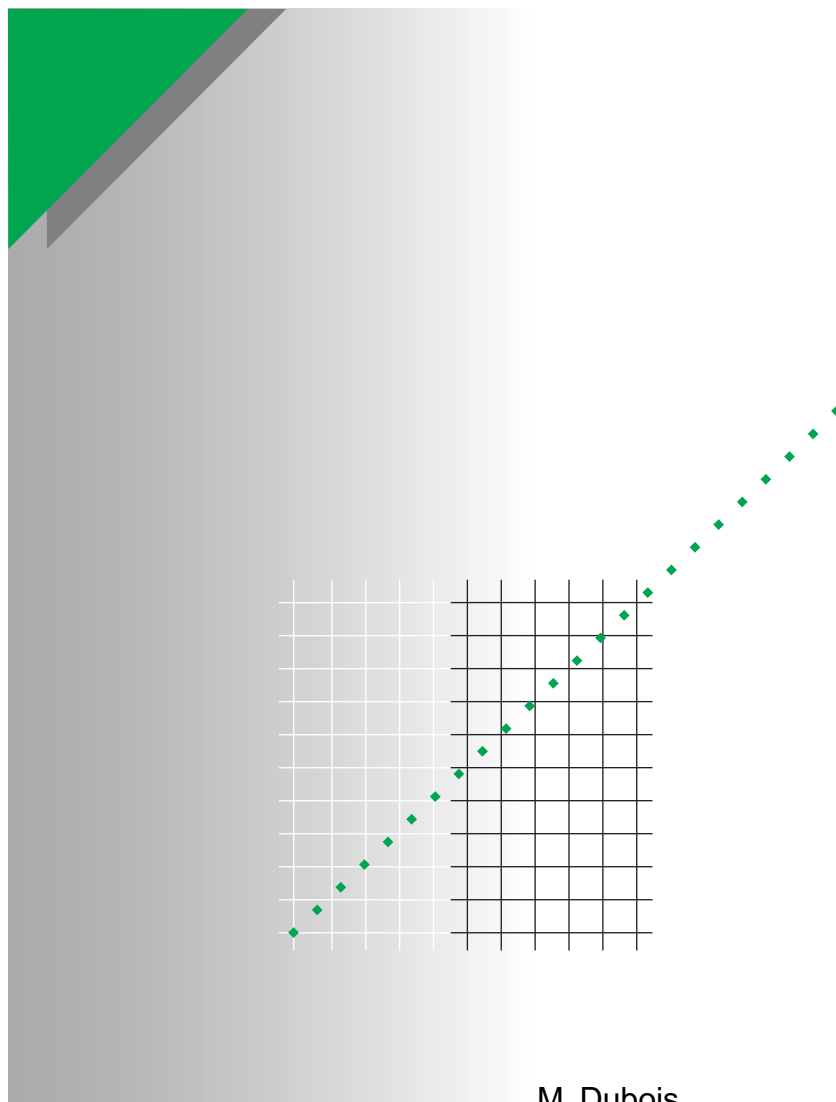


Cuaderno Técnico nº 078

SF₆, el gas dieléctrico



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.**, o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» del **Grupo Schneider**.

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria: «Reproducción del Cuaderno Técnico nº 078 de Schneider Electric».



cuaderno técnico nº 78

SF₆, el gas dieléctrico

Por M. Dubois

Trad.: José M^a Giró

Edición francesa: mayo 1976

Versión española: marzo 1997

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

El SF₆, el gas dieléctrico

Índice

Introducción		p. 5
1 La rigidez dieléctrica		p. 5
2 El canal conductor en el gas	2.1 Los choques elásticos entre partículas en el SF ₆	p. 6
	2.2 Los choques no-elásticos entre partículas	p. 6
3 Capacidad del SF₆, sin estar ionizado, para parar y fijar los electrones		p. 7
	3.1 Las vibraciones moleculares	p. 7
	3.2 Los cambios de estado moleculares	p. 9
	3.3 La fijación de electrones	p. 10
4 Los fenómenos de avalancha electrónica y de descarga eléctrica en el SF₆		p. 12
	4.1 La avalancha electrónica	p. 12
	4.2 La descarga en forma arborescente	p. 13
Conclusión		p. 15
Bibliografía		p. 15

¿Qué fenómenos preceden a la descarga en el gas SF₆?

Su estructura molecular le confiere a este gas una buena aptitud para frenar y estabilizar, aún sin estar ionizado, los electrones libres.

En los aparatos industriales, las avalanchas electrónicas provocan, en general, descargas en arborescencia dentro del SF₆ a presión atmosférica, para campos eléctricos de 9 kV/mm.

Introducción

La utilización del SF₆ ha permitido reducir notablemente el peso y las dimensiones de los aparatos eléctricos. Hoy en día, la literatura técnica cuenta con numerosos datos precisos en este campo. Esta reducción se debe en parte a las buenas cualidades como aislante eléctrico del gas SF₆ que se consiguen incluso cuando se utiliza a muy bajas presiones, del orden de tan sólo algunos bares.

¿Cómo se explica esta propiedad del gas SF₆?

El lector encontrará aquí una respuesta basada, en parte, en la experiencia adquirida en Merlin Gerin en el curso de los estudios sobre aparatos aislados con SF₆.

Después de haber situado los criterios sobre las características dieléctricas de este gas, nos preguntaremos sobre los fenómenos físicos que llevan a la perforación de los gases por una chispa eléctrica. Como veremos, la descarga se desarrolla por la multiplicación de los electrones libres que normalmente hay en la materia.

Por eso examinaremos, ante todo, los mecanismos de frenado y de fijación de los electrones libres mediante el SF₆, considerándolo a una escala particular, para comprender su comportamiento cuando se le somete a una tensión eléctrica.

Por último, recordaremos las dos magnitudes macroscópicas que permiten, conociendo la geometría de un aparato y la presión de SF₆ que lo aísla, calcular las tensiones límite de utilización de dicho aparato.

1 La rigidez dieléctrica

Para verificar el buen comportamiento del aislamiento de los aparatos se les somete a ensayos dieléctricos. En las normas se especifica el proceso y los valores de tensión para cada tipo de material. Una serie de ensayos de funcionamiento acaba normalmente con una descarga. La descarga es el paso brusco del aislamiento del aparato del estado no-conductor al estado conductor.

Cuando esta descarga se produce, en el seno del SF₆ se establece un canal muy luminoso entre los conductores aislados. Este fenómeno se acompaña de un sonido seco mientras la corriente

circula por dicho canal entre los dos conductores.

