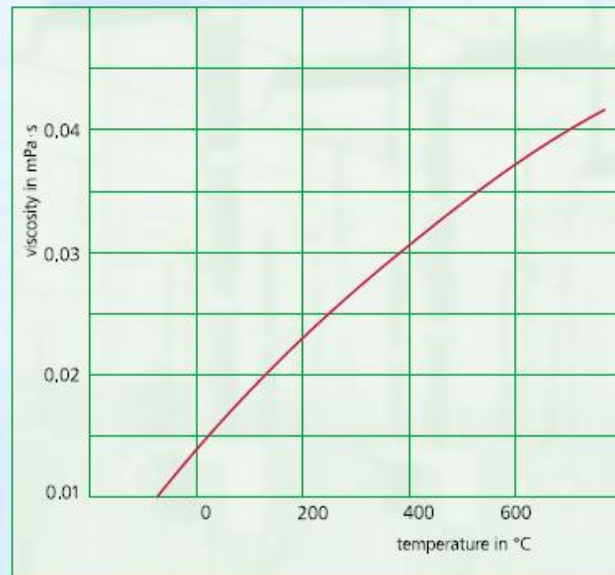
### α) Μηχανικές και Θερμικές

Σημείο εξάχνωσης (1,0133 bar)	-63,9 °C			
Σημείο τήξης (2,26 bar)	-50.8 °C			
Θέρμανση εξάχνωσης	153,2 kJ/ kg			
Θέρμανση τήξης	34,37 kJ/ kg			
Θέρμανση ατμοποίησης:				
Θερμοκρασία ( °C)	-20	0	+20	+40
Θερμοκρασία ατμοποίησης (kJ/ kg)	91,71	78,96	62,54	34,08
Κρίσιμα δεδομένα:				
Κρίσιμη θερμοκρασία (Πάνω απ' την οποία δεν υγροποιείται)	45,58 °C			
Κρίσιμη πίεση (Η ελάχιστη πίεση που υγροποιείται στην κρ. θερμοκρ.)	37,59 bar			
Κρίσιμη πυκνότητα ( kg/L)	0,74			
Ταχύτητα ήχου ( 0 °C , 1,0 bar )	129.06 m/sec			



**fig. 32** Viscosity of SF<sub>6</sub> as a function of temperature at atmospheric pressure [14]

0 °C	25 °C
0.0141	0.0153
100 °C	200 °C
0.0186	0.0228
300 °C	400 °C
0.0266	0.0302
500 °C	
0.0335	



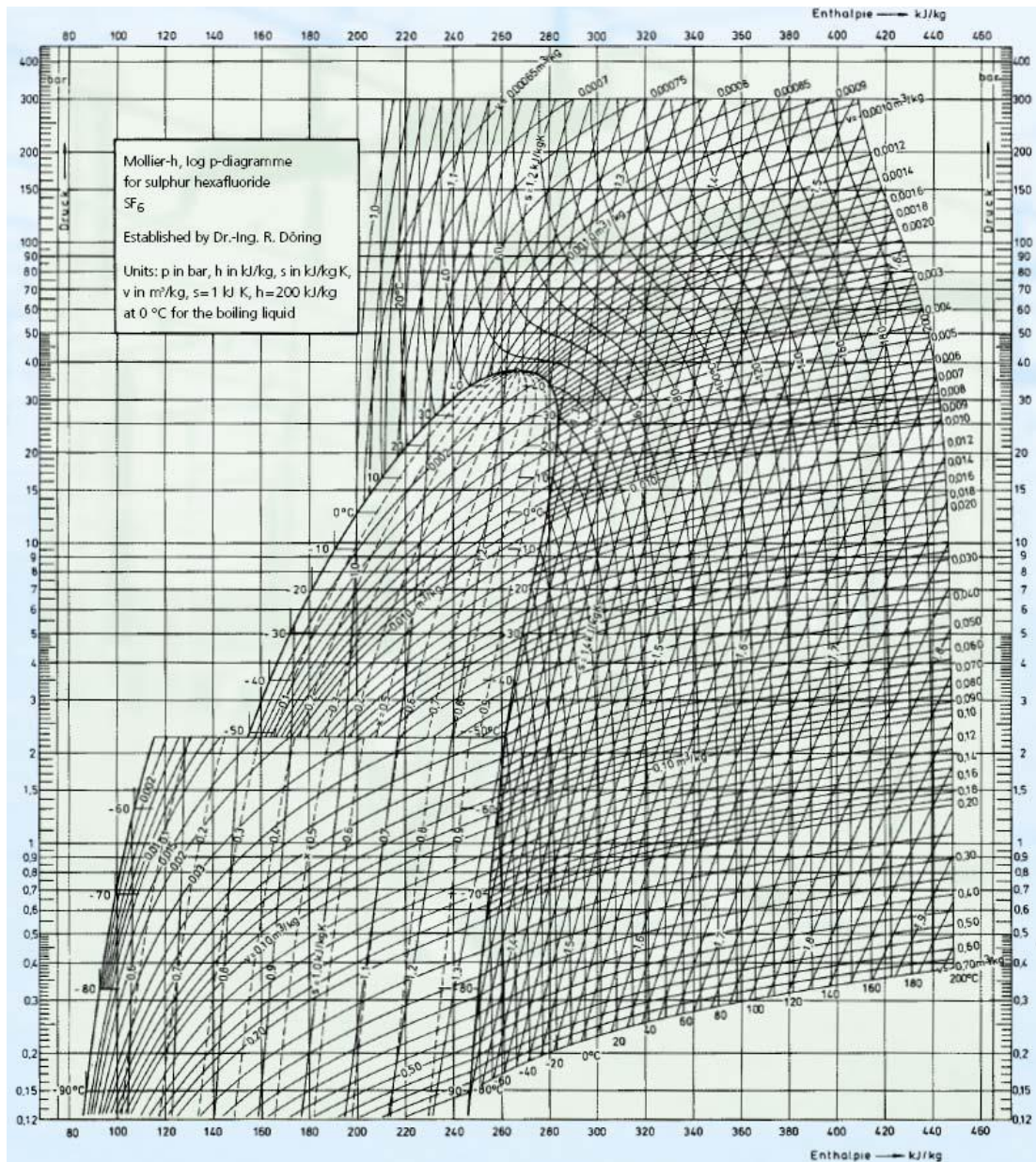
**Σχήμα 2.10:** Συντελεστής Ιξώδους για διάφορες τιμές θερμοκρασίας σε ατμοσφαιρική πίεση.

Το ιξώδες φαίνεται στον παραπάνω σχήμα 2.10 ενώ η Θερμική Αγωγιμότητα και η Ικανότητα Μεταφοράς Θερμοκρασίας φαίνονται στα σχήματα 2.8 και 2.9.

Ισεντροπικός εκθέτης (K): Η δυναμική συμπίεστικότητα του SF<sub>6</sub> είναι ιδιαίτερα υψηλή σε σχέση με την χαμηλή τιμή του ισεντροπικού εκθέτη K = 1,08 (30°C, 1,0 bar)

Θέρμανση σχηματισμού ( ΔH<sub>B</sub>, 25 °C )                    -1221,58 ± 1,0 kJ/mol

Εντροπία αντίδρασης (ΔS<sub>B</sub>, 25 °C )                        -349,01 J/mol k



Σχήμα 2.11 Το διάγραμμα Mollier-h για το αέριο SF<sub>6</sub>.

β) Διαλυτότητα

Διαλυτότητα στο νερό , όγκου αερίου διορθωμένου στους 0 °C , 1,0133 bar

Θερμοκρασία(°C )

5    10    15    20    25    30    40    50

Διαλυτότητα( cm<sup>3</sup> SF<sub>6</sub>/Kg H<sub>2</sub>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  
διορθωμένος στους 0 °C , 1,0133 bar

Θερμοκρασία (°C)	27	50	70
Διαλυτότητα ( cm <sup>3</sup> SF <sub>6</sub> / cm <sup>3</sup> λαδιού)	0,408	0,344	0,302

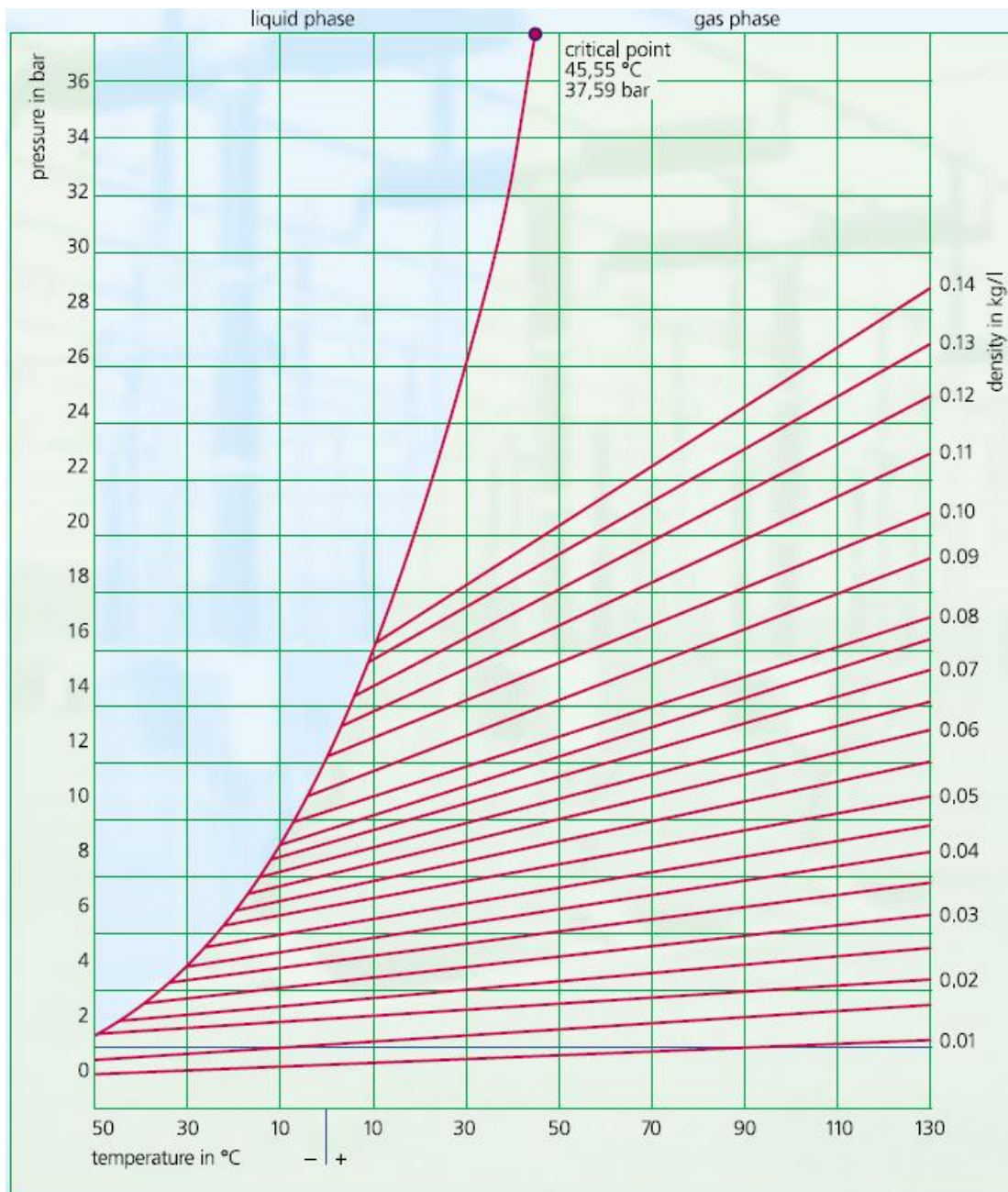
γ) Ειδική θερμότητα (C<sub>p</sub>)

Στερεά και υγρή φάση :

Θερμοκρασία (K)	298	371	400	473	500	573	600
Ειδική θερμότητα(J/mol K)	97,26	112,45	116,39	125,89	128,54	134,51	136,07

δ) Πίεση ατμοποίησης

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		
Πίεση (bar)	12,65	14,47	16,47	18,67	21,08	23,72	26,62	29,79		



**Σχήμα 2.12:** Διάγραμμα πίεσης ατμοποίησης του  $SF_6$  για διάφορες τιμές θερμοκρασίας ανάλογα με την πυκνότητα του αερίου.

### 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 SF<sub>6</sub> ,(NIST Technical Note 1425)

[3] Sulphur Hexafluoride , Solvay Fluor and Derivate

[4] SF<sub>6</sub> Switchgear H. M. Ryan and G. R. Jones , IEE Power Engineering

### 3. ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ SF<sub>6</sub> ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

#### 3.1 Διακόπτες ισχύος GIS

Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του εξαφθοριούχου θείου διοχετεύεται σε συστήματα διανομής και διακοπών ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα των διακοπών αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των υποσταθμών και συνδέουν ή αποσυνδέουν το κύκλωμα και τα όργανα παρακολούθησης. Μετά από έρευνες έγινε δυνατή η καθιέρωση διακοπών ισχύος πάνω από 420kV / 63 kA , με μόνωση αερίου SF<sub>6</sub> "ουδετέρας δεξαμενής" το δυναμικό της οποίας ισούται με την γη, ( **Gas Insulated Switchgear – GIS** ) για την διακοπή ρεύματος, που λειτουργούν είδη σε πολλά σημεία του κόσμου. Ενώ για τάσεις από 132 kV έως 400 kV υπάρχει μια τάση για σταδιακή αντικατάσταση των διακοπών ελαίου και αέρα με διακόπτες αερίου SF<sub>6</sub> "ενεργούς δεξαμενής" το δυναμικό της οποίας είναι ίσο με την τάση δικτύου . Οι υποσταθμοί αυτοί καταλαμβάνουν πλέον μικρότερο χώρο, αφού είναι συμπαγείς και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν είτε μέσα σε στεγασμένο χώρο είτε σε εξωτερικό χώρο. Τα πλεονεκτήματα των διακοπών GIS έναντι αυτών με μόνωση αέρα είναι πολλά. Διότι αν τοποθετηθούν σε στεγασμένο χώρο απαιτούν πολύ μικρότερο. Αν τοποθετηθούν σε εξωτερικό χώρο η σκόνη , η υγρασία κ.α. δεν επηρεάζουν την λειτουργία τους και έχουμε χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής ενώ τοποθετούνται σε όποιον χώρο υπάρχει ανάγκη.



α



β

**Εικόνα 2:** Διακόπτες ισχύος υποσταθμών διανομής ηλεκτρικού ρεύματος (α). Εξωτερική εμφάνιση διακόπτη ισχύος σε βιομηχανική μονάδα (β).

Στις εικόνες 2 και 3 βλέπουμε υποσταθμούς με διακόπτες GIS σε εξωτερικό και εσωτερικό χώρο. Ακόμα και οι διακόπτες μέσης τάσης από 10 έως 40 kV που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και αλλού, σταδιακά αντικαθίστανται από συμπαγείς με μόνωση αερίου SF<sub>6</sub> .



**Εικόνα 3:** Υποσταθμός με διακόπτες GIS με αέριο SF<sub>6</sub> 145 kV σε στεγασμένο χώρο.

### 3.2 Γραμμές μεταφοράς GTIL

Η αυξανόμενη ζήτηση για συμπαγέστερο εξοπλισμό, οδήγησε στο να κατασκευαστούν γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων ( **Gas Insulated Transmission Line -GITL** ) σε σωλήνες με μόνωση αερίου. Οι γραμμές αυτές που έχουν για μονωτικό SF<sub>6</sub> είναι κατάλληλες για πυκνοδομημένες βιομηχανικές περιοχές , υπόγειες σήραγγες μετρό και αλλού. Με τις γραμμές μεταφοράς GITL επιτυγχάνουμε την μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος μέσα σε κατοικημένες περιοχές ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μίγμα SF<sub>6</sub> αφού δεν απαιτείται η σβέση τόξου. Στην εικόνα 4 φαίνεται μια υπόγεια εγκατάσταση GITL.