Un aislante gaseoso será tanto mejor cuanto mayor sea el valor de tensión a la que se produce la descarga para un aparato determinado.

Si el ensayo se hace con la ayuda de un espinterómetro -dos esferas conductoras e idénticas un poco separadas- se podrán notar, a una presión determinada, las tensiones límite de rigidez dieléctrica de los diferentes gases. Al clasificarlos por tensión creciente quedarán también ordenados por rigidez dieléctrica creciente.

Lo normal es referirse al aire a presión atmosférica. Con este criterio el SF₆ tendría una clasificación media como dieléctrico.

Si se toma el 1 como la rigidez dieléctrica del aire, es decir, su tensión límite de rigidez dieléctrica medida con el espinterómetro, la del SF₆ vale 2,5, quedando lejos, detrás de él, el cianógeno, que vale 6. Sin embargo actualmente se prefiere el SF₆ respecto a otros gases de rigidez dieléctrica superior, por otras varias ventajas, entre las que destacan:

- el no ser tóxico,
- el alto grado de su tasa de recombinación, después de disociarse bajo el efecto de descargas elevadas,
- su baja temperatura de licuefacción, que permite el funcionamiento de los aparatos a pleno rendimiento en los climas más fríos.

2 El canal conductor en el gas

2.1 Los choques elásticos entre partículas en el SF₆

La molécula de SF₆, si no está cargada eléctricamente, es poco sensible al establecimiento de un campo eléctrico.

Sin embargo, la radioactividad terrestre y los rayos cósmicos producen constantemente iones como el F⁻, SF₅⁺, SF₆⁺, ... y electrones libres que se recombinan entre ellos constante y espontáneamente. Esto lleva a la existencia, en estado normal, de una cantidad de iones y electrones libres en el SF₆ muy inferior a la que se encuentra en el canal de descarga.

Por tanto, además de la conducción simple de iones y electrones libres que habitualmente se encuentran en el SF₆, ¿hay otros fenómenos que entren en juego en la producción de la descarga? ¿cuáles son?

En un medio como el SF₆ a temperatura ambiente, las partículas (moléculas, iones, electrones) están permanentemente en movimiento de traslación. Chocan entre ellos y su dirección cambia a cada choque.

Este es el movimiento Browniano.

Para fijar las ideas, a 20°C y a la presión atmosférica, la velocidad media de traslación de una molécula de SF₆ es de 225 m/s y sufre un choque cada $0,25 \cdot 10^{-9}$ segundos aproximadamente, o sea cada 560 anstroms (Å). (1Å = 10^{-10} m).

La presencia de un campo eléctrico hace variar la energía cinética de los iones y de los electrones libres en todos sus desplazamientos.

Los electrones y los iones (+) y (-) quedan sometidos a una fuerza eléctrica media de la misma intensidad: $e \cdot E$ (E = campo eléctrico; e = carga del electrón).

Los iones, puesto que son mucho más grandes que los electrones, recorren, como media, una distancia

más pequeña que éstos, entre dos choques consecutivos elásticos contra dos moléculas de SF₆.

Además, como los iones tienen una masa comparable a la de las moléculas, en cada impacto ceden a la molécula de SF₆ con la que chocan, una buena parte de la energía cinética adquirida bajo el efecto del campo eléctrico.

El azar de los choques ocasiona a veces el desplazamiento en sentido contrario de la aceleración que le imprime el campo; por tanto ciertos choques tienen lugar después de la desaceleración debida al campo eléctrico. Así, como media, es la totalidad de la energía cinética excedente la que transfieren a las moléculas gaseosas que les rodean.

La medida de su movilidad muestra, en efecto, que los iones están, como media, en equilibrio térmico con el SF₆, es decir, que su energía cinética no es sensiblemente diferente a la de las moléculas neutras.

Los electrones, cuya masa es unas 300 000 veces más pequeña que las moléculas de SF₆, están en una situación muy diferente.

Las aceleraciones que sufren entre dos choques son de 40 000 a 300 000 veces más fuertes que las causadas a los iones. Además, como su masa es muy pequeña respecto a la de las moléculas de SF₆, no pierden más que una parte muy pequeña de su energía cinética en cada choque elástico contra el SF₆. La pérdida máxima se alcanza en el caso de un choque frontal cuando el electrón se mueve a la velocidad más baja, es decir, cuando está en equilibrio térmico con respecto al SF₆ envolvente.

Desciende entonces hasta

$$4 \sqrt{\frac{me}{M_{SF_6}}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ de su energía}$$

cinética, siendo:

m_e = masa del electrón,
 M_{SF_6} = masa de la molécula de SF₆.

Entonces, algunos, cuando sufren una serie de colisiones elásticas favorables que les predisponen a desplazamientos notables en el sentido de la aceleración que imprime el campo (algunas micras a lo largo de las líneas de campo bajo una presión del SF₆ de 4 bares absolutos), pueden adquirir la energía suficiente para romper las moléculas de SF₆ en iones (+) y iones (-) o en electrones libres.

Sin embargo, antes de que alcancen tales energías cinéticas (15 ó 16 eV), el SF₆ es capaz de bloquearlos de varias maneras.

2.2 Los choques no-elásticos entre partículas

Los alemanes Franck y Hertz en 1913, y después Frank y Einspörn en 1920, al comunicar a los electrones velocidades controladas, demostraron que en ciertos choques contra moléculas gaseosas, los electrones en movimiento pueden perder toda su energía cinética. En este caso, la energía del electrón incidente queda absorbida por la molécula contra la que choca. Este fenómeno no se produce más que para energías cinéticas perfectamente determinadas, que caracterizan el gas escogido.

De una forma general, la energía perdida por los electrones en este tipo de choques sirve para calentar la muestra gaseosa. Puede convertirse, parcial o totalmente, en energía luminosa radiante, siendo esto mismo característico del gas utilizado.

En tales choques, la energía cinética total de dos partículas se reduce; las fuerzas «de contacto» producen un trabajo resistente. Éstos son los choques no elásticos. Su predisposición a ellos, como veremos, es especialmente importante para la excelente rigidez dieléctrica del gas SF₆.

3 Capacidad del SF₆, sin estar ionizado, para frenar y fijar los electrones

3.1 Vibraciones moleculares

En su estado normal —estado fundamental— la molécula de SF₆ tiene la forma de un octaedro.

(Figura 1).

Las posiciones medias de los núcleos de los seis átomos de flúor se encuentran a una distancia del orden de 1,56 Å del de azufre; los seis enlaces azufre-flúor están situados en los ejes rectangulares pasando por el núcleo de azufre.

Esquemáticamente, se puede representar el mecanismo de unión de la forma siguiente:

Antes del establecimiento de la unión, un átomo de azufre y un átomo de flúor se aproximan si alguno de los electrones (cargas negativas) de cada uno de los átomos se muestran sensibles a la presencia del núcleo (carga positiva) del otro átomo.

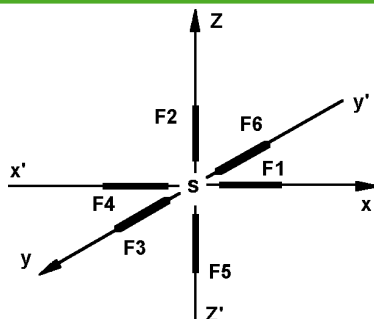
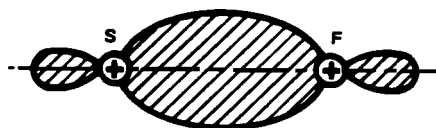


Fig. 1: Representación esquemática de una molécula de SF₆.

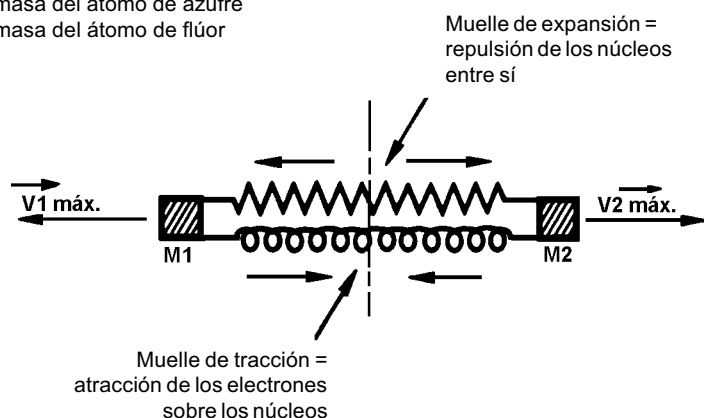


"+" representa los núcleos de los átomos de azufre y de flúor acompañados de su cortejo de electrones, disminuido por los electrones de enlace. Es en el área sombreada alrededor del eje S-F donde se sitúan, muy probablemente, los electrones de valencia o de enlace.

Fig. 2: Orbital que representa lo que podría ser la unión azufre-flúor en el espacio.

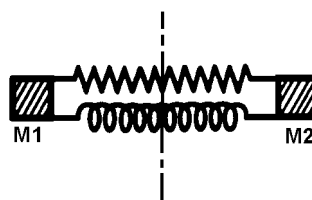
En este movimiento la energía total del sistema es constante

M₁ = masa del átomo de azufre
M₂ = masa del átomo de flúor



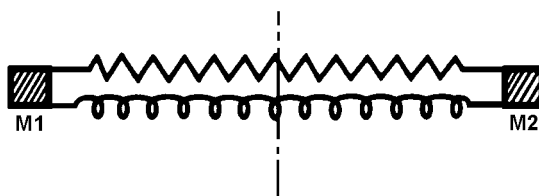
a: separación normal de las 2 masas: las velocidades son máximas.

El esfuerzo del muelle de tracción (efecto de los electrodos de unión sobre los núcleos) es igual al esfuerzo del muelle de expansión (repulsión internuclear).
La energía del movimiento vibratorio es estrictamente cinética.



b: separación mínima de las 2 masas: las velocidades son nulas.

El esfuerzo del resorte de tracción es mínimo.
El esfuerzo del resorte de expansión es máximo.
La energía del movimiento vibratorio, estrictamente potencial, es igual a la energía del muelle de compresión, menos la energía del muelle de tracción.



c: separación máxima de 2 masas: las velocidades son nulas.

El esfuerzo del muelle de tracción es máximo.
La energía del movimiento vibratorio, estrictamente potencial, es igual a la energía del muelle de tracción menos la energía del muelle de compresión.

Fig. 3: representación de un sistema mecánico de vibración.

Uno se puede figurar en el espacio un volumen en el que se tiene, por ejemplo, el 95 % de posibilidades de encontrar estos electrones. Se tienen entonces las circunstancias favorables en el espacio de un orbital molecular que une el azufre al flúor. (Figura 2).

El conjunto tiene, grosso modo, simetría de rotación respecto al eje que une los núcleos del F y del S. La masa mecánica de los átomos está concentrada en los núcleos. Inicialmente y a medida que se van acercando, la velocidad relativa de los dos átomos se reduce poco a poco, por el efecto de la repulsión de los núcleos entre sí. Después, esta velocidad se invierte, justo a la distancia en la que la energía

potencial eléctrica entre núcleos, teniendo en cuenta la presencia de electrones, es igual a la energía cinética del movimiento relativo inicial. Entonces los núcleos se separan, la distancia aumenta, el efecto de atracción de los electrones de enlace sobre los núcleos supera a la repulsión internuclear y la velocidad relativa de separación de los átomos se reduce.

Si no ha habido absorción de una parte de la energía cinética por un tercer cuerpo (átomo ligado al azufre o al flúor por ejemplo), al ser reversible el trabajo de las fuerzas electrostáticas en juego, los núcleos se separarían infinitamente el uno del otro, como antes de encontrarse, y, por tanto, la reacción de formación del enlace azufre-flúor no se produciría. Si esta condición de absorción se cumple, la velocidad relativa de separación llega a anularse, los electrodos de unión acercan los núcleos y el ciclo vuelve a empezar. Se está en presencia de un sistema mecánico de vibración que puede representarse como en la figura 3.

Un conjunto tal, por modificación de su régimen vibratorio, puede intercambiar energía con el medio exterior.

En el SF_6 , son seis los sistemas vibratorios así constituidos que están

relacionados los unos con los otros interdependientemente. Además, la nube electrónica de un átomo de flúor no es solamente sensible a la presencia del azufre, sino también a los otros átomos de flúor. Los muelles —es verdad que más flojos que los del azufre— unen igualmente los flúor entre sí. (Figura 4).

La vibración del conjunto de la molécula es, de hecho, muy compleja. Un electrón libre incidente, acelerado por el campo eléctrico, podrá, al aproximarse a una molécula de SF_6 :

■ o entrar en colisión con el equivalente de masas M_1 y M_2 y rebotar sobre ellos elásticamente sin ceder más que $1/100\,000$ de su energía cinética debido a la relación de las masas de las partículas afectadas,

■ o bien, comprimir —o estirar— uno de los múltiples resortes que atan las masas entre sí.