*Εικόνα 4: Γραμμή μεταφοράς με μόνωση SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> αερίου σε υπόγειο τούνελ*

### **3.3 Μετασχηματιστές Τάσεως - Ρεύματος**

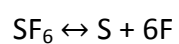
Μια ακόμα χρήση του SF<sub>6</sub> είναι ότι αντικαθιστά το λάδι στους **μετασχηματιστές**. Λόγω της εξαιρετικής απαγωγής θερμότητας, το ότι είναι άφλεκτο, μη τοξικό υλικό προτιμάται σαν μονωτικό στους μετασχηματιστές. Αυτοί οι μετασχηματιστές πλεονεκτούν έναντι των κλασικών αφού έχουν μικρότερο βάρος και επιπλέον έχουν χαμηλότερο επίπεδο θορύβου. Στην εικόνα 5 φαίνεται μετασχηματιστής τάσης 22kV / 390 V ισχύος 1500 kVA με μόνωση SF<sub>6</sub>. Για τους μετασχηματιστές ρεύματος CT συναντάμε δύο τύπους, ανάλογα με την τάξη μεγέθους. Για χαμηλότερες τάξεις μεγεθών τάσεως και ρεύματος ( έως τα 420kV ) που απαιτούν λίγες επαφές συναντάμε τον τύπο για την περίπτωση "ενεργούς δεξαμενής" με κατασκευή στο εσωτερικό κέλυφος του κεραμικού πυλώνα. Για υψηλότερες τάσεις όταν απαιτούνται πολλές επαφές ανά φάση συναντάμε τον τύπο της για την περίπτωση "ουδετέρας δεξαμενής" με δυναμικό της δεξαμενής να ισούται με το δυναμικό της γης.



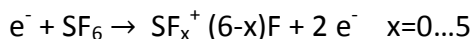
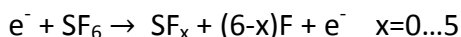
**Εικόνα 5:** Μετασχηματιστής ισχύος 1500 kVA με μόνωση SF<sub>6</sub> 22kV / 390 V

### 3.4 Παραπροϊόντα SF<sub>6</sub>

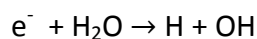
Ο εξφθοριούχος θείος είναι χημικά αδρανής ένωση, δεν διασπάται εύκολα και δεν αντιδρά με άλλα χημικά στοιχεία. Όμως κάτω από συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, κατά τη διάρκεια δηλαδή ενός ηλεκτρικού τόξου, όπου η θερμοκρασία μπορεί να ξεπεράσει τους 500°C αυτό μπορεί να διασπασθεί στα συστατικά του και εν' συνεχεία να επανασυσταθεί σύμφωνα με την αμφίδρομη αντίδραση:



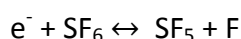
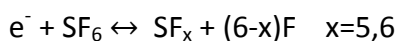
Η πρόσκρουση ελευθέρων ηλεκτρονίων στα μόρια του SF<sub>6</sub> μπορεί να του προκαλέσουν ιονισμό ή διάσπαση σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



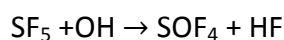
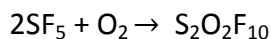
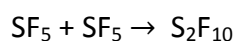
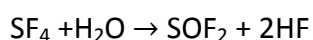
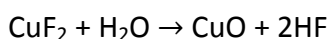
Αν υπάρχει υγρασία τότε έχουμε διάσπαση του νερού δηλαδή:



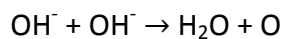
Ή την δημιουργία άλλων μορίων και ατόμων φθορίου, όπως οι αντιδράσεις που ακολουθούν, οι οποίες αντιστρέφονται αν δεν υπάρχουν άλλα στοιχεία να αντιδράσουν τα προϊόντα.



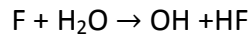
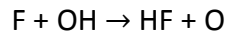
Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται στα διάφορα εξαρτήματα των διακοπών GIS και αλλού όπως π.χ. μέταλλα, γυαλί, ελαστικά και άλλα, είναι σταθερά για θερμοκρασίες έως 150 °C. Όταν οι θερμοκρασίες ξεπερνούν τους 200°C μπορεί να φθαρεί κάποιο υλικό και να παραχθεί ένα παραπροϊόν του SF<sub>6</sub>. Για παράδειγμα λόγω υψηλής θερμοκρασίας, αν συμβεί εξάχνωση του μετάλλου του ηλεκτροδίου ή του τοιχώματος του δοχείου και βρεθούν άτομα χαλκού, θα προκύψουν CuF<sub>2</sub>, SF<sub>4</sub> ενώ σε άλλες περιπτώσεις προκύπτουν AlF<sub>3</sub>, CuSi. Τα προϊόντα αυτά είναι επίσης διηλεκτρικά και δεν επηρεάζουν την λειτουργία του εξοπλισμού. Αν όμως υπάρξει ικανό ποσοστό υγρασίας στον θάλαμο του μονωτικού τότε σχηματίζονται προϊόντα άκρως διαβρωτικά όπως το υδροφθόριο (HF) ή άλλα, όπως φαίνονται στις αντιδράσεις που ακολουθούν.



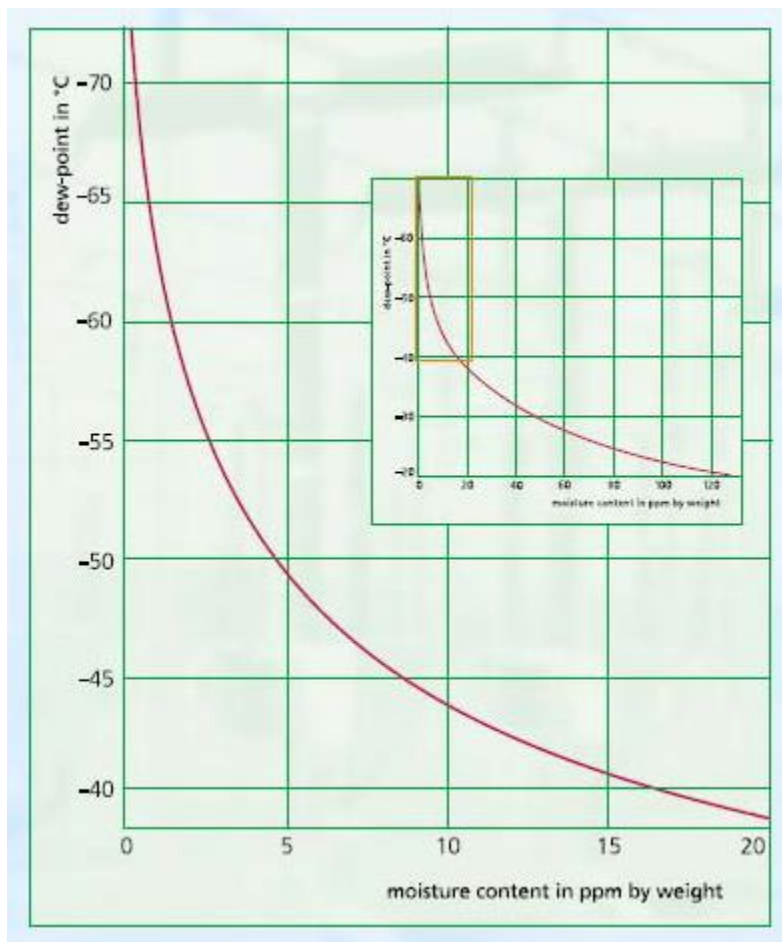
Όπου το OH και το O παρέχονται απ' τη διάσπαση του H<sub>2</sub>O σύμφωνα με τις αντιδράσεις:





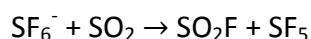
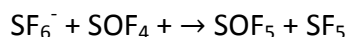
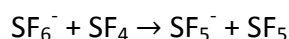


Το HF που σχηματίζεται διαβρώνει το γυαλί ή την πορσελάνη που περιέχουν διοξείδιο του πυριτίου  $SiO_2$ , σχηματίζοντας  $SiF_4$ . Επειδή ο σχηματισμός παραπροϊόντων είναι δύσκολο να αποφευχθεί ακόμα και με ειδικές κατασκευές GIS η διάβρωση περιορίζεται με την απομάκρυνση της υγρασίας και την χρήση κατάλληλων υλικών κατασκευής. Γι αυτό αποφεύγεται η χρήση γυαλιού, πορσελάνης αλλά και μονωτικό χαρτί σε εξοπλισμό που περιέχει  $SF_6$  για τη σβέση ηλεκτρικού τόξου. Ενώ κατάλληλα υλικά θεωρούνται το αλουμίνιο, το ασάλι, ο χαλκός και ο μπρούτζος. Η υγρασία και τα προϊόντα αποσύνθεσης μπορούν να απομακρυνθούν με διαδικασία προσρόφησης.



**Σχήμα 3.1:** Το σημείο δρόσου (dew point DP- θερμοκρασία σε °C ) για διάφορες τιμές υγρασίας.

Οξείδια του αλουμινίου και μοριακά κόσκινα ή μείγμα και των δύο είναι κατάλληλα γιατί προσροφούν τα όξινα αέρια παραπροϊόντα πολύ αποτελεσματικά. Ταυτόχρονα φροντίζουμε το σημείο δρόσου να διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία ώστε η ελάχιστη υγρασία να μην είναι ικανή για την υγροποίηση του SF<sub>6</sub> όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.1. Παραπροϊόντα επίσης δημιουργούνται από αντιδράσεις των ιόντων του SF<sub>6</sub> με κάποια από τα παραπροϊόντα του. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις ποιό σύντομες αντιδράσεις:



Από τα παραπροϊόντα που σχηματίζονται κυριότερο θεωρείται το SO<sub>2</sub>F το οποίο έχει παρατηρηθεί σε εκκενώσεις τόξου (~600 nmol/ J), σε σπινθήρα (~16 nmol/ J) και σε φαινόμενο κορώνα (~3 nmol/ J). Ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού μετά από υδρόλυση σχηματίζει SO<sub>2</sub> (την διάσπαση δηλαδή του δεσμού SO<sub>2</sub> και F με την παρουσία νερού).

Άλλο παραπροϊόν είναι το SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> το οποίο συναντάται στο τόξο της εκκένωσης, αφού το SF<sub>6</sub> διασπάται λόγω υψηλής θερμοκρασίας και κατόπιν επανασυνδέεται. Κατά την επανασύνδεση όμως δεν δημιουργούνται όλα τα μόρια SF<sub>6</sub> ταυτόχρονα αλλά σταδιακά έως 100 sec. Έτσι δημιουργούνται παραπροϊόντα με την παρουσία νερού. Το SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> εμφανίζεται κυρίως στο φαινόμενο κορώνας (~ 0,5 nmol/ J) ενώ στα ηλεκτρικά τόξα είναι (~ 0,03 nmol/ J) και στους σπινθηριστές (~ 0,016 nmol/ J). Το S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> ανιχνεύεται μόνο στους σπινθηριστές ενώ το SOF<sub>4</sub> βρίσκεται κυρίως στους σπινθηριστές (~ 0,22 nmol/ J) και τις εκκενώσεις κορώνα (~ 1 nmol/ J).

Τα αέρια προϊόντα αποσύνθεσης του εξαφθοριούχου θείου όταν διαρρεύσουν στο χώρο παρουσιάζουν χαρακτηριστικές προειδοποιητικές ενδείξεις και σε μικρές περιεκτικότητες. Για παράδειγμα δυσάρεστη οσμή, ενόχληση στη μύτη και στα μάτια. Οι ενοχλήσεις αυτές συμβαίνουν μέσα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα πριν εκδηλωθούν φαινόμενα δηλητηριάσεων. Έτσι κατά την διαχείριση χρησιμοποιημένου SF<sub>6</sub> πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί, να αποφεύγουμε τις εισπνοές και ο χώρος να αερίζεται καλά.

#### 4 ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΟΥ SF<sub>6</sub> ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

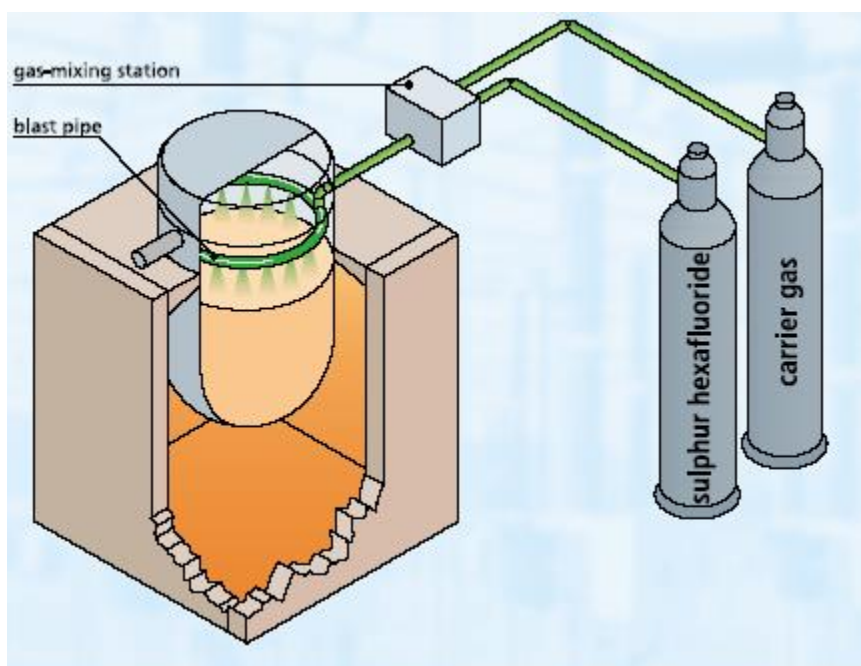
Τα μοναδικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το αέριο αυτό το κάνουν ιδανικό στη χρήση πολλών βιομηχανικών και τεχνολογικών προϊόντων. Μια μελέτη στην Γερμανία το 1998, για της ποσότητες του SF<sub>6</sub> που χρησιμοποιούνταν, με σκοπό την μείωση των διαρροών του λόγω της συμβολής του στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, έδειξε ότι χρησιμοποιείται στους εξής τομείς της βιομηχανίας.

Ηλεκτρικός Εξοπλισμός  
Χύτευση Μαγνησίου  
Ηχομονωτικά Παράθυρα  
Ελαστικά Αυτοκινήτων  
Επιταχυντές Σωματιδίων  
Ραντάρ Στρατιωτικών Αεροσκαφών  
Κατασκευή Ημιαγωγών  
Ιατρική κ.α.

Για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό, που καταναλώνεται και το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής του SF<sub>6</sub>, μιλήσαμε αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο.

##### 4.1 Χύτευση Μαγνησίου, Αλουμινίου.

Κατά τη χύτευση του μαγνησίου, το SF<sub>6</sub> χρησιμοποιείται σαν προστατευτικό κάλυμμα προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση, η ανάφλεξη και ο σχηματισμός νιτριδίων.



**Σχήμα 3.1** Διάγραμμα χύτευσης με χρήση μίγματος SF<sub>6</sub>

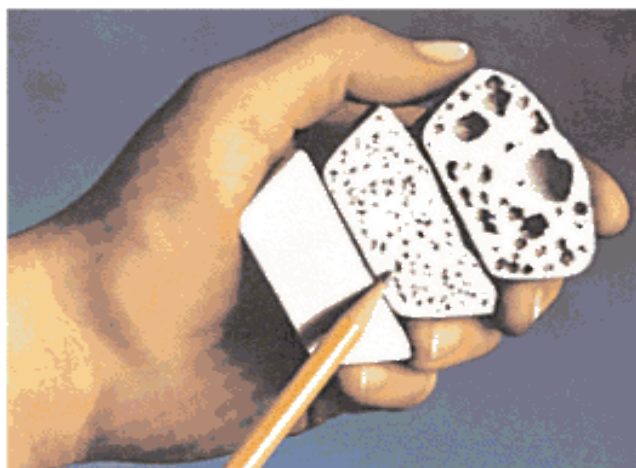
Πριν τη χρήση του  $SF_6$  η χύτευση προστατευόταν από λειωμένα άλατα και  $SO_2$ . Τα υλικά αυτά ήταν άκρως διαβρωτικά και οι μυρωδιές που εκλύονταν σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία κατά τη χύτευση έκαναν την ατμόσφαιρα επικίνδυνη. Έτσι ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα  $SF_6$  είναι αρκετό ώστε να αποτραπεί η ανάφλεξη του μαγνησίου. Για το σκοπό αυτό είναι κατάλληλο και μίγμα  $SF_6 / CO_2$  σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση το οποίο ψεκάζεται στο τηγμένο μέταλλο. Γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί 100 λίτρα μίγματος 0.03 έως 0.4 % ανά ώρα όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.1. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται (α) η ανάφλεξη του μαγνησίου κατά τη χύτευση χωρίς προστασία και (β) η χύτευση με προστασία στρώματος  $SF_6$ .



(α)



(β)



(γ)

(α) Χύτευση μαγνησίου στον αέρα. (β) Χύτευση μαγνησίου κάτω από στρώμα αερίου  $SF_6$ .  
(γ) Δείγματα αλουμινίου με διάφορους βαθμούς απαέρωσης με  $SF_6$ .

Κατά τη **χύτευση του αλουμινίου**, ένα πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπισθεί, ήταν οι πόροι που παρουσιάζονται στο προϊόν. Η περιεκτικότητα σε υδρογόνο στο λειωμένο μέταλλο του αλουμινίου, δημιουργεί πόρους στο τελικό προϊόν με αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αντοχής του. Μέχρι τώρα η αντιμετώπιση του προβλήματος των πόρων στα εξαρτήματα, αντιμετωπιζόταν με καθαρισμό του λειωμένου μετάλλου με εισαγωγή χλωρίου ή μίγματος χλωρίου και αδρανούς αερίου. Η δραστηριότητα όμως του χλωρίου απαιτεί ειδικό χειρισμό και αρκετές προφυλάξεις. Η εισαγωγή αδρανών αερίων όπως το αργό, μειώνει την περιεκτικότητα σε υδρογόνο αλλά αφαιρεί και χρήσιμα στοιχεία όπως στερεές αλκαλικές γαίες. Η χρήση εξαχλωροεθανίου οδηγεί σε προβλήματα αφού απελευθερώνεται χλώριο.

Ενώ ενώσεις φθορίου που χρησιμοποιήθηκαν, καταργήθηκαν σύντομα λόγω της επίδρασης στην τρύπα του όζοντος. Τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως στην χύτευση του αλουμινίου αποφεύγονται με την χρήση του SF<sub>6</sub>. Διοχετεύουμε μίγμα SF<sub>6</sub> με αδρανές αέριο στο τηγμένο αλουμίνιο και έτσι μειώνουμε σημαντικά την παρουσία υδρογόνου. Συγχρόνως αφαιρούνται οξειδία και άλλα στερεά προϊόντα. Το SF<sub>6</sub> θεωρείται ασφαλές αέριο και ο χειρισμός μίγματός του δεν παρουσιάζει προβλήματα στις συνθήκες εργασίας. Στην εικόνα (γ) βλέπουμε σε τομή ένα εξάρτημα και τους πόρους που υπάρχουν όταν δεν έχει γίνει καθαρισμός του τήγματος.

#### 4.2 Ηχομονωτικά τζάμια.

Το SF<sub>6</sub> σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι αέριο, όπως είναι γνωστό. Λόγω του μεγάλου μεγέθους του μορίου του, όταν πέφτουν πάνω του ηχητικά κύματα (acoustic pressure), που διαδίδονται μέσω του αέρα, αυτά εξασθενούν. Έτσι γεμίζοντας το κενό των διπλών τζαμιών ενός παραθύρου έχουμε καλύτερη ηχοπροστασία από εξωτερικούς θορύβους. Η βελτίωση της ηχομόνωσης διπλών τζαμιών με πλήρωση SF<sub>6</sub> είναι της τάξεως των 8 dB. Η θερμοκρασία υγροποίησης του SF<sub>6</sub> είναι γύρω στους -50 °C και για να την διατηρήσουμε ακόμα χαμηλότερα χρησιμοποιούμε μοριακά φίλτρα μεγέθους 3 ή 4 Å. Κατά την προηγούμενη δεκαετία, ένα πολύ μεγάλο μέρος της παραγωγής του SF<sub>6</sub> χρησιμοποιήθηκε για την πλήρωση του κενού των διπλών τζαμιών των κτιρίων. Όμως επειδή το SF<sub>6</sub> είναι εγκλωβισμένο στο κενό των διπλών τζαμιών, αν αυτά σπάσουν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Ακόμα, αν υποθέσουμε ότι τα παράθυρα γενικά έχουν μέσο χρόνο ζωής τα 20 χρόνια τότε θα πρέπει να σκεφτούμε την διαχείριση αυτών και να μην χρησιμοποιούμε τέτοια τζάμια ανεξέλικτα. Είδη ο συνδυασμός διαφορετικού πάχους τζαμιών με αδρανές αέριο ενδιάμεσα πλησιάζει την ηχομόνωση με SF<sub>6</sub> και καλύπτει το κεφάλαιο ηχοπροστασία τζαμιών.



### **4.3 Ελαστικά Αυτοκινήτων.**

Μεγάλες ποσότητες SF<sub>6</sub> έχουν χρησιμοποιηθεί από Γερμανικές κυρίως εταιρίες για το φούσκωμα των ελαστικών των αυτοκινήτων από το 1984 . Το αέριο SF<sub>6</sub> , λόγω του μεγάλου μεγέθους του μορίου του, θεωρήθηκε ιδανικό επειδή είναι δύσκολο να διαφύγει από πόρους του ελαστικού, και έτσι διατηρείται σταθερή η πίεση των ελαστικών. Έως το 2007 η κατανάλωση του SF<sub>6</sub> για τον σκοπό αυτό ήταν 100 tn ετησίως, αφού για να γεμίσουν τέσσερα ελαστικά απαιτείτε πάνω από 1 Kg αερίου. Μετά το 2007 η ΕΕ απαγόρευσε την χρήση του SF<sub>6</sub> για τον σκοπό αυτό αν και πολλοί προμηθευτές το συνιστούν για τα ελαστικά τους.

### **4.4 Σόλες Παπουτσιών.**

Η εταιρεία αθλητικών ειδών Nike χρησιμοποίησε το αέριο SF<sub>6</sub> στις σόλες παπουτσιών. Θεωρήθηκε ιδανικό γιατί παράγονται ελαφριά παπούτσια που βοηθούν τους αθλητές στα άλματα και απορροφούν τους κραδασμούς. Από το 2007 η ΕΕ με οδηγία προς τα μέλη της απαγόρευσε την χρήση του αερίου για τον σκοπό αυτό επειδή συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά και θεωρήθηκε συνυπεύθυνο του αφθώδους πυρετού (μια νόσος που μεταδίδεται στον άνθρωπο από τα ζώα μέσω της διατροφικής αλυσίδας).

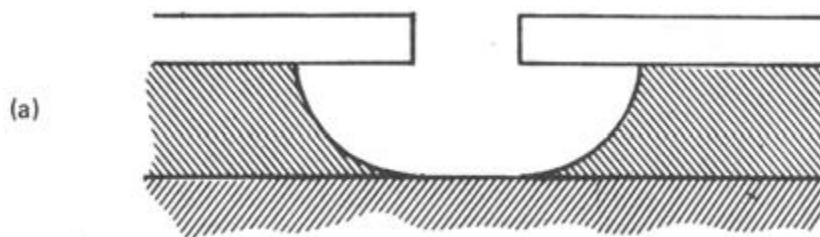
### **4.5 Ιχνηθέτης Αερίου ( tracer ) .**

Το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών της Δανίας αλλά και άλλων κρατών χρησιμοποιεί ένα μικρό ποσό SF<sub>6</sub> (περίπου 2 Kg ετησίως) για να προσδιορίζει την ροή ρευμάτων αέρα στην ατμόσφαιρα αλλά και σε κλειστούς χώρους. Επειδή δεν αντιδρά με άλλα μόρια κρίθηκε κατάλληλο για ιχνηθέτης. Έτσι χρησιμοποιείται για την διαπίστωση εξαερισμού εσωτερικών χώρων και την ροή αέρα εσωτερικών χώρων.

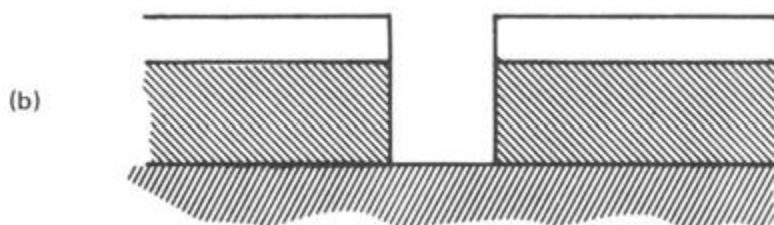
### **4.6 Παραγωγή Ημιαγωγών – Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων .**

Το SF<sub>6</sub> χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή ηλεκτρονικών και οπτικών μικροσίπ. Θεωρήθηκε ιδανικό για την ξηρά χάραξη ( etchant ) υλικών πυριτίου με τεχνολογία πλάσματος αλλά και τον καθαρισμό των μικροσίπ. Η τεχνική ξηράς χάραξης με τεχνολογία πλάσματος έχει αντικαταστήσει την χάραξη με χημικά υγρά αφού παρέχει οικονομικότερα και καλύτερης ποιότητας προϊόντα ενώ επιβαρύνει ελάχιστα το περιβάλλον. Από όλες τις φθοριούχες ενώσεις που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία πλάσματος για την χάραξη υλικών πυριτίου το SF<sub>6</sub> προτιμάται διότι ακόμα και σε χαμηλή συγκέντρωση, όταν αραιώνεται με κάποιο αδρανές αέριο είναι πολύ ισχυρό για να χαράξει το πυρίτιο και δεν αντιδρά σχεδόν καθόλου με το διοξείδιο του πυριτίου ( SiO<sub>2</sub> ).

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ένα τμήμα ολοκληρωμένου κυκλώματος . Για την κατασκευή τέτοιων υλικών χρησιμοποιούμε πλάσμα μίγματος  $SF_6$  με  $O_2$  με πίεση 1,4 Pa για 160 sec με RF ηλεκτρικό πεδίο ισχύος 80W.



**Εικόνα a :** Το profile που επιτυγχάνεται με την μέθοδο χημικής – υγρής χάραξης



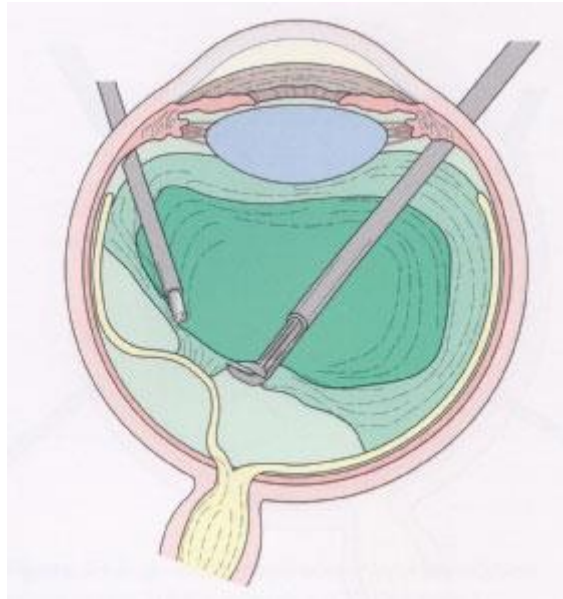
**Εικόνα b:** Το profile που επιτυγχάνεται με την μέθοδο ξηρής χάραξης

Στις σκανδιναβικές χώρες χρησιμοποιήθηκαν αρκετές ποσότητες  $SF_6$  για την παραγωγή ημιαγωγών . Όμως από της αρχές της δεκαετίας του 2000 οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό έχουν μειωθεί σημαντικά στις χώρες αυτές επειδή έχουν μεταφερθεί τα εργοστάσια παραγωγής σε τρίτες χώρες

#### 4.7 Ιατρική – Οφθαλμολογία

Τα τελευταία χρόνια μεγάλη πρόοδος σημειώθηκε στην οφθαλμολογία και ειδικά στην εγχείριση του οφθαλμού. Μια σειρά από παθήσεις αντιμετωπίζονται με υαλοειδεκτομή. Κατά την μέθοδο αυτή γίνονται τρεις τομές στο μάτι για την είσοδο ειδικών μικροχειρουργικών εργαλείων ( αναρροφητήρας , μικροκάμερα , λαβίδα ). Μετά το τέλος της επέμβασης οι τρεις μικροσκοπικές σπές φράσσονται με αέριο  $SF_6$  . Το αέριο αυτό είναι αδιάλυτο στο αίμα και λόγω του μεγάλου μεγέθους του μορίου του, παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα στις τομές ώσπου να επουλωθούν .





Στην εικόνα φαίνεται η είσοδος των χειρουργικών εργαλείων στο εσωτερικό του ματιού κατά την διάρκεια της επέμβασης. Το αέριο που θα χρησιμοποιηθεί για την επούλωση των οπών θα απορροφηθεί απ' τον οργανισμό μετά από 10 έως 40 ημέρες.

#### **4.8 Υπερηχογραφία.**

Μια άλλη πρακτική εφαρμογή του εξαφθοριούχου θείου είναι ότι χρησιμοποιείται σαν ουσία αντίθεσης ( contrast agent ) κατά την λήψη υπερηχογραφήματων. Οι ουσίες αυτές λέγονται σκιαστικά μέσα και η τεχνική με το αέριο SF<sub>6</sub> θεωρείται από τις πλέον εξελιγμένες. Κατά την τεχνική αυτή, χρησιμοποιούνται πολυμερή κελύφη που περιέχουν αέριο SF<sub>6</sub> . Χορηγούνται ενδοφλεβίως και στην τελική μορφή είναι μικροφουσαλίδες πολύ μικρής διαμέτρου έτσι ώστε να περνούν από τα τριχοειδή αγγεία δίχως να τα φράσουν. Επειδή το αέριο στις μικροφουσαλίδες είναι συμπιεσμένο ταλαντώνεται σε μια συχνότητα που εξαρτάται απ' το μέγεθος της μικροφουσαλίδας, την σύνθεση του αερίου και το κέλυφος. Κατά σύμπτωση οι μικροφουσαλίδες ταλαντώνονται στην συχνότητα που χρησιμοποιούν οι υπερηχογράφοι και έτσι αποτελούν αποτελεσματικούς ανακλαστήρες για τους υπερήχους. Το αέριο δεν διαλύεται αλλά διαχέεται αργά και παρατείνει την ζωή των μικροφουσαλίδων μετά την έγχυση έτσι ώστε να υπάρχει περισσότερος χρόνος για την μελέτη του υπερηχογραφήματος. Ο μέσος χρόνος ζωής των μικροφουσαλίδων είναι 5 με 7 λεπτά και τελικά το αέριο αποβάλλεται απ' τους πνεύμονες με την εκπνοή έως και 90 λεπτά αργότερα.





**Εικόνα :** Υπερηχογράφημα με έγχυση σκιαστικού μέσου.

Στην εικόνα φαίνεται η βοήθεια που παρέχει η έγχυση σκιαστικού μέσου με μικροφουσαλίδες στην ευκρίνεια απεικόνισης ενός υπερηχογραφήματος.

### **Βιβλιογραφία:**

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

[2] Sulphur Hexafluoride , Solvay Fluor and Derivate

[3] Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption , L. G. Christophorou, J. K. Olthoff , D. S. Green. November 1997.

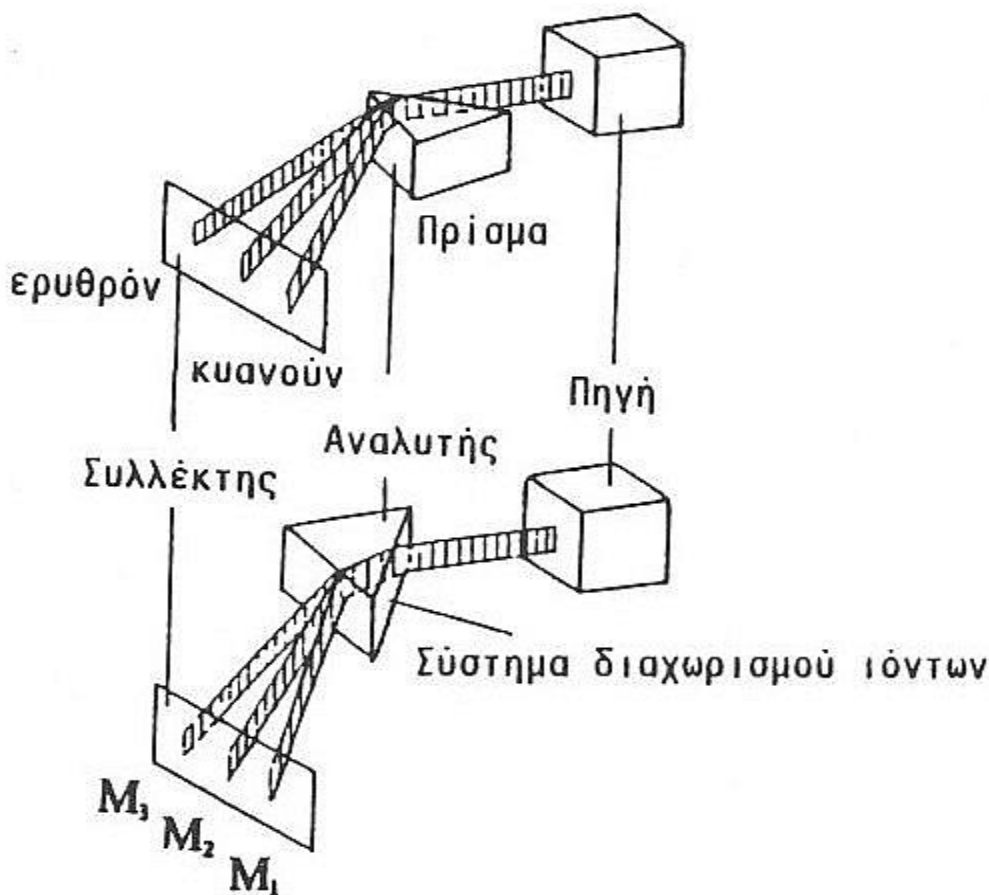
[4] Η Χημική Ένωση του Μήνα , Σεπτέμβριος 2007.