Al almacenar la diferencia de energía entre los dos regímenes, la molécula cambia entonces de régimen vibratorio. Una transferencia de energía de este tipo entre el electrón incidente y la molécula sólo se puede producir si la energía cinética del electrón incidente es de valor comparable a la diferencia energética

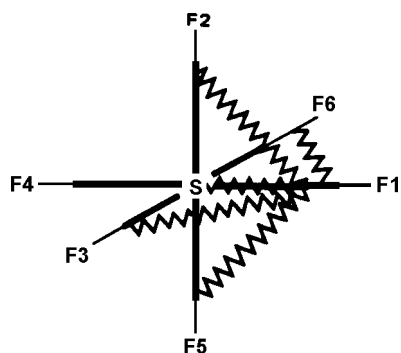


Fig. 4: Esfuerzos que originan la vibración de la unión S-F.

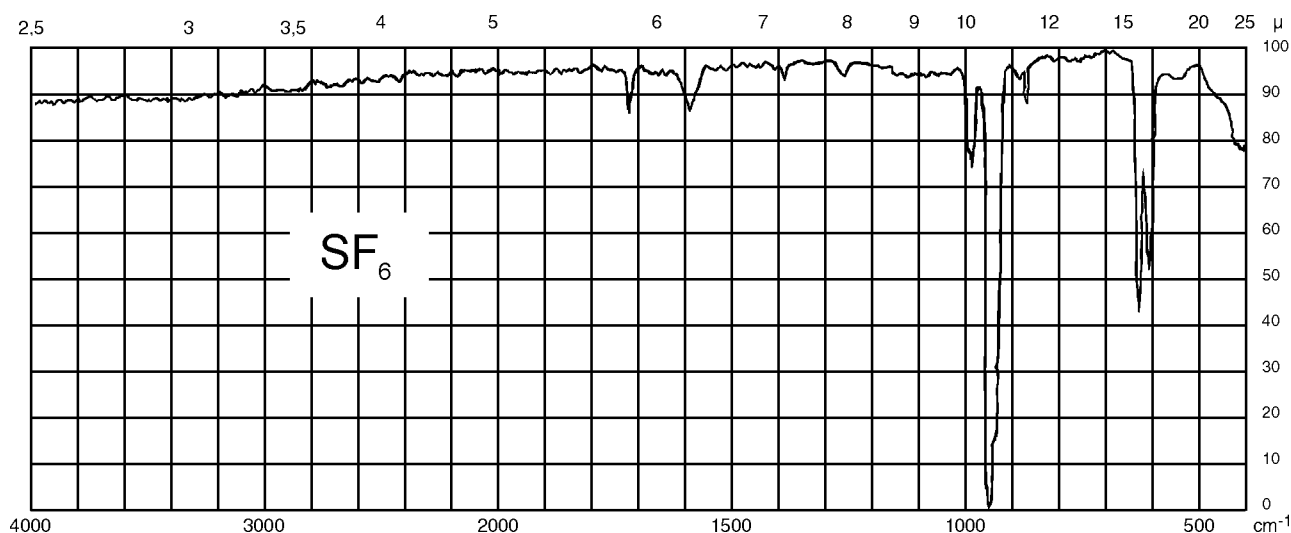


Fig. 5: Se constata que la absorción es muy fuerte para las longitudes de onda del orden de $10.6\,\mu$ (energía equivalente = $0.118\,\text{eV}$). Un electrón que impacta con una molécula de SF_6 con esta energía tendrá muchas más probabilidades de ser parado en el sitio. A un grado menor, esto se producirá también para energías de 0.077 y $0.047\,\text{eV}$ y, en fin, con muy poca probabilidad para las energías de los otros picos.

entre los dos niveles de vibración molecular posibles.

Debido a que la molécula posee múltiples enlaces, el SF_6 es capaz de parar electrones libres con energías muy diversas, al cambiar su estado vibratorio. Esto es lo que expresa el espectro de absorción infrarrojo de las figuras 5 y 6.

3.2 Los cambios de estado moleculares

El SF_6 es incoloro y transparente y no absorbe la luz en el campo visible. Las partículas proyectiles, mediante las energías correspondientes a las energías transportadas por los fotones de la luz visible, no sufrirán por tanto colisiones inelásticas en el SF_6 .

Si un electrón sufre choques favorables que le permiten alcanzar las energías correspondientes a la luz roja visible ($8\,000\text{ Å}$: $1,5\text{ eV}$) no correrá el riesgo de quedar retenido hasta que no haya alcanzado la energía correspondiente a la luz azul ($4\,000\text{ Å}$: 3 eV). En realidad no es hasta antes del dominio del ultravioleta que podría pararse de nuevo en seco en una colisión ($2\,000\text{ Å}$: 6 eV). En efecto, en un choque así, el enlace azufre-flúor puede cambiar de características: el resorte de tracción en la figura 3 se vuelve más flojo o el resorte de compresión más rígido. (Figura 7).

La unión azufre-flúor se vuelve menos elástica.

En la práctica se presentan muchas posibilidades, en algunas de las

cuales puede suceder que un orbital situado principalmente entre el azufre y un flúor se desdoble, con lo que los electrones de enlace tienen entonces una probabilidad importante de encontrarse al exterior del segmento que une los núcleos –enlace σ^* antienlazante– (figura 8).

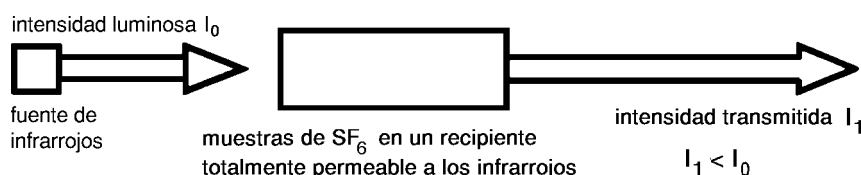
Una transformación así se hace absorbiendo una energía mucho más fuerte de la que sería suficiente para romper el enlace en su estado fundamental (ver nota 1): si la ruptura ocurriera en este estado de excitación ($\text{SF}_6^* \Rightarrow \text{SF}_5^* + \text{F}^*$), los productos de descomposición SF_5^* ó F^* no se encontrarían en su estado fundamental.

La molécula de SF_6 excitada (SF_6^*) ya no tiene simetría octaédrica.