[5] Dry Etching of Silicon Materials in SF<sub>6</sub> Based Plasmas , Y. Tzeng and T. H. Lin

[6] Η Συμβολή των Σκιαστικών Ουσιών στην Υπερηχογραφική Μελέτη του Ουροποιητικού Συστήματος , Σταμάτη Μπουτσιούκη , 2010.

## 5. ΠΑΡΑΠΡΟΙΟΝΤΑ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ SF<sub>6</sub>

Η ανίχνευση μικρών περιεκτικότητων του SF<sub>6</sub> που προέρχονται από διαρροές σε κλειστούς και στεγασμένους χώρους, που γίνεται εκτεταμένη χρήση του αερίου αυτού είναι εξαιρετικά χρήσιμη αφ' ενός για την προστασία των εργαζομένων (από την έκθεσή τους σε παραπροϊόντα κυρίως) και αφ' ετέρου για τον έλεγχο της στεγανότητας του εξοπλισμού. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν είναι αρκετές οι πληροφορίες για τα συστατικά του αερίου που παίρνουμε όταν αντλούμε αέρα από έναν χώρο και εξετάζουμε την συνολική πίεση. Για να εξετάσουμε τα επιμέρους συστατικά ενός αερίου, είναι απαραίτητη η γνώση των επιμέρους πιέσεων των συστατικών του. Έτσι για να έχουμε την ανάλυση των επιμέρους πιέσεων των συστατικών ενός αερίου, στο εργαστήριο μονωτικών υλικών, χρησιμοποιούμε τον **τετραπολικό φασματογράφο μάζας**. Μια συσκευή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον χαρακτηρισμό αερίων καθώς και στην ανίχνευση ουσιών με εξαιρετικά χαμηλή περιεκτικότητα στον ατμοσφαιρικό αέρα ( 1 ppm ).



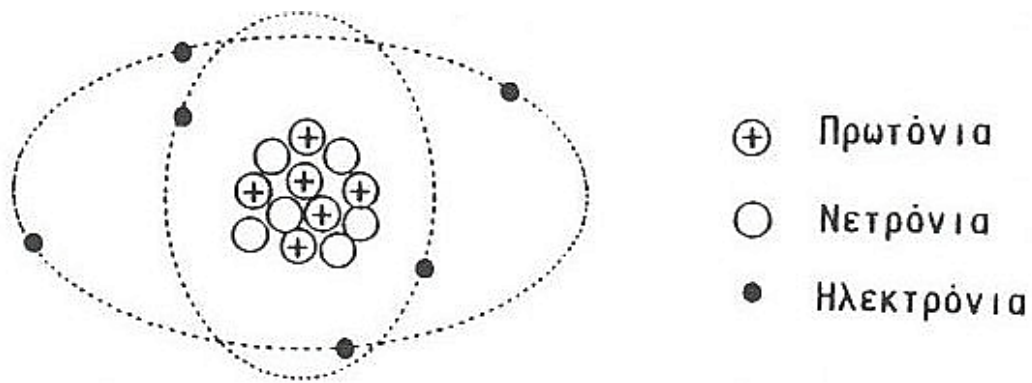
**Σχήμα 5.1:** Σύγκριση της οπτικής φασματομετρίας (πρίσμα για τον διαχωρισμό δέσμης φωτός) άνω με την φασματομετρία μαζών (σύστημα διαχωρισμού ιόντων) κάτω.

Ο τετραπολικός φασματογράφος μάζας βασίζεται στην φασματομετρία μαζών και σχετίζεται με την ανίχνευση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων. Όπως η οπτική φασματοσκοπία χρησιμοποιεί το πρίσμα για να διαχωριστεί μια δέσμη φωτός, σχήμα 5.1 , στη φασματομετρία μαζών δημιουργούνται ιόντα (από μια πηγή), τα οποία οδηγούνται μέσα σε ένα σύστημα διαχωρισμού, που διαχωρίζονται ανάλογα με το ηλικό μάζα/φορτίο ( $m/e$ ).

### 5.1 Αρχή λειτουργίας των τετραπολικών φίλτρων.

Το προς ανάλυση μίγμα αερίων, διοχετεύεται στο χώρο με πίεση μικρότερη από  $10^{-5}$  mbar , και κατευθύνεται προς την πηγή των ιόντων. Η πηγή αυτή μετατρέπει τα ουδέτερα μόρια του αερίου μίγματος σε ιόντα. Τώρα πλέον τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα, μπορούν να εκτραπούν από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία και έτσι να μπορούν να διαχωριστούν. Με συγκεκριμένους συνδυασμούς ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων η πορεία των ιόντων εξαρτάται από την αναλογία μάζας/φορτίο ( $m/e$ ), επιτρέποντας την διέλευσή τους μέσα απ' το φίλτρο και εν' συνεχεία την ανίχνευσή τους. Τα υπόλοιπα ιόντα που δεν περνούν μέσα απ' το φίλτρο εξουδετερώνονται. Η ανίχνευση των ιόντων γίνεται λόγω του ρεύματος που δημιουργείται απ' αυτά. Όπως φαίνεται απ' την παραπάνω ανάλυση, τα τμήματα ενός τετραπολικού φασματογράφου μάζας που στην συνέχεια θα αναλυθούν είναι: η πηγή ιόντων, το τετραπολικό φίλτρο μαζών και ο ανιχνευτής ιόντων.

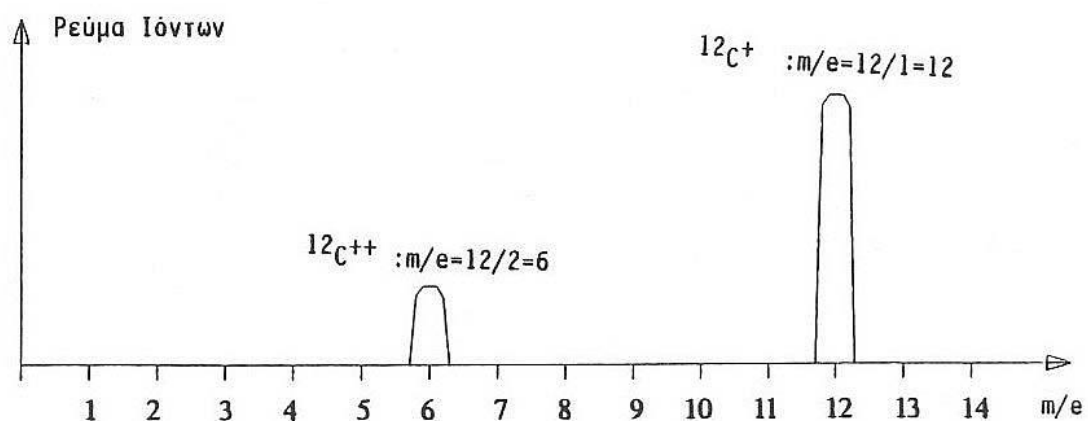
Για να περιγράψουμε την λειτουργία της πηγής ιόντων είναι χρήσιμο να αναφερθούμε στην **ατομική θεωρία**. Όπως είναι γνωστό κάθε άτομο αποτελείται από τον πυρήνα που περιλαμβάνει τα νετρόνια και τα πρωτόνια και γύρω απ' τον πυρήνα περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια. Επειδή το μέγεθος των σωματιδίων αυτών είναι πολύ μικρό, σαν μονάδα μέτρησης της μάζας των ατόμων έχουμε τον ατομικό μαζικό αριθμό ( $amu$ ) που η αντιστοιχία με το κιλό ( $kg$ ) είναι:  $1amu = 1,66 \cdot 10^{-27} kg$ . Κάθε πρωτόνιο και κάθε νετρόνιο έχει μάζα περίπου  $1 amu$  ενώ τα ηλεκτρόνια έχουν περίπου 1800 φορές μικρότερη. Ο αριθμός των πρωτονίων (θετικά φορτισμένων σωματιδίων) ονομάζεται ατομικός αριθμός  $Z$  και είναι ίσος με τον αριθμό των περιστρεφόμενων γύρω απ' τον πυρήνα ηλεκτρονίων (αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων). Έτσι το άτομο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο αφού τα νετρόνια του πυρήνα δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο. Πρωτόνια και νετρόνια καλούνται νουκλεόνια και ο αριθμός των νουκλεονίων καλείται μαζικός αριθμός  $A$ . Άτομα του ίδιου χημικού στοιχείου ( με ίδιο αριθμό πρωτονίων ) μπορούν να εμφανίσουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων και ονομάζονται ισότοπα. Στοιχεία που εμφανίζουν ισότοπα λέγονται μικτά στοιχεία ενώ όταν δεν εμφανίζουν ισότοπα λέγονται απλά στοιχεία. Στο σχήμα 5.2 φαίνεται το άτομο του άνθρακα σε απλοποιημένη μορφή.



**Σχήμα 5.2** Η απλοποιημένη μορφή του ατόμου του άνθρακα  $^{12}\text{C}$ .

Όλα τα αέρια που απαντώνται στη φύση απαρτίζονται από δύο ή περισσότερα άτομα και αποτελούν τα μόρια π.χ. του  $\text{O}_2$  ή του  $\text{N}_2$  εκτός απ' τα ευγενή αέρια που είναι μονοατομικά.

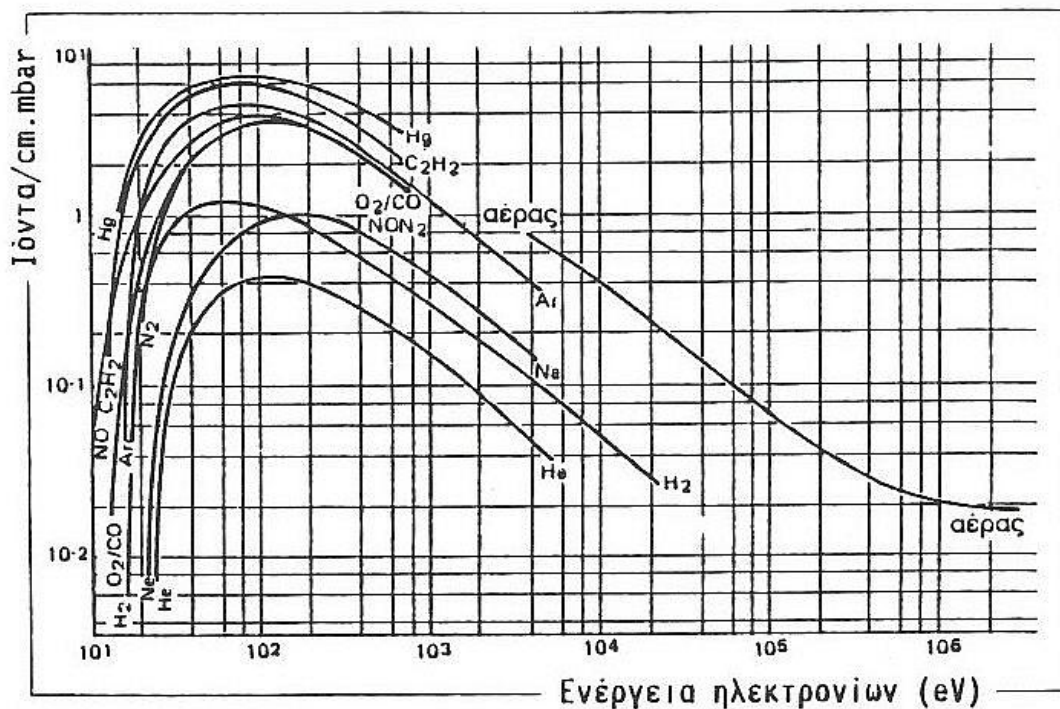
Όπως αναφέραμε παραπάνω τα άτομα ή τα μόρια εμφανίζονται ηλεκτρικά ουδέτερα αφού ο αριθμός πρωτονίων είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων και έτσι δεν εκτρέπονται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Κατά την **διαδικασία ιονισμού** όταν τα άτομα ή τα μόρια βομβαρδιστούν από ηλεκτρόνια, τότε ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια μπορεί να φύγουν απ' το ατομικό ή μοριακό σύστημα και να προκύψουν φορτισμένα ιόντα. Τώρα όμως τα ιόντα παύουν να είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και μπορούν να εκτραπούν από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία και να ανιχνευτούν.



**Σχήμα 5.3:** Το ρεύμα ιόντων στη κλίμακα  $m/e$  (στην θέση 6 και 12 για τα ιόντα  $^{12}\text{C}^+$  και  $^{12}\text{C}^{++}$ ).

Στο παράδειγμα του ατόμου του άνθρακα όταν αυτό χάσει ένα ηλεκτρόνιο ( $^{12}\text{C}^+$ ) εμφανίζεται στη θέση  $m/e = 12/1 = 12$ , ενώ όταν έχει χάσει δύο ηλεκτρόνια ( $^{12}\text{C}^{++}$ ) εμφανίζεται στη θέση  $m/e = 12/2 = 6$  της κλίμακας  $m/e$  όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3. Όπως είναι φανερό το ρεύμα των ιόντων  $^{12}\text{C}^+$  και  $^{12}\text{C}^{++}$  δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα αλλά σε διαφορετικές θέσεις στην κλίμακα  $m/e$ . Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, όσο πιο πολύπλοκη είναι η δομή ενός μορίου τόσες περισσότερες μορφές ιόντων αναμένονται να ανιχνευτούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται βάσεις δεδομένων οι οποίες είναι κατασκευασμένες για την σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί εδώ ότι η πρόσκρουση των ηλεκτρονίων, μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του μορίου και να προκύψουν “προϊόντα κατάτμησης”, δηλαδή να προκύψουν τα άτομα απ’ τα οποία έχει συντεθεί.

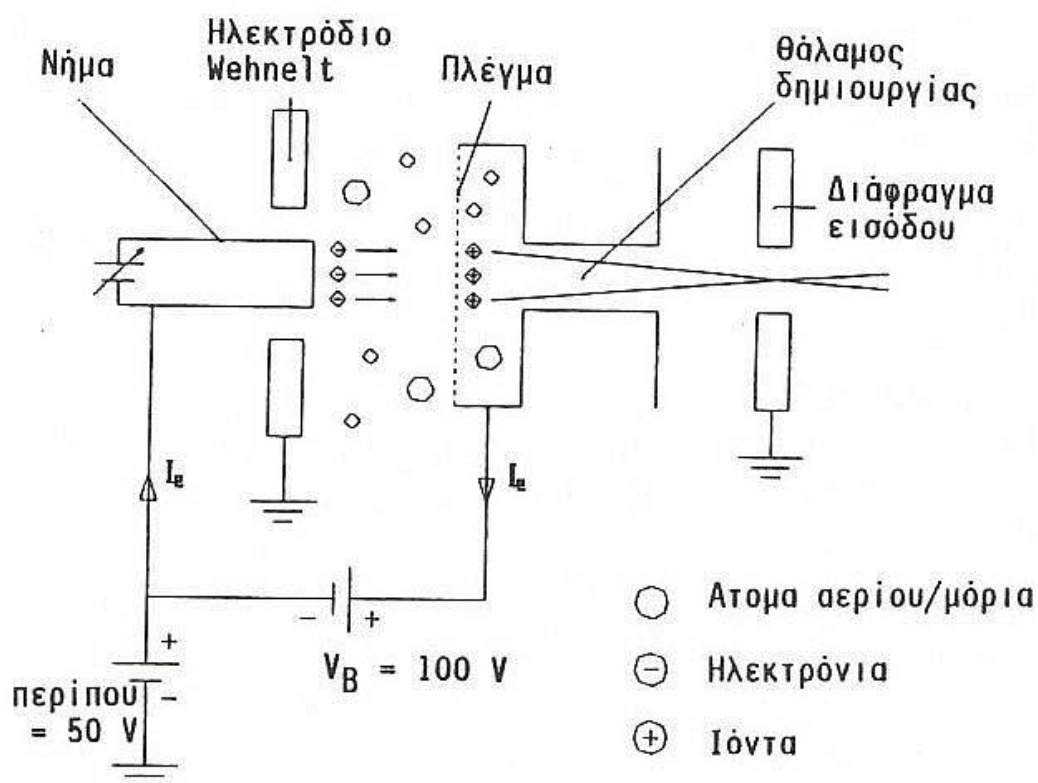
**Η ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων**, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποσότητα και το είδος των ιόντων που θα προκύψουν. Ο ιονισμός του αερίου ξεκινά από τιμές ενέργειας της τάξεως των 50 eV και φθάνει έως τα 150 eV ενώ η μέγιστη δυνατή απόδοση επιτυγχάνεται με τιμή της τάξεως 100 eV. Στο διάγραμμα που ακολουθεί βλέπουμε τον “διαφορικό ιονισμό” δηλαδή τα παραγόμενα ιόντα από ένα ηλεκτρόνιο ενέργειας 100 eV είναι πολύ περισσότερα από ηλεκτρόνια άλλων ενεργειών.



**Σχήμα 5.4:** Ο αριθμός των παραγομένων ιόντων, διαφόρων αερίων σε συνάρτηση με την ενέργεια των προσπιπτόντων ηλεκτρονίων.

## 5.2 Η Πηγή Ιόντων

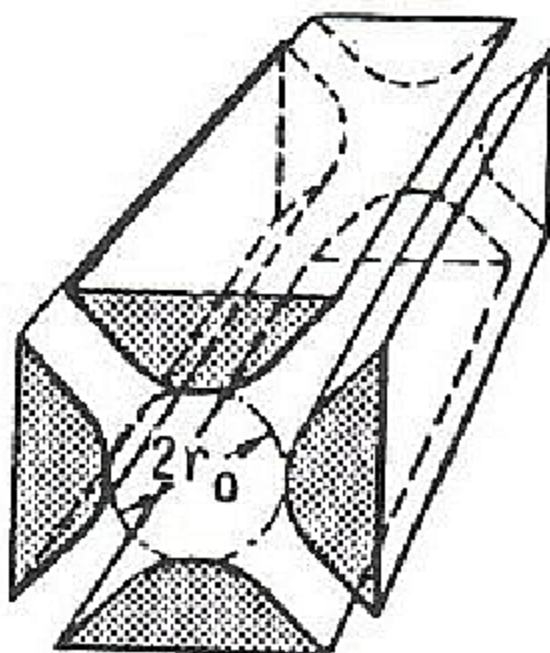
Στο επόμενο διάγραμμα του σχήματος 5.5 φαίνεται η λειτουργία της πηγής ιόντων και περιγράφεται η διαδικασία ιονισμού. Το δύστηκτο νήμα θερμαίνεται και εκπέμπει ηλεκτρόνια τα οποία με την βοήθεια του ηλεκτροδίου Wehnelt εστιάζονται και κατευθύνονται προς το πλέγμα. Η διαφορά δυναμικού  $V_B = 100\text{ V}$  δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ νήματος εκπομπής και πλέγματος που προσδίδει στα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια κινητική ενέργεια 100 eV. Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια πέφτουν πάνω στα μόρια/άτομα του αερίου και δημιουργούνται ιόντα. Στη συνέχεια τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια πέφτουν πάνω στο πλέγμα και μέσω της πηγής  $V_B$  οδηγούνται στο νήμα για να κλείσει το ηλεκτρικό κύκλωμα. Ενώ τα παραγόμενα θετικά ιόντα με εκτοξεύονται από το πλέγμα, που αναπτύσσει ηλεκτρικό πεδίο 150V προς τον θάλαμο δημιουργίας και το διάφραγμα εισόδου.



Σχήμα 5.5 Διάταξη λειτουργίας ιοντικής πηγής αξονικής δέσμης.

### 5.3 Τετραπολικό φίλτρο μαζών.

Ο διαχωρισμός των ιόντων γίνεται με βάση τον λόγο  $m/e$  του κάθε ιόντος και επιτυγχάνεται με την απόκλισή τους ή όχι απ' την αξονική δέσμη αφού περάσουν μέσα από μαγνητικά ή ηλεκτρικά πεδία. Για τον καθορισμό των μερικών πιέσεων χρησιμοποιούνται κυρίως ηλεκτρικά μεταβαλλόμενα πεδία της μορφής  $V \cos(\omega t)$  με συχνότητα στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (RF). Το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται από τέσσερα ηλεκτρόδια, ράβδους με υπερβολική διατομή, τοποθετημένα σε σταθερή ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους  $2r_0$  (όπου  $2r_0$  η σταθερή διαφορά σημείου των κλάδων της υπερβολής από τις Εστίες) όπως το παρακάτω σχήμα 5.6.

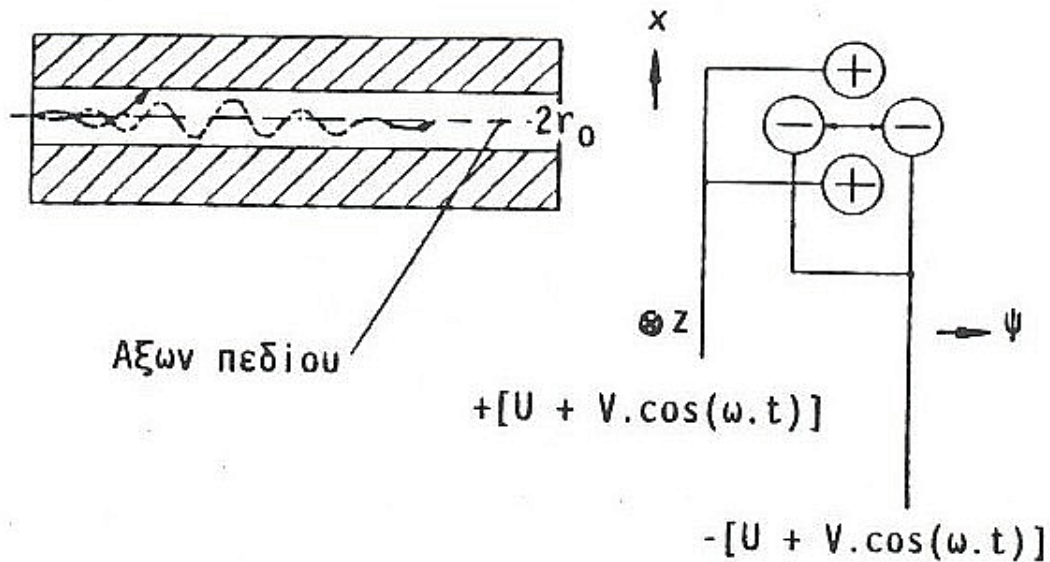


**Σχήμα 5.6** Η γεωμετρική μορφή του τετραπολικού φίλτρου μαζών.

Στην πράξη η διατομή των ηλεκτροδίων μπορεί να είναι κυκλική με ακτίνα κύκλου  $1,144r_0$  λόγω χαμηλού κόστους κατασκευής. Το ηλεκτροστατικό πεδίο που προκύπτει απ' την κυκλική γεωμετρία των ηλεκτροδίων προσομοιώνει ικανοποιητικά με το ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ των υπερβολικών ηλεκτροδίων. Στο σχήμα 5.7 που ακολουθεί φαίνεται η συνδεσμολογία των ράβδων, η εναλλασσόμενη τάση  $V \cos(\omega t)$  που υπερτίθεται σε συνεχή τάση  $U$  και η αξονική πορεία των ιόντων. Με καθορισμένες τις παραμέτρους  $V$ ,  $U$ ,  $\omega$  και  $r_0$  μόνο τα ιόντα με καθορισμένο λόγο μάζα/φορτίο ( $m/e$ ) μπορούν να περάσουν το φίλτρο μαζών.



Όλα τα υπόλοιπα ιόντα οδηγούνται εκτός πορείας του άξονα του πεδίου αφού εμφανίζουν αυξανόμενο εύρος ταλάντωσης, προσκρούουν πάνω στις ράβδους, αποφορτίζονται και δεν συλλέγονται στην έξοδο.



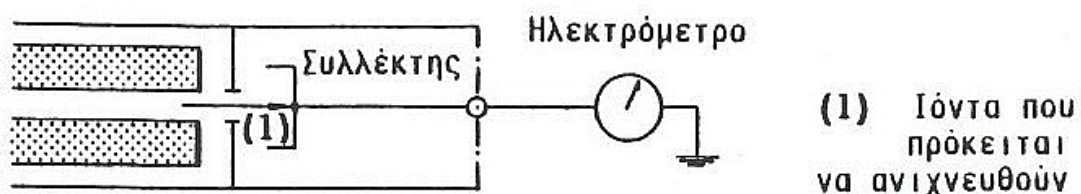
**Σχήμα 5.7:** Η κίνηση των ιόντων στο εσωτερικό του τετραπόλου και η ηλεκτρική τροφοδοσία.

Λόγω αυτής της συμπεριφοράς των ιόντων στο εσωτερικό του τετραπόλου συχνά αναφέρονται και “φίλτρα μαζών”.

#### 5.4 Ανιχνευτής Ιόντων - Συλλέκτης.

Τα ιόντα καθορισμένου λόγου μάζας/φορτίου που θα καταφέρουν να περάσουν θα ανιχνευτούν από έναν συλλέκτη που στην απλούστερη μορφή είναι ο συλλέκτης Faraday.

#### Τετραπολικό φίλτρο μαζών

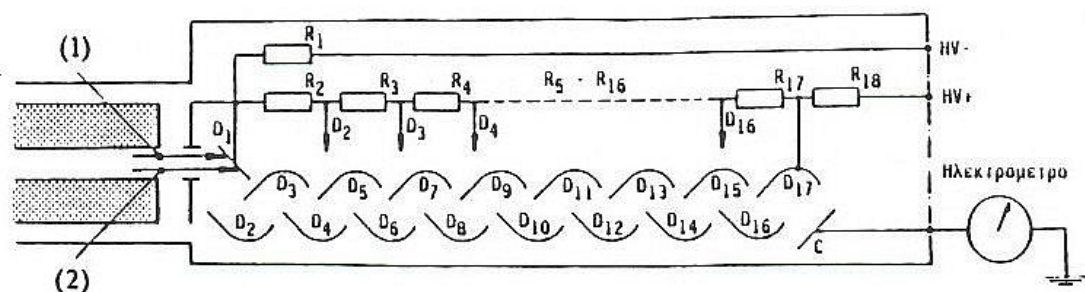


**Σήμα 5.8** Αρχή λειτουργίας συλλέκτη Faraday .



Επιλέγεται ο συλλέκτης Faraday λόγω του μικρού ποσοστού συστηματικών σφαλμάτων και με βάση την αρχή λειτουργίας του τα ιόντα που συλλέγονται αποδίδουν το φορτίο τους μετατρέποντάς το σε ιοντικό ρεύμα . Έτσι τα ιοντικά ρεύματα μετατρέπονται από ένα ευαίσθητο μετατροπέα ρεύματος / τάσης και στην συνέχεια διαβάζουμε την ένδειξη σαν μερική πίεση.

Όταν τα ιοντικά ρεύματα είναι αρκετά ασθενή ( $> 10^{-14}$  A ), χρησιμοποιείται πρόσθετη ενισχυτική διάταξη το ανοικτό SEM (Secondary Electron Multiplier). Στη διάταξη αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.9 τα ιόντα που θα περάσουν απ' το φίλτρο επιταχύνονται εκ' νέου από υψηλότερο δυναμικό και αντανακλώνονται διαδοχικά σε ένα σύστημα δυνόδων ( dynode  $D_i$ ) όπου απελευθερώνουν ηλεκτρόνια. Έτσι το σήμα ανίχνευσης προέρχεται πλέον από ηλεκτρόνια και όχι από ιόντα.



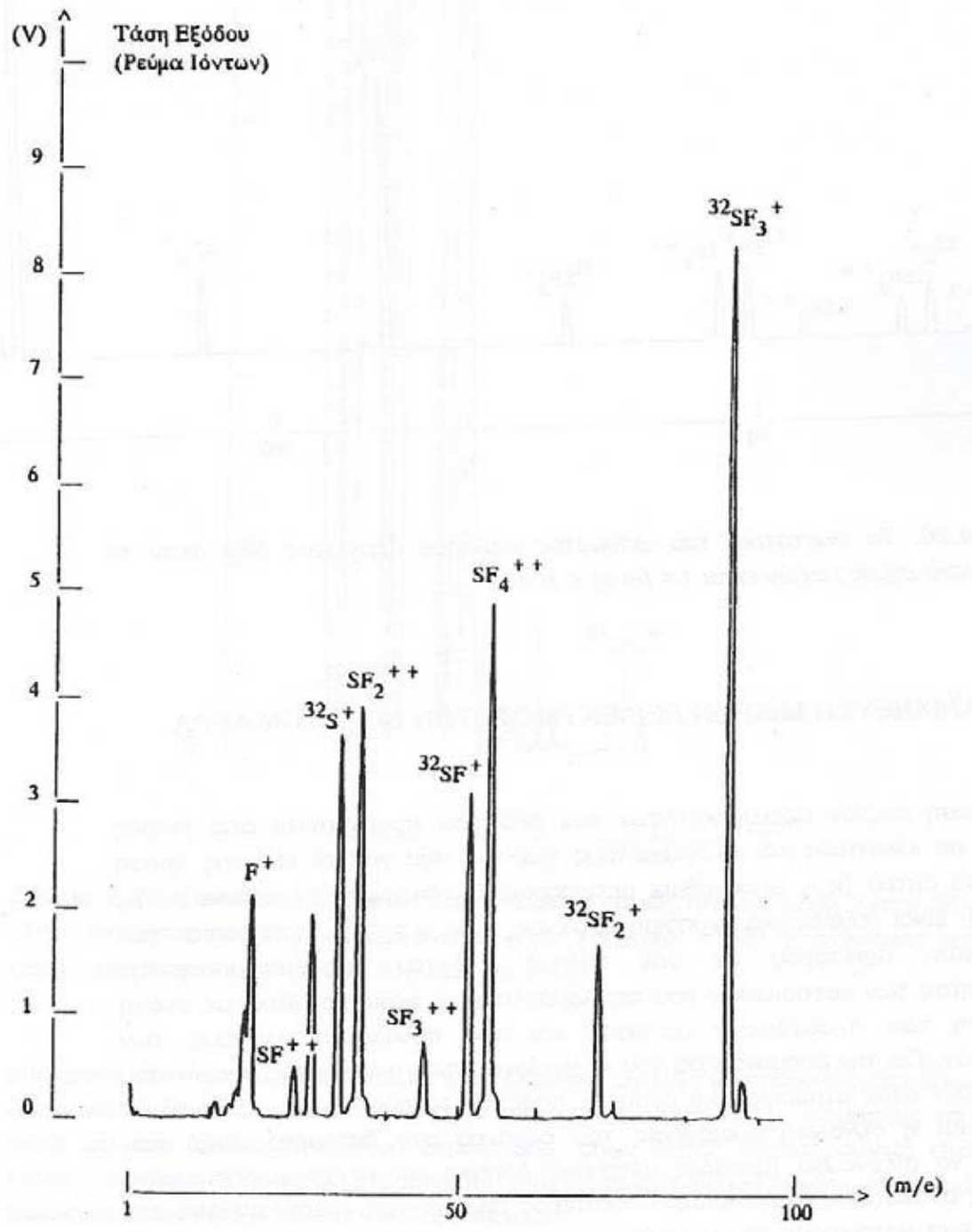
**Σχήμα 5.9:** Αρχή λειτουργίας αξονικού SEM . (1) Διεγερμένα ουδέτερα σωματίδια και μαλακές ακτίνες  $-X$  . (2) Ιόντα που πρόκειται να ανιχνευτούν.  $R_i$  : Αντιστάσεις καταμερισμού υψηλής τάσης (HV) .  $D_i$  : Δύνοδοι .  $C$  : Συλλέκτης ηλεκτρονίων.