A un estado de excitación de este tipo le corresponde una disminución de la energía electrostática de acoplamiento –núcleo-electrones de enlace– superior a la que se usa en el momento de la unión del azufre y el flúor. Los electrones están menos atados al conjunto de los dos núcleos de lo que estarían si se encontraran cada uno en su posición normal alrededor de cada uno de los dos átomos separados.

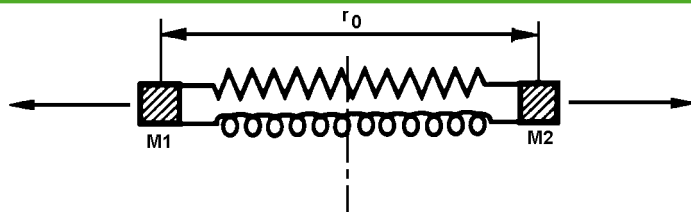
Los cambios de estados moleculares en el SF_6 son mucho más complejos de lo que hemos dicho aquí. Lo único que nos interesa ahora es cuándo se necesitan energías inferiores a la primera energía de ionización productoras de electrones libres. Según Liu, Moe y Duncan, esta primera energía es de 16 eV : $\text{SF}_6 + 16\text{ eV} \Rightarrow \text{SF}_6 + \text{e}$. La posibilidad de absorción de la energía cinética de un electrón para los cambios de estado electrónicos del SF_6 para energías inferiores a 16 eV se manifiesta en la parte de baja energía del espectro de absorción ultravioleta del SF_6 gaseoso descrito hasta ahora (figura 9).

(1) Nota: D_0 = energía de disociación del SF_6 en su estado fundamental $\text{SF}_6 \Rightarrow \text{SF}_5 + \text{F}$
 $D_0 = 3,7\text{ eV}$, según Fehsenfeld.



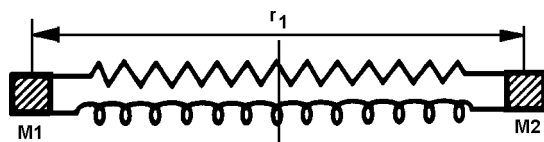
La luz infrarroja calienta la materia que atraviesa aumentando la energía de vibración intramolecular. Para que una materia absorba infrarrojos, hace falta que una o varias uniones moleculares se polaricen eléctricamente. Es el caso del SF_6 .

Fig. 6: Dispositivo experimental de medida de la absorción por infrarrojos.



a: estado fundamental del enlace

El conjunto vibra alrededor de la distancia normal entre el azufre y el flúor ($r_0 = 1,56\text{ Å}$).



b: estado electrónico excitado

El muelle de tracción está más flojo y el conjunto vibra alrededor de la distancia $r_1 > r_0$, entre el azufre y el flúor.

Fig. 7: Cambio de características debido a un choque.

3.3 La fijación de electrones

Cuando un electrón ha perdido su energía cinética, sea en un choque inelástico con el SF_6 , sea gracias a una serie de choques elásticos, se desplaza en el seno del campo eléctrico, siendo frenado por dicho campo hasta la casi anulación total de su energía cinética. ¿Qué le pasa entonces?

Entonces el electrón está rodeado de moléculas de SF_6 que, aunque son

eléctricamente neutras, no dejan de tener influencia eléctrica. Las uniones azufre-flúor no son simétricas respecto al punto M, punto medio del segmento que une las posiciones medianas del azufre y el flúor. (Figura 10).

Las uniones y las cortezas electrónicas de los dos átomos son tales que el flúor aparece cargado negativamente y el azufre positivamente. El conjunto es equivalente a un dipolo eléctrico de momento $\mu_0 = 1,8$ Debye (1 Debye = $1,6 \cdot 10^{-29}$ culombios.metro).

En la dirección de los seis vértices del octaedro que representa la molécula SF_6 , se encuentran las seis cargas negativas. En la dirección del centro, las seis cargas positivas.

Cerca de la molécula, la influencia de la carga (-) de los átomos de flúor se hace sentir en la periferia, principalmente a lo largo de los tres ejes sobre los cuales se encuentran los átomos de flúor. Es sobre las bisectrices de los cuatro cuadrantes, donde la influencia de los flúor cargados negativamente es más débil. En el centro, el azufre aparece cargado (positivamente) seis veces más que cada carga de flúor. (Figura 11).

A lo lejos, a lo largo de un eje en un punto A (figura 12), a una distancia 1 del centro S, la molécula induce un potencial eléctrico ligeramente negativo:

$$v = \frac{6q}{1} - q \left[\frac{1}{1-a_0} + \frac{1}{1+a_0} + \frac{4}{\sqrt{1^2 + a_0^2}} \right]$$

$$v \approx -35 \frac{q}{1} \left(\frac{a_0}{1} \right)^4.$$

Fig. 8: Nuevo orbital posible de un estado excitado. El volumen rayado en el que los electrones de enlace tienen muchas probabilidades de encontrarse, se extiende al exterior del segmento S-F. La fuerza de atracción de los electrones de unión sobre el S y el F es dirigida al interior del segmento SF pero está muy debilitada. La distancia entre S y F aumenta.

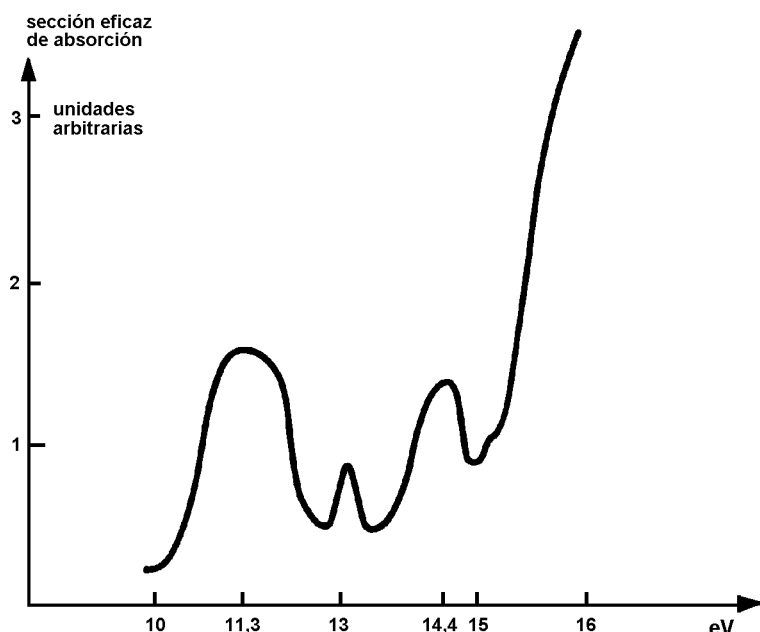


Fig. 9: Los picos de 11,3 y 14,4 eV corresponden a los cambios de estado que se describen en el texto. La gran subida a partir de 15 eV corresponde a la vez a un cambio de estado molecular y a la primera disociación ionizante: $15,5 \text{ eV} + \text{SF}_6 \rightarrow \text{SF}_5^+ + \text{F}^-$, a partir de estos valores de energía, el SF_6 se convierte en muy absorbente.