### 5.5 Η μελέτη του καθαρού και ξηρού $SF_6$ με την χρήση του τετραπολικού φασματογράφου μαζών.

Το εξαφθοριούχο θείο είναι ένα αέριο κατασκευασμένο απ' τον άνθρωπο και παρουσιάζει φυσικές και χημικές ιδιότητες τέτοιες που το κάνουν χρήσιμο και αναντικατάστατο σε τεχνολογικά επιτεύγματα. Είναι γνωστό ότι χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτρική βιομηχανία επειδή είναι άριστο μονωτικό υλικό αλλά και σε άλλες εφαρμογές. Αν και είναι χημικά αδρανές με αρκετές ενώσεις και στοιχεία είναι ιδιαίτερα μικρή δραστικότητά του μας ενδιαφέρει η ανίχνευση των παραπροϊόντων που δημιουργούνται είτε στο εσωτερικό των συσκευών είτε στο περιβάλλον από τυχόν διαρροές.

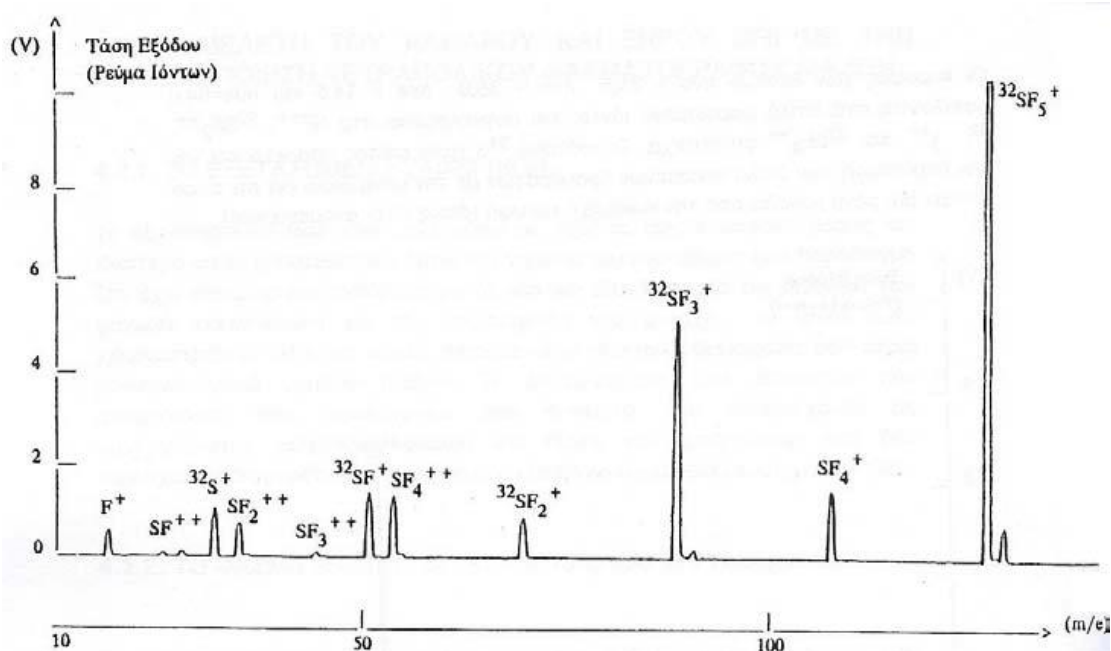
## 5.6 Φάσμα μαζών καθαρού και ξηρού SF<sub>6</sub>.

Πήραμε δείγματα από αμεταχειρίστο αέριο το οποίο φυλάσσεται σε χαλύβδινες φιάλες υπό πίεση για να το εξετάσουμε στον τετραπολικό φασματογράφο μάζας του εργαστηρίου. Ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία έτσι ώστε να πάρουμε συγκεκριμένα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.10: Συνιστώσες ιοντικών ρευμάτων σε αέριο SF<sub>6</sub> για εύρος m/e 1 έως 100.

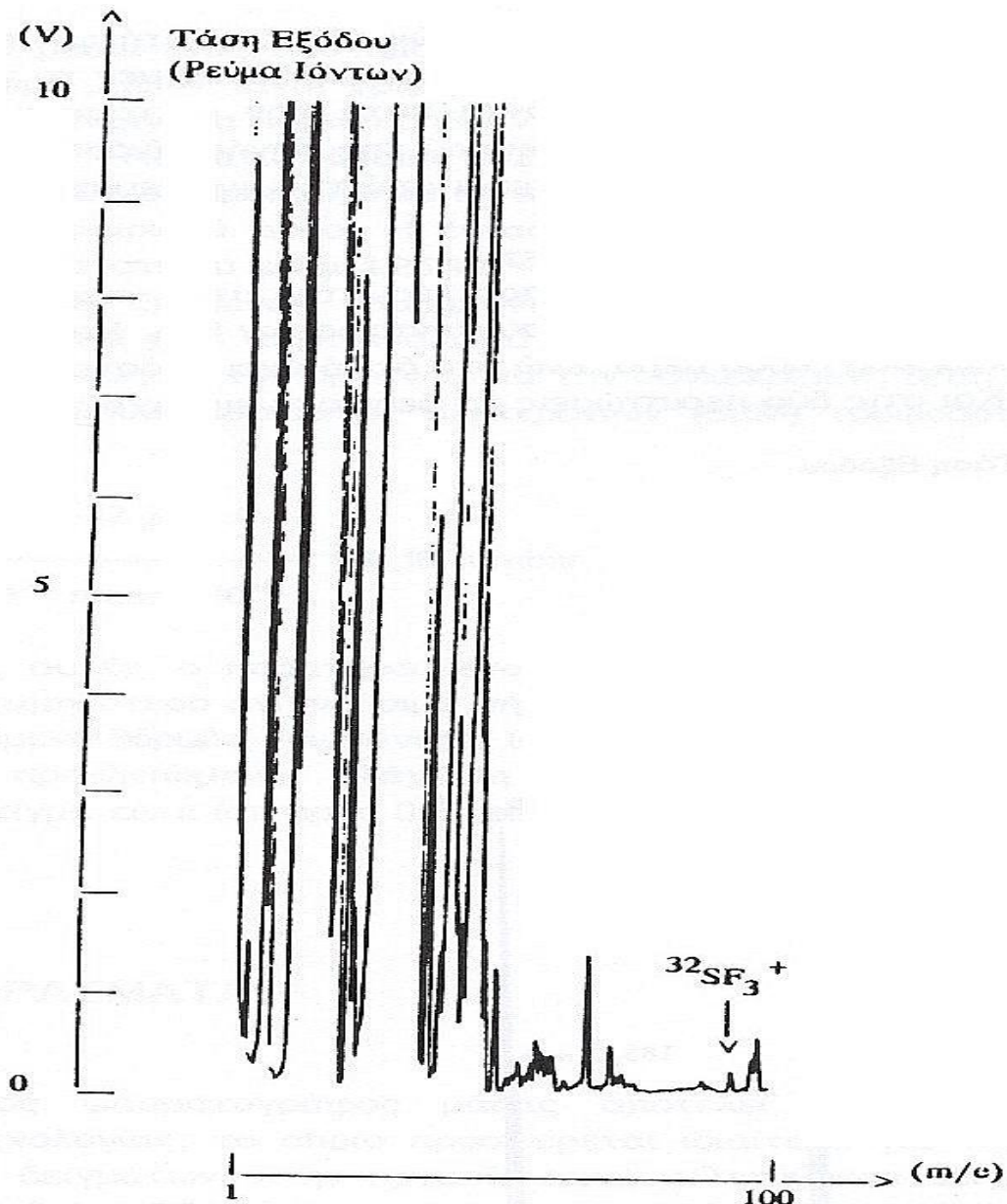
Χρησιμοποιήθηκε σύστημα κενού συνολικής πίεσης 10 – 8 mbar , αποτελούμενο από χαλύβδινο κώδωνα αντλούμενο με αντλία ικανότητας 500 L/sec. Διοχετεύσαμε το SF<sub>6</sub> στον κενό χώρο με σταθερό ρυθμό 4ccm/min και με διαφορικό σύστημα πίεσης έτσι ώστε να αποκλείσουμε διαχωρισμό μαζών. Χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος στην κλασική κλίμακα μαζών 1-100 m/e εφοδιασμένος με πηγή ιόντων αζονικής δέσμης, τετραπολικό σύστημα ράβδων, και δευτερογενή πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων SEM. Η ενέργεια ιονισμού ήταν 100 eV και το ρεύμα εκπομπής 1 mA . Διαβάζοντας προσεκτικά τις συνιστώσες των ιοντικών ρευμάτων στο σχήμα 5.10 βλέπουμε ότι στη θέση m/e=19 βρίσκεται το ατομικό φθόριο F<sup>+</sup> , στη θέση m/e=32 ισότοπο του θείου <sup>32</sup>S<sup>+</sup> . Τα απλά ιόντα SF<sup>+</sup> , SF<sub>2</sub><sup>+</sup> και SF<sub>3</sub><sup>+</sup> για το ισότοπο <sup>32</sup>S βρίσκονται στις θέσεις m/e= 51 ,70 και 89 . Στο επόμενο διάγραμμα σχήμα 5.11 που το εύρος εξέτασης m/e είναι από 1 έως 300 εμφανίζονται τα ιόντα SF<sub>4</sub><sup>+</sup> και SF<sub>5</sub><sup>+</sup> στις θέσεις m/e= 108 και 127 αντίστοιχα. Για την ενέργεια ιονισμού των ηλεκτρονίων της ιοντικής πηγής 100 eV δεν παρατηρούνται μοριακά ιόντα (SF<sub>6</sub><sup>+</sup>). Παρατηρούμε ότι στη θέση m/e= 54 είναι το διπλά ιονισμένο SF<sub>4</sub><sup>++</sup> , όπως επίσης και στη θέση m/e=44,5 το διπλά ιονισμένο SF<sub>3</sub><sup>++</sup> . Θέσεις αναμενόμενες αφού είναι m/2e σε σχέση με τα απλά ιονισμένα ιόντα.



**Σχήμα 5.11:** Συνιστώσες ιοντικών ρευμάτων του φάσματος αερίου SF<sub>6</sub> για εύρος m/e έως 300.

## 5.7 Ανίχνευση μικρών περιεκτικότητων SF<sub>6</sub> στον αέρα

Η ιδιότητα του SF<sub>6</sub> να είναι άριστο μονωτικό υλικό, το καθιστά αναντικατάστατο στη βιομηχανία ηλεκτρικού ρεύματος και είναι δυνατή πλέον η τοποθέτηση ηλεκτρικών εξαρτημάτων όπως μετασχηματιστές, υποσταθμοί και άλλων σε στεγασμένους χώρους. Ο περιοδικός έλεγχος της στεγανότητας των εξαρτημάτων είναι απαραίτητος για να αποφύγουμε πιθανές διαρροές του αερίου. Έτσι αναλύουμε δείγμα ξηρού αέρα απ' το περιβάλλον των ηλεκτρικών εξαρτημάτων για πιθανή ανίχνευση προϊόντων του αερίου. Στο σχήμα 5.12 φαίνεται το φάσμα του δείγματος



**Σχήμα 5.12** Ανάλυση δείγματος ξηρού αέρα στεγασμένου χώρου, που χρησιμοποιείται SF<sub>6</sub>.

σε εύρος κλίμακας μαζών  $m/e$  1 έως 100. Οι κορυφές των ιοντικών ρευμάτων που βλέπουμε στις πρώτες θέσεις της κλίμακας  $m/e$  χαρακτηρίζεται σαν θόρυβος από διάφορους παράγοντες, όπως ηλεκτρονικός θόρυβος, σκέδαση ιόντων από τις ακαθαρσίες του αέρα και άλλα. Έτσι δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός στις θέσεις αυτές προϊόντων. Όμως στη θέση  $m/e = 89$  εμφανίζεται η κορυφή του ιοντικού ρεύματος του  $SF_3^+$ . Στην θέση αυτή δεν παρατηρείται κορυφή σε καθαρό δείγμα αέρα, ενώ στις θέσεις 92,5 και 93,5 είναι οι κορυφές των ιόντων ρηνίου απ' το νήμα εκπομπής ιόντων.

Ο τετραπολικός φασματογράφος μάζας προσφέρεται για την συστηματική μελέτη αερίων δειγμάτων. Ενώ ελέγχοντας την ύπαρξη κορυφής στη θέση  $m/e = 89$  μπορούμε να αποφανθούμε αν υπάρχει διαρροή αερίου  $SF_6$  στις εγκαταστάσεις ή όχι.

#### **Βιβλιογραφία:**

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

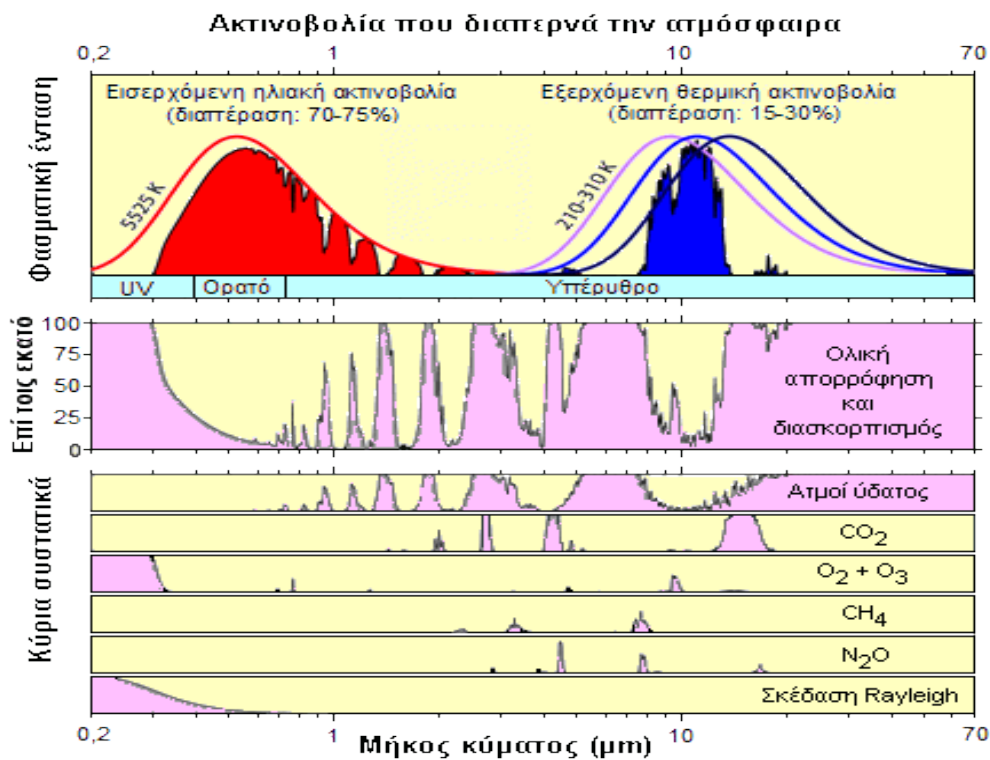
## 6. ΤΟ SF<sub>6</sub> ΑΕΡΙΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Το αέριο SF<sub>6</sub> είναι αρκετά μελετημένο και έχει διαπιστωθεί ότι είναι μη τοξικό για τον άνθρωπο, δεν αντιδρά με τα στοιχεία που χρησιμοποιείται αφού δεν είναι καθόλου δραστικό και βρίσκεται ακόμη σε πολύ χαμηλά επίπεδα στην ατμόσφαιρα. Στο σύνολό του είναι αέριο ανθρωπογενούς προέλευσης και έχει εξακριβωθεί ότι είναι μεγάλη η δυναμικότητά του ως αέριο θερμοκηπίου, γι' αυτό καταβάλλονται προσπάθειες να μειωθούν οι εκπομπές του, από τις διάφορες χρήσεις του. Στη βιομηχανία παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή το αέριο θεωρείται αναντικατάστατο οι προσπάθειες γίνονται στον μηδενισμό των διαρροών, ενώ σε άλλες χρήσεις προσπαθούμε να το αντικαταστήσουμε με άλλο.

### 6.1 Φαινόμενο του θερμοκηπίου και SF<sub>6</sub>

Είναι γνωστό ότι η Γη θερμαίνεται απ' τον Ήλιο με την ηλιακή ακτινοβολία, αφού η θερμοκρασία στην επιφάνειά της είναι αρκετά μικρότερη απ' αυτή του ήλιου. Η ακτινοβολία που δέχεται η Γη απ' τον ήλιο είναι κυρίως στην υπεριώδη και ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ( στο σχήμα 6.1 που ακολουθεί το κόκκινο διάγραμμα ). Σύμφωνα με την θεωρία του μέλανος σώματος ( "μέλαν σώμα" είναι ένα ιδανικό σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που δέχεται και εκπέμπει ένα φάσμα ακτινοβολίας το εύρος της οποίας εξαρτάται απ' την θερμοκρασία του σώματος που θεωρείται σταθερή) επειδή η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης είναι πολύ χαμηλότερη απ' αυτή του ήλιου, η Γη εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε υψηλότερο μήκος κύματος απ' αυτό που δέχεται, δηλαδή εκπέμπει στην περιοχή του υπέρυθρου φάσματος ( μπλε διάγραμμα ). Μέρος της εξερχόμενης ακτινοβολίας, απορροφάται από συστατικά της ατμόσφαιρας και επιστρέφει πίσω στη Γη, με αποτέλεσμα την διατήρηση της θερμοκρασίας της τροπόσφαιρας στα σημερινά επίπεδα θερμοκρασίας. Η ισορροπία μεταξύ της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της εξερχόμενης ακτινοβολίας απ' την επιφάνεια της Γης, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να διατηρείται η θερμοκρασία της γήινης ατμόσφαιρας διαχρονικά. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα κύρια φυσικά συστατικά της ατμόσφαιρας που συγκρατούν την ανακλώμενη ακτινοβολία και η οποία επιστρέφεται στη Γη (υδρατμοί, CO<sub>2</sub> , CH<sub>4</sub> , N<sub>2</sub>O και άλλα). Καταλαβαίνουμε ότι η συγκράτηση της εξερχόμενης ακτινοβολίας από φυσικά συστατικά και η επιστροφή της πίσω στη Γη, είναι απαραίτητη για την ζωή στον πλανήτη μας.

Το φαινόμενο αυτό είναι ευρύτερα γνωστό ως **φαινόμενο του θερμοκηπίου** ( greenhouse effect ) ενώ τα συστατικά της ατμόσφαιρας που συμβάλλουν σε αυτό το φαινόμενο ονομάζονται **αέρια θερμοκηπίου** (greenhouse gases) . Ότι όμως επιτείνει αυτό το φαινόμενο, συμβάλλει στην υπερθέρμανση της ατμόσφαιρας με καταστροφικά αποτελέσματα ( κλιματικές αλλαγές, τήξη παγετώνων, πλημμύρες κ.α.). Πέραν των φυσικών στοιχείων που συμβάλλουν στην αύξηση του φαινομένου, είναι και άλλα ανθρωπογενούς προέλευσης όπως τα διάφορα φθοροπαράγωγα υδρογονανθράκων αλλά και το SF<sub>6</sub>.



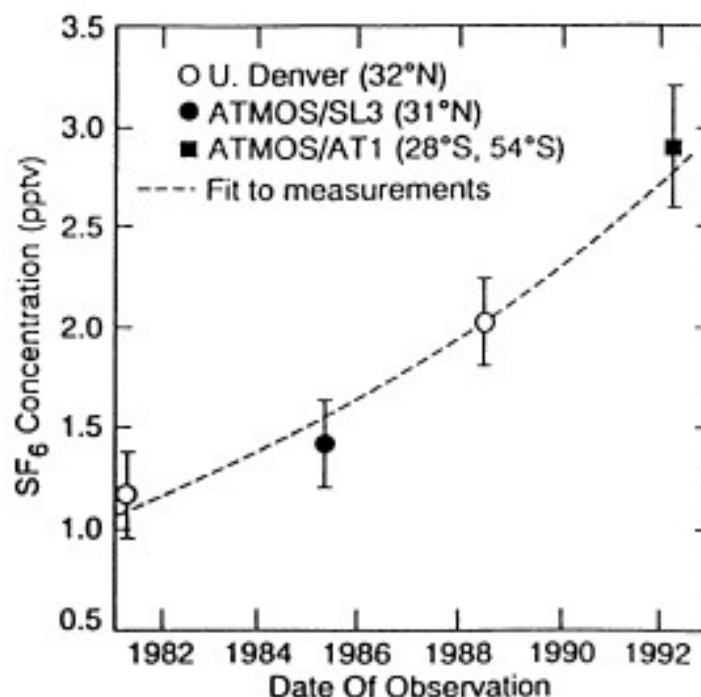
**Σχήμα 6.1:** Το φάσμα εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας καθώς και τα κύρια φυσικά στοιχεία που απορροφούν την εξερχόμενη, όπως και το ποσοστό απορρόφησής τους.

Αρκετά κράτη (160) που παράγουν αέρια, φυσικά ή ανθρωπογενή και τα οποία συμβάλλουν στη αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω φαινομένου του θερμοκηπίου, συμφώνησαν στο Κγτο της Ιαπωνίας να λάβουν μέτρα, ώστε έως το 2012 οι εκπομπές όλων των κύριων “αερίων θερμοκηπίου” να είναι στα επίπεδα του 1990. Στη συμφωνία αυτή, γνωστή και ως “Πρωτόκολλο του Κγτο”, προβλέπεται αν κάποιο κράτος έχει χαμηλότερες εκπομπές να μπορεί να πωλήσει την διαφορά, σε άλλο με υψηλότερες εκπομπές.

Όπως φαίνεται και απ' το γράφημα μεγάλη συμβολή έχει το CO<sub>2</sub>. Οι διάφοροι χλωροφθοράνθρακες αν και συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου δεν θεωρούνται πλέον αέρια θερμοκηπίου αφού έχει απαγορευθεί η παραγωγή τους επειδή καταστρέφουν το όζον. Το SF<sub>6</sub> όμως είναι ένα αέριο θερμοκηπίου και μάλιστα πολύ δραστικό.

## 6.2 Η συγκέντρωση του SF<sub>6</sub> στο περιβάλλον.

Επειδή το αέριο SF<sub>6</sub> είναι πολύ χρήσιμο στην βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων του ( άριστο μονωτικό κ.α. ) υπάρχει αυξημένη ζήτηση και παράγεται σε μεγάλες ποσότητες. Η παγκόσμια παραγωγή απ' το 1970 αυξάνεται κάθε χρόνο και το 1993 ήταν 7000 τόνους. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2 από μετρήσεις του Πανεπιστημίου του Denver οι ποσότητες που ανιχνεύονται στην ατμόσφαιρα αυξάνονται με ρυθμό 8,7% το έτος . Δηλαδή για μετρήσεις απ' το 1980 στα όρια της ανίχνευσης, το 1993 έφτασε στα 3,2ppbv ( ppbv= parts per trillion volume , δηλαδή σωματίδια ανά 10<sup>12</sup> όγκου) ενώ εκτιμάται ότι με αυτούς τους ρυθμούς η συγκέντρωση το 2030 θα φτάσει τα 20 ppbv . Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, τα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης απαγόρευσαν τη χρήση του SF<sub>6</sub> ( π.χ. ελαστικά αυτοκινήτων ) ενώ σε άλλες επέβαλλαν κανόνες για την αποφυγή των διαρροών.



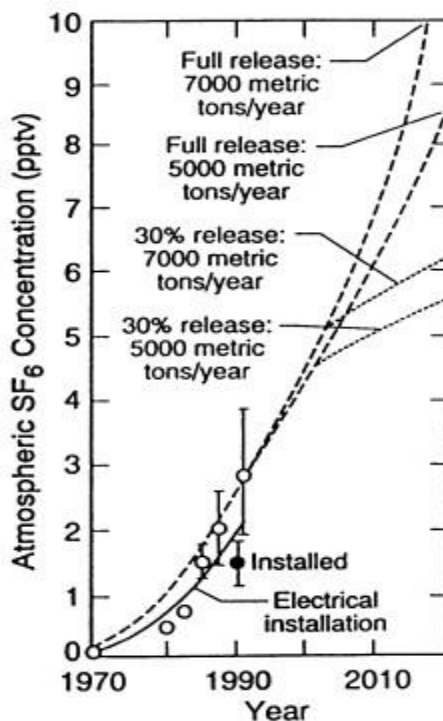
Σχήμα 6.2: Μετρήσεις της συγκέντρωσης του SF<sub>6</sub> την δεκαετία 82-92.



Χωρίς την ύπαρξη μεθόδων που να καταστρέφουν ή να ανακυκλώνουν το SF<sub>6</sub> αλλά και χωρίς τον περιορισμό των διαρροών όλο το αέριο που έχει παραχθεί ή θα πειραχθεί στο μέλλον θα καταλήξει στην ατμόσφαιρα στους επόμενους αιώνες Έτσι στην πράξη μειώνοντας τον ρυθμό των διαρροών και εφαρμόζοντας μεθόδους ανακύκλωσης ή καταστροφής καταφέρνουμε να μειώσουμε την παγκόσμια παραγωγή και τελικά τις ποσότητες που θα απελευθερωθούν στο περιβάλλον. Οι προσπάθειες σωστότερης διαχείρισης του αερίου και από τις ίδιες τις εταιρείες όπως η παρακολούθηση της πίεσης συσκευών που περιέχουν αέριο SF<sub>6</sub> αλλά και από κανονισμούς των κρατών που περιλαμβάνουν βελτιωμένες μεθόδους ποσοτικού προσδιορισμού και διακοπής διαρροών, καλύτερες διαδικασίες άντλησης και αποθήκευσης, καθορισμό προτύπων ανακύκλωσης, κατασκευή μηχανημάτων με καλύτερη στεγανοποίηση, σταδιακή αντικατάσταση μηχανημάτων παλαιότερης τεχνολογίας, και γενικά πολιτική ορθής χρήσης έχουν οδηγήσει στη μείωση της παραγωγής. Το ενδιαφέρον όλων πρέπει να έχει ένα και μόνο ένα κίνητρο, το ότι το SF<sub>6</sub> είναι ένα δραστικό αέριο του θερμοκηπίου.

### 6.3 Το αέριο SF<sub>6</sub> ως ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου.

Όπως είναι αντιληπτό, ότι οδηγεί προς την μια ή την άλλη κατεύθυνση την ισορροπία μεταξύ εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας στον άνω μέρος της τροπόσφαιρας, διαταράσσει την παγκόσμια σταθερά της θερμοκρασίας της Γης.



**Σχήμα 6.3:** Η συγκέντρωση του SF<sub>6</sub> στην ατμόσφαιρα.

Το εξαφθοριούχο θείο ( $\text{SF}_6$ ) απορροφά πολύ αποδοτικά την υπέρυθη ακτινοβολία, ιδιαίτερα στα μήκη κύματος κοντά σε 10,5  $\mu\text{m}$  (στην περιοχή του μπλε χρώματος στο διάγραμμα σχήματος 6.1). Επιπλέον, αντίθετα από τα φυσικά αέρια του θερμοκηπίου (πχ  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), το  $\text{SF}_6$  παρουσιάζει μεγάλη χημική σταθερότητα και δεν καταστρέφεται με φυσικούς τρόπους. Οι ποσότητες  $\text{SF}_6$  που είναι απελευθερωμένες στην ατμόσφαιρα για να μειωθούν κατά 37% της αρχικής ποσότητας με φυσικούς τρόπους έχει εκτιμηθεί ότι χρειάζονται από 800 έως 3200 χρόνια. Έτσι η ισχυρή απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας και η μακροχρόνια διάρκεια ζωής είναι λόγοι που το κατατάσσουν σε εξαιρετικά υψηλό δυναμικό της παγκόσμιας θέρμανσης για ορίζοντα πολλών εκατονταετιών. Υπολογίζεται ότι είναι περίπου 25000 φορές ισχυρότερο απ' ό,τι το  $\text{CO}_2$  που έχει την κυρίαρχη συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (1 kg  $\text{SF}_6$  αντιστοιχεί σε 25 τόνους  $\text{CO}_2$ ). Επειδή το  $\text{SF}_6$  ήδη χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές, θα υπάρξουν προφανείς οικονομικές επιπτώσεις σε οποιοσδήποτε προσπάθειες να ελεγχθεί η παραγωγή, η χρήση και η ενδεχόμενη διάθεσή του. Στο διάγραμμα (σχήμα 6.3) φαίνεται το συσσωρευτικό άθροισμα του  $\text{SF}_6$  στην ατμόσφαιρα συνεχής γραμμή του διαγράμματος δείχνει, το εκτιμώμενο συσσωρευτικό άθροισμα του  $\text{SF}_6$  στην ατμόσφαιρα, που προέρχεται από μονώσεις ηλεκτρικού εξοπλισμού. Το σημείο (Installed) αντιστοιχεί στην κατ' εκτίμηση συγκέντρωση του  $\text{SF}_6$ , αν υποθέσουμε ότι όλο το αέριο που υπήρχε το 1990 στον ηλεκτρικό εξοπλισμό, απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα. Ενώ οι διακεκομμένες γραμμές του διαγράμματος δείχνουν την προβλεπόμενη αύξηση στο μέλλον κάτω από ορισμένες συνθήκες.

#### 6.4 Η επίδραση του $\text{SF}_6$ στο φάσμα ακτινοβολίας.

Έως τα τέλη του προηγούμενου αιώνα το φως θεωρείτο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Στις αρχές του 20ού αιώνα ο Einstein θέλοντας να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (το φαινόμενο κατά το οποίο όταν πέσει στην επιφάνεια αγωγού ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή φως, τότε ηλεκτρόνια εξάγονται απ' την επιφάνεια του αγωγού, με αποτέλεσμα μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων και τελικά την δημιουργία ρεύματος) έδωσε στο φως και μια δεύτερη φύση που κατανοείται αν θεωρήσουμε ότι το φως αποτελείται από σωματίδια με ύλη που διαδίδονται όπως ένα κύμα. Τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν **φωτόνια** που διαδίδονται με ταχύτητα,

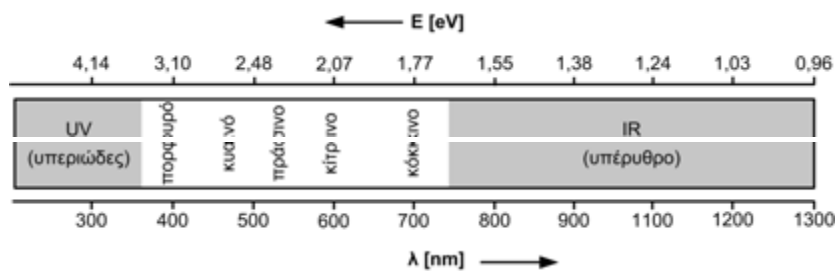
$$c = f \cdot \lambda$$

όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός,  $f$  η συχνότητα ταλάντωσης και  $\lambda$  το μήκος κύματος. Ενώ την ενέργεια  $E$  που έχει ένα τέτοιο σωματίδιο υπολόγισε ο Planck και είναι:

$$E = h \cdot f = \hbar \cdot \omega$$

όπου  $h$  η σταθερά Planck ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} = 4,15 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{sec}$ ) και  $\hbar = h/2\pi$ .

Κατά την μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας, βλέπουμε ότι το ηλιακό φως καλύπτει ένα ευρύ φάσμα ενεργειών  $E$  ( eV ) ανάλογα με το μήκος κύματος  $\lambda$  ( nm ) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4 . Για παράδειγμα το μήκος κύματος  $\lambda = 300 \text{ nm}$  αντιστοιχεί σε υπεριώδη ακτινοβολία ( κάτω απ' την λευκή περιοχή που είναι το ορατό φως ) και η ενέργεια εκείνων των φωτονίων είναι  $E = 4,14 \text{ eV}$  .



**Σχήμα 6.4** Το φάσμα του φωτός και οι σχέσεις ανάμεσα στην ενέργεια  $E$  , στα χρώματα και στο μήκος κύματος  $\lambda$  .