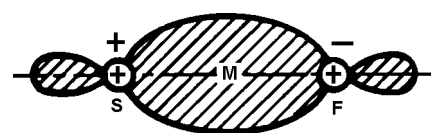


Fig. 10.

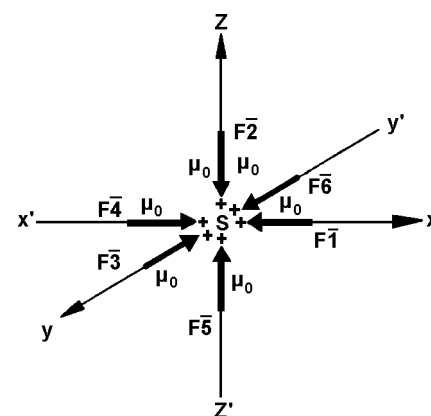


Fig. 11.

En un punto B, también a una distancia 1 del centro S, sobre una bisectriz del cuadrante, se tiene:

$$v = q \left[\frac{6}{1} - \frac{3}{1 - \frac{a_0}{\sqrt{3}}} - \frac{3}{1 + \frac{a_0}{\sqrt{3}}} \right] \cong$$

$$\cong -2 \frac{q}{1} \left(\frac{a_0}{1} \right)^2.$$

Así, a larga distancia, la molécula aparece como envuelta por una zona de potencial negativo más marcada a lo largo de las bisectrices de los cuadrantes que a lo largo de los ejes de simetría de la molécula. (Figura 13).

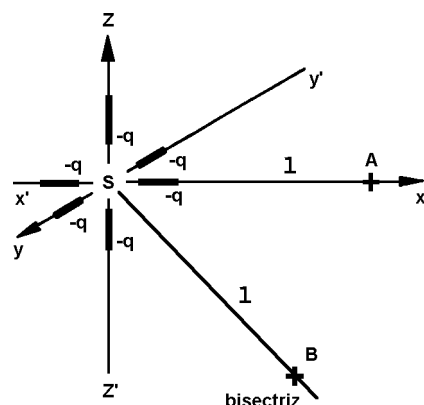
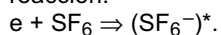
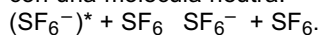


Fig. 12: a_0 = longitud media de unión S-F.

A este aspecto se le añade la influencia del campo eléctrico macroscópico sobre la molécula. Además, un electrón que se aproxime a una molécula de SF_6 , la polarizará por efecto de su propio campo eléctrico. Sin embargo, habrá en medio una ligera barrera de potencial que habrá que franquear para llegar a la zona de potencial elevado del azufre. En esta zona, sin ninguna otra intervención, su energía cinética sería tal que abandonaría la molécula después de pasar cerca del azufre (reversibilidad de fenómeno). Por razones ligadas a las múltiples posibilidades de aceptación de los electrones que caracterizan el compuesto SF_6 , se produce la reacción:



$(\text{SF}_6^-)^*$ es un estado excitado del ión cuya esperanza de vida (ver nota 2) es del orden de 25 μs . El electrón incidente debe tener energías muy débiles, comprendidas entre la energía térmica a temperatura ambiente (40 meV) y 100 meV para que haya una buena probabilidad de reacción. Para las presiones del SF_6 utilizadas en los aparatos industriales, de 1 a 5 bares absolutos, el ión $(\text{SF}_6^-)^*$ tiene todas las posibilidades de estabilizarse frente a una colisión con una molécula neutra:

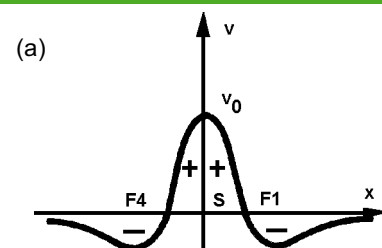


Parece que son así los procesos que fijan los electrones libres al SF_6 . Por tanto, a pesar de la existencia de un campo eléctrico, el ión SF_6^- no adquirirá apenas una energía cinética

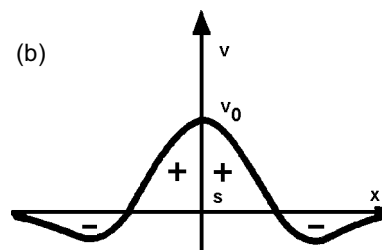
de traslación superior a la debida a la agitación térmica propia de su gran masa.

Sin embargo, para valores suficientemente elevados de campo eléctrico, los electrones libres pueden alcanzar, después de una serie de choques elásticos favorables, energías cinéticas del orden de 16 eV.

¿Qué pasa entonces?



A lo largo de un eje.



A lo largo de una bisectriz de cuadrante. Los mínimos negativos están atenuados y distanciados del centro de la molécula.

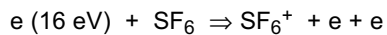
Fig. 13: Tendencia de la curva de potencial eléctrico medio en la molécula y en su entorno.

Nota 2: El ión $(\text{SF}_6^-)^*$ es inestable. Se descompone espontáneamente en $\text{SF}_6^- + e$. El tiempo de vida del ión $(\text{SF}_6^-)^*$ queda establecido cuando en el medio considerado quedan $n/2,72$ iones, siendo n el número de iones $(\text{SF}_6^-)^*$ de partida.

4 Los fenómenos de avalancha electrónica y de descarga eléctrica en el SF₆

4.1 La avalancha electrónica

A 16 eV, un electrón que entra en colisión con una molécula de SF₆, puede provocar la ionización:



El electrón incidente ha perdido casi la totalidad de su energía. El electrón producido es igualmente poco energético. Para adquirir los 16 eV bajo la influencia del campo eléctrico, el primer electrón no ha de recorrer en el sentido de la aceleración del campo más que una distancia que se cifra en micrones.

En nuestros aparatos, puesto que los radios de los electrodos están a una distancia de algunos centímetros hasta algunos decímetros, el campo macroscópico no varía sensiblemente con distancias del orden de micrones. Los 2 electrones nacidos de la reacción citada se encuentran en las mismas condiciones que el electrón iniciador de la reacción en su punto de partida. Tienen una cierta probabilidad de provocar a lo largo del recorrido otras reacciones de este tipo. Los otros electrones que pudieran haber nacido estarían en las mismas condiciones...