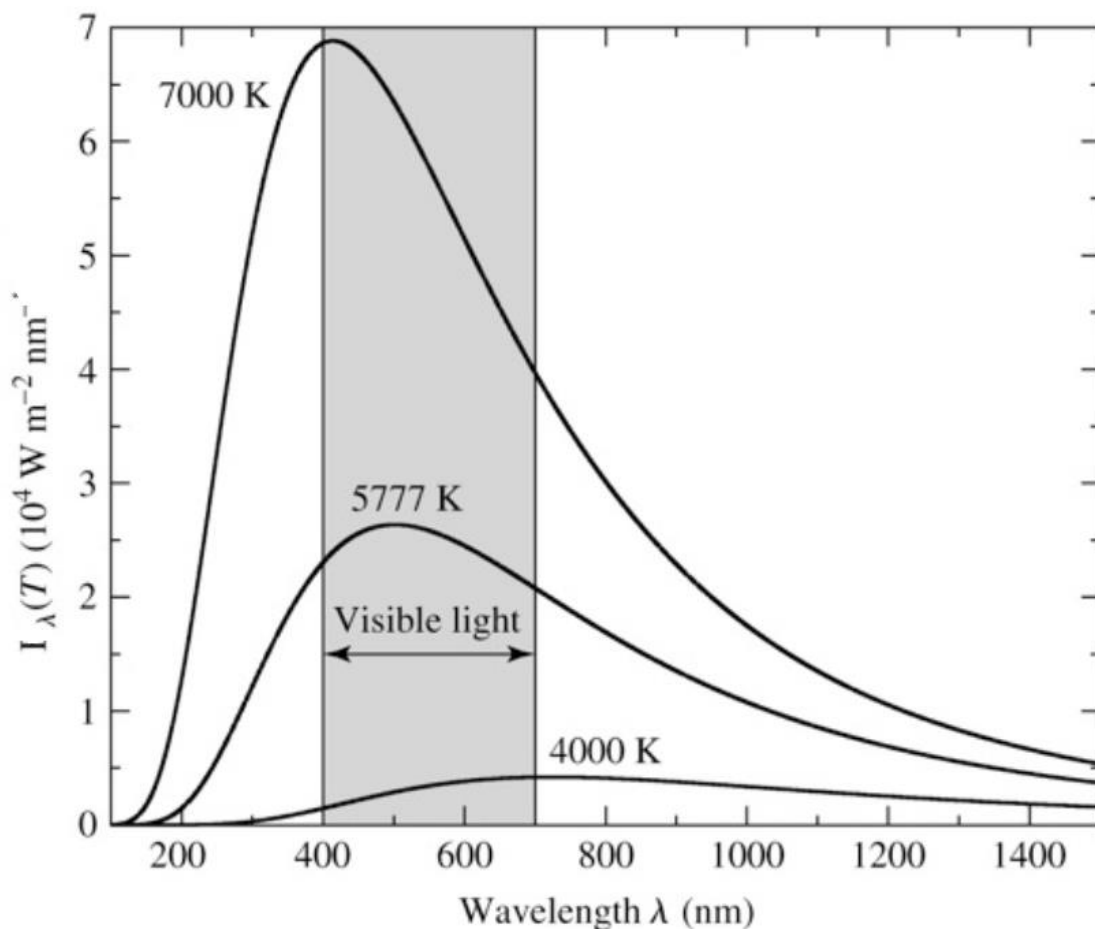
Σύμφωνα με την θεωρία του “μέλανος σώματος”, κάθε σώμα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του και αν έχει μεγαλύτερη ενέργεια απ’ αυτό προσπαθεί να την αποβάλλει. Αυτό μπορεί να συμβεί ακτινοβολώντας φωτόνια διαφόρων ενεργειακών καταστάσεων. Ο Planck κατέληξε σε έναν τύπο που υπολογίζει την φασματική εκπομπή μέλανος σώματος και μας δίνει την ένταση  $I_{(\lambda,T)}$  σε  $W/(m^2 \cdot nm)$  ή  $W/(m^2 \cdot eV)$  για διάφορες τιμές του μήκους κύματος  $\lambda$  του φάσματος όταν η θερμοκρασία του σώματος είναι σε θερμοκρασία  $T$ .

$$I_{(\lambda,T)} = (2\pi h c^2 \lambda^{-5}) / (e^{hc/\lambda kT} - 1)$$

Η ολοκλήρωση της έντασης σε όλο το μήκος του φάσματος για την θερμοκρασία του σώματος μας παρέχει την συνολική ενέργεια  $E_{(T)}$  που εκπέμπει το σώμα.

$$E_{(T)} = 5,67 \cdot 10^{-8} T^4$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η γραφική παράσταση της έντασης  $I$  μέλανος σώματος, σε τρεις τιμές θερμοκρασίας στο φάσμα ακτινοβολίας.



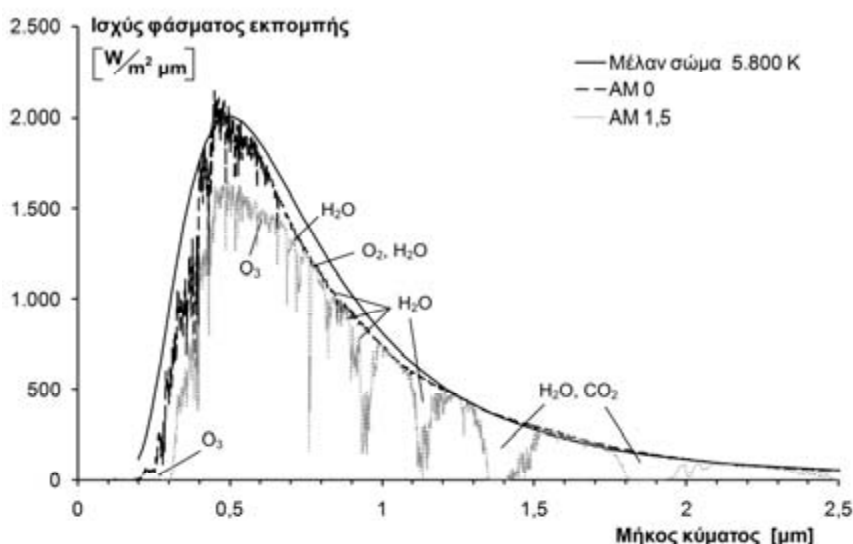
**Σχήμα 6.5** Η φασματική εκπομπή Β τριών σωμάτων σε διαφορετικές θερμοκρασίες για διάφορες τιμές μήκους κύματος  $\lambda$ .

Η ένταση του ηλιακού φωτός, όταν διαπερνά τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας για να φτάσει στην επιφάνεια της γης εξασθενεί. Αφού ένα μέρος ανακλάται στο σύνορο της επιφάνεια της ατμόσφαιρας, ενώ το μέρος που εισχωρεί εξασθενεί και πάλι. Οι κύριοι λόγοι εξασθένησης είναι η απορρόφηση των φωτονίων από άλλα μόρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα ( υδρατμοί,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $CO_3$ ,  $SF_6$  και άλλα ) και η εξασθένηση της έντασης  $I$  λόγω της διαδρομής μέσα στην ατμόσφαιρα. Μάλιστα το μεγαλύτερο μέρος εξασθένησης συμβαίνει στην αρχή της διείσδυσης σύμφωνα με τον νόμο Lambert-Beer-Bouguer :

$$I(x) = I_{(x=0)} e^{-ax}$$

Ένα άλλο μέγεθος που συναντάμε όταν υπολογίζουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά φθάνει στην επιφάνεια της γης σε ένα συγκεκριμένο τόπο και μια συγκεκριμένη ημερομηνία είναι Αέρια Μάζα ( AM ).

Σαν Αέρια Μάζα ορίζεται ο λόγος της διαδρομής  $x$  μέσα στην ατμόσφαιρα που διανύει η άμεση ακτινοβολία για να φθάσει σε έναν τόπο, προς το πάχος  $d$  της ατμόσφαιρας  $s'$  αυτόν τον τόπο. Αν υποθέσουμε ότι πριν την είσοδο στην ατμόσφαιρα δεν υπάρχει εξασθένηση τότε η Αέρια Μάζα έξω απ' την ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται σαν AM 0. Σε τόπο που η ακτινοβολία πέφτει κάθετα ( $x/d = 1$ ) χαρακτηρίζεται σαν AM 1 ενώ σε τόπο που η ακτινοβολία πέφτει υπό γωνία  $\gamma_s$  χαρακτηρίζεται σαν AM  $1/\cos(90^\circ - \gamma_s)$ . Η AM 1.5 αποτελεί ένα τυπικό ηλιακό φάσμα στην επιφάνεια της Γης σε μια ηλιόλουστη ημέρα και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει ηλιακούς συλλέκτες. Δηλαδή ο όρος Αέρια Μάζα χαρακτηρίζεται και από την γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας σε έναν τόπο. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται το φάσμα της έντασης  $I$  ενός μέλανος σώματος σε θερμοκρασία  $T = 5800K$ , πώς αυτό διαμορφώνεται έξω απ' την γήινη ατμόσφαιρα AM 0, αλλά και πώς καταλήγει στην επιφάνεια της γης σε τόπο με AM 1.5.



**Σχήμα 6.6** Το φάσμα ακτινοβολίας μέλανος σώματος θερμοκρασίας  $T=5800K$  ανηγμένο ως προς την απόσταση Άλιου-Γης, η διαμόρφωσή του έξω απ' την γήινη ατμόσφαιρα AM 0, και στην επιφάνεια της γης σε τόπο με AM 1.5.

Στο σχήμα 6.6 παρατηρούμε την εξασθένηση της ηλιακής ακτινοβολίας (αφού ο ήλιος στην επιφάνειά του έχει θερμοκρασία 5777K) σε τόπο με AM 1.5 (το AM 1.5 θεωρείται και παγκόσμιο ηλιακό φάσμα αναφοράς για τα tests συσκευών και εξαρτημάτων) λόγω της διαδρομής και των μορίων που την απορροφούν. Γνωρίζουμε ότι η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ( $\lambda < 0,29 \mu m$ ) απορροφάται απ' το όζον αλλά και απ' το N<sub>2</sub> και το O<sub>2</sub>. Επίσης απ' το σχήμα 6.6 φαίνεται ότι η ποσότητα της έντασης ακτινοβολίας για μεγάλα μήκη κύματος ( $2,5 \mu m < \lambda$ ) είναι λιγότερη από 5%.

Ενώ το φάσμα με μήκος κύματος μεταξύ 0,29μm και 2,5μm αποτελεί τον κύριο όγκο της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι αυτό που αφορά και τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Διότι τα υλικά που διαθέτουμε για τις φωτοβολταϊκές εφαρμογές είναι ευαίσθητα σε μήκη κύματος για άμορφο πυρίτιο έως 0,8 μm ενώ άλλα υλικά είναι ευαίσθητα έως τα 1,35 μm.

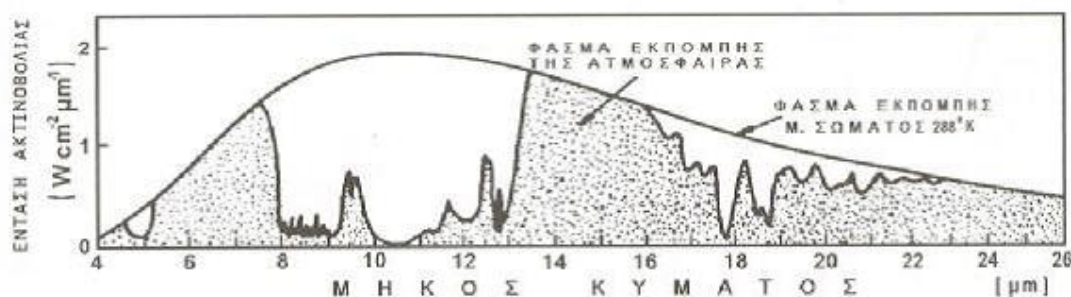
Όπως έχουμε αναφερθεί προηγουμένα, η Γη ακτινοβολεί και αυτή και μάλιστα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα απ' αυτά που δέχεται ακτινοβολία απ' τον ήλιο. Συμπεριφέρεται δηλαδή σαν είδος "μέλανος σώματος" που ολική ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπει, ακολουθεί και αυτή τον νόμο Boltzmann είναι δηλαδή ανάλογη της τετάρτης δύναμης της θερμοκρασίας της.

$$E = \sigma \cdot T^4$$

Η χαρακτηριστική φασματική εκπομπή μας δίνει την ένταση της ακτινοβολίας "μέλανος σώματος" για θερμοκρασία  $T=288K$ , ενώ το μέγιστο της έντασης παρατηρείται για μήκος κύματος  $\lambda=10\mu m$ , όπως προβλέπεται και απ' τον νόμο Wien για το μήκος κύματος  $\lambda_{max}$  που αντιστοιχεί το μέγιστο της έντασης.

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

Επειδή όμως η Γη είναι ένας πλανήτης με ατμόσφαιρα δεν εκπέμπεται όλη ακτινοβολία αλλά ένα μέρος της απορροφάται απ' αυτή όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6. Η ακτινοβολία απορροφάται κυρίως από τους υδρατμούς για μήκη κύματος 5μm έως 7,5 μm και για μήκη κύματος  $\lambda > 14\mu m$ . Το  $CO_2$  που εκλύεται στην ατμόσφαιρα απορροφά σε  $\lambda=4\mu m$  και  $\lambda=15\mu m$  ενώ τα  $CH_4$  και  $N_2O$  απορροφούν στο  $\lambda=8\mu m$ . Οι δύο κορυφές στο  $\lambda=9,5\mu m$  δημιουργούνται από το  $O_2$  και το  $O_3$ . Το  $SF_6$  απορροφά πολύ δραστικά τα φωτόνια σε μήκος κύματος  $\lambda=10,5\mu m$ .



**Σχήμα 6.6** Σύγκριση του φάσματος ακτινοβολίας μέλανος σώματος θερμοκρασίας 288K και του φάσματος ακτινοβολίας της γήινης ατμόσφαιρας.

Το SF<sub>6</sub> όμως είναι ανθρωπογενές αέριο των τελευταίων δεκαετιών, οι συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα δεν είναι αρκετή για να δημιουργήσει κορυφή στο φάσμα εκπομπής της ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας .Απ' το κενό που παρατηρείται μεταξύ του μήκους κύματος λ=8μ και λ=13μ γνωστό και σαν "ατμοσφαιρικό παράθυρο" διαφεύγει το 15-30% της ακτινοβολίας ενώ η υπόλοιπη παραμένει στην γήινη ατμόσφαιρα.

### 6.5 Συμπεράσματα

Η καλύτερη απάντηση στις ανησυχίες για την αύξηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου, θα ήταν να αποτραπεί η απελευθέρωσή του SF<sub>6</sub> στην ατμόσφαιρα. Είναι όμως προς το παρόν δύσκολο να προβλεφτεί η βραχυπρόθεσμη εξέλιξή του λαμβάνοντας υπόψη την αποδεδειγμένη βιομηχανική και κοινωνική του αξία. Αέρια διηλεκτρικά υποκατάστατα του SF<sub>6</sub> είναι δύσκολο να βρεθούν, λόγω των πολλών βασικών και πρακτικών απαιτήσεων που ένα τέτοιο αέριο πρέπει να ικανοποιήσει. Η απόδοση του SF<sub>6</sub> σε απαιτήσεις υψηλής πίεσης, η μη τοξικότητα, η μη ευφλεκτότητα, η διαθεσιμότητα, το κόστος, η απόδοσή του κάτω από διαφορετικές τάσεις δοκιμής, η σταθερότητα σε παρατεταμένη καταπόνηση, η διακοπή του ηλεκτρικού τόξου, ο περιορισμός του φαινομένου κορώνας είναι μερικά από τα ζητούμενα που πρέπει να απαντηθούν σε ένα νέο αέριο. Τα προβλήματα που προκύπτουν σχετικά με το SF<sub>6</sub> δεν είναι όμως χωρίς λύση, μπορούν να οδηγήσουν σε νέες ευκαιρίες και προσπάθειες για ανάπτυξη εναλλακτικών αερίων μονωτών και εναλλακτικών τεχνολογιών υψηλής τάσης.

### Βιβλιογραφία:

- [1] Μονωτικά Υλικά Υψηλών Τάσεων, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2005.
- [2] Εισαγωγή στα Ημιαγώγιμα Υλικά και Φωτοβολταϊκές Διατάξεις, Κ. Θ. Δέρβος, Αθήνα 2010
- [2] Η Χημική Ένωση του Μήνα, Σεπτέμβριος 2007
- [3] Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry . by L. G. Christophorou, J. K. Olthff, and R. J. Van Brunt Nist, (NIST)