Hay una reacción en cadena donde los electrones se multiplican exponencialmente.

Se trata de una avalancha electrónica.

Estadísticamente, un electrón recorriendo la distancia dx produce

otros $\bar{\alpha}$ ($\bar{\alpha}$: coeficiente de ionización efectiva).

Si n es el número de electrones que se han producido a la distancia x del punto de partida del electrón iniciador, entonces:

$$dn = \bar{\alpha} n dx$$

$$y n = e^{\bar{\alpha} x},$$

siendo $\bar{\alpha}$ una función del campo eléctrico macroscópico y de la presión del SF₆. Medidas efectuadas para presiones de hasta los 400 torr, muestran que $\bar{\alpha}/P$ será lineal en función de E/P .

$$\bar{\alpha}/P = 0,0277 E/P - 3,26$$

con:

P en torr,
 E en V/cm,
 $\bar{\alpha}$ en cm^{-1} .

La extrapolación de esta relación a la presión atmosférica en el campo uniforme, parece que lleva a una aproximación admisible.

Si $E = 9\text{ kV/mm}$, $\bar{\alpha} = 15,4\text{ cm}^{-1}$.

Con una profundidad de 1 mm: un electrón produce otros $e^{1,54} - 1 = 3,6$.

Los electrones prácticamente no se multiplican.

Si $E = 9,5\text{ kV/mm}$, $\bar{\alpha} = 154\text{ cm}^{-1}$: un electrón produce otros $4,8 \cdot 10^6$.

Si $E = 10\text{ kV/mm}$, $\bar{\alpha} = 292\text{ cm}^{-1}$: un electrón producirá otros $5 \cdot 10^{12}$.

En la práctica uno no se encuentra tales cargas en una avalancha. No se podrá establecer por tanto un campo eléctrico así en el seno del SF₆ a presión atmosférica.

¿Cómo se desarrollan los fenómenos en el espacio?

Imaginémonos que se desencadena una avalancha en un aparato en un ensayo a 50 Hz mientras que la polaridad de la tensión es negativa.

Las partes activas se cubren de cargas (-) de densidad variable a lo largo de la superficie, dependiendo de la geometría del aparato y de la tensión de ensayo. De la misma forma, el recinto metálico de la masa se cubre de cargas (+) por oposición a las cargas (-) de las partes activas.

Se establece un campo eléctrico en el seno del SF₆ contenido en el aparato a presión atmosférica, por ejemplo.

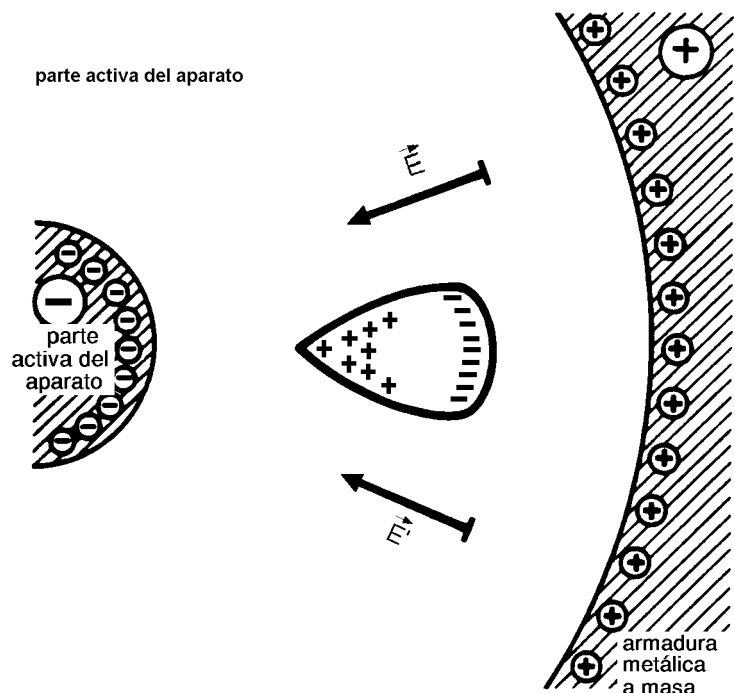


Fig. 14.

Así es macroscópicamente en A, con un campo de unos 9,5 kV/mm, y cerca de las partes activas. Los electrones producidos, acelerados por el campo, avanzan muy rápidamente hacia el electrodo (+).

Sometidos al efecto de repulsión entre ellos, se desplazan a lo largo de un frente de forma análoga a la tela de un paracaídas, lo que aumentará el diámetro conforme avanza hacia el ánodo.

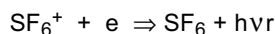
Durante este tiempo, los iones (+), unas 300 000 veces más pesados y sometidos a una fuerza de intensidad comparable a la que se aplica a los electrones, no tienen prácticamente nada que hacer. En A, con los primeros iones (+) formados, constituye un punto positivo. El conjunto tiene el aspecto de un paracaídas en el que la zona de la tela será (-) y el lado del paracaidista será (+). (Figuras 14 y 15).

4.2 La descarga en forma arborescente en el SF₆

En la práctica, todo pasa como si la multiplicación de los electrones antes de la formación del canal conductor ionizado entre los electrodos fuera más rápido que la simple multiplicación exponencial.

Hay otros fenómenos además de los descritos. ¿Cuáles son?

En la avalancha inicial, hay iones (+), iones (-) y muchos electrones. Ciertos pares de iones (+) y electrones se recombinan, originando una radiación ultravioleta que transporta alrededor de 16 eV por fotón.

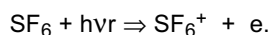


$h\nu \approx 16 \text{ eV}$:

h = constante de Plank,

ν = frecuencia de radiación a 16 eV.

La avalancha dispersa estos fotones en todas direcciones. En el gas envolvente, esta radiación es absorbida por el SF₆ para originar otros pares SF₆⁺ y electrones en la parte de fuera de la avalancha.



Si la avalancha se produce cerca del cátodo, esta radiación puede arrancar electrones por efecto fotoeléctrico.

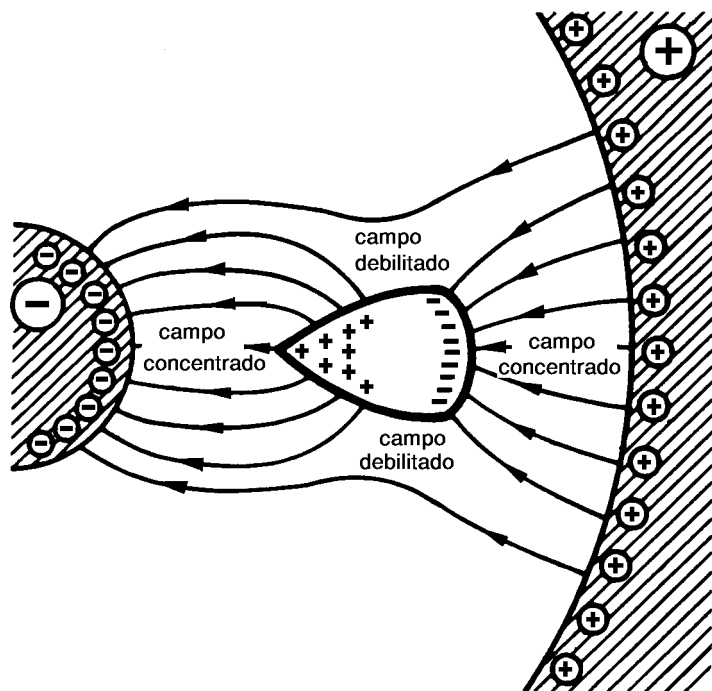
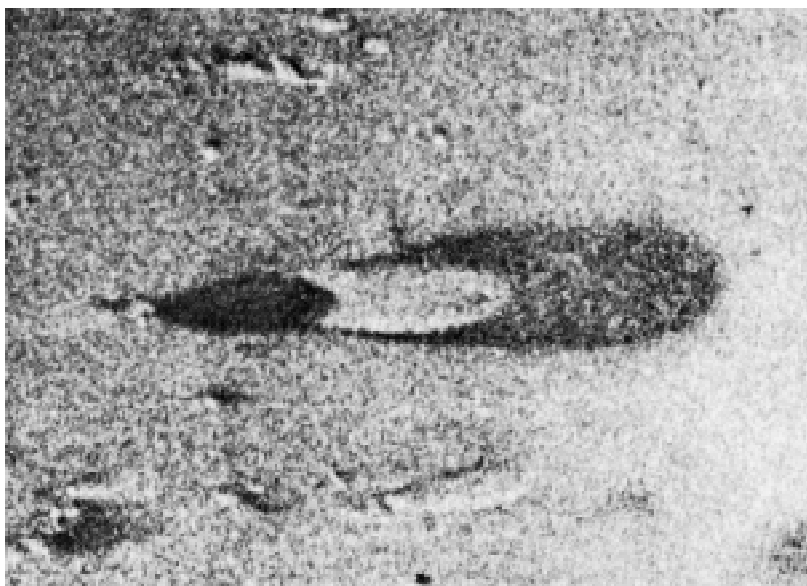
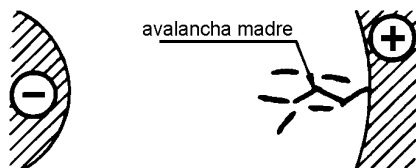


Fig. 16: Aspecto de las líneas de campo en presencia de una avalancha electrónica.



Se puede ver aquí la traza de descargas parciales sucesivas habiéndose hecho sobre un aislador soporte en un lugar blindado, realizadas por el método de polvos de H. Bertein. Sometido a los mismos efectos conjuntos del campo macroscópico y de la carga del espacio, las cargas eléctricas, que provienen de la disociación del gas, han evolucionado de la misma forma que los electrones en una avalancha. Se han depositado sobre el aislador como la copa axial de una avalancha electrónica que, en el espacio, tiene una simetría de revolución.

Fig. 15: Aspecto de una avalancha electrónica.



a: Las primeras avalanchas hijas, que alcanzan la parte (+) de otras avalanchas secundarias, están unidas a la avalancha madre y tienen las mismas posibilidades de conducir las chispas que van apareciendo.



b:



c: Antes o después aparecen en el gas otras avalanchas hijas, mientras el canal ionizado conectado al ánodo progresa.



d: El canal ionizado está unido al cátodo. Las ramas que no alcanzan el otro electrodo, pero que están en contacto con el tronco de conexión, pierden cargas en los electrodos a través del tronco principal. El tronco y las ramas que están conectadas se vuelven muy luminosos. Las series de avalanchas no conectadas al tronco se desvanecen lentamente sin fenómenos luminosos importantes.

Fig. 17.

El bombardeo del cátodo por los iones (+) formados en la avalancha conduce, sobre el metal, a la recombinación $SF_6^+ e \Rightarrow SF_6 + h\nu$, que tiene los mismos efectos que la radiación anterior.

El resultado de todo esto es la aparición en el exterior de la avalancha de electrones que, situados en condiciones semejantes a los del electrón provocador del principio, podrán conducir a la creación de nuevas avalanchas electrónicas.

Entre los dos electrodos, la avalancha inicial se comporta un poco como un elemento conductor cargado por influencia del campo eléctrico, absorbiendo de él las líneas de campo o de fuerza. Así el campo queda reforzado en sus extremidades y reducido en sus flancos laterales. (Figura 16).

Es pues sobre todo alrededor del eje de la primera avalancha que los electrones producidos por efecto de la foto-ionización podrán dar origen a otras avalanchas que tendrán buenas posibilidades de evolucionar como la primera. Los electrones aparecidos a los lados de la avalancha inicial tendrán más bien la tendencia a originar avalanchas que fracasarán, al ser en ese punto el campo más débil.

Se produce así la propagación de la chispa de descarga mediante la cadena de avalanchas.

En el SF_6 , como en el aire, la propagación es más fácil en el electrodo (+) que en el electrodo (-) probablemente a causa del efecto de punta de la avalancha en la zona positiva.

El desarrollo típico de la secuencia de descarga puede ser el de la figura 17.

De una manera general, estos fenómenos empiezan a partir de zonas de máximo gradiente de potencial que pueden ser independientemente el cátodo o el ánodo en los aparatos industriales donde el campo eléctrico es poco variable y donde las distancias entre los electrodos no son muy grandes. El sentido de propagación de la chispa lo da el de las arborescencias, desde el tronco común hacia las ramas. (Figura 18).

De media, un electrón que se encuentra en la avalancha madre tiene γ posibilidades de producir un electrón iniciador de una nueva avalancha. La condición de descarga, cerca de una línea de campo cuyo origen esté en el electrodo de rayo débil, siendo d la distancia entre electrodos, será:

$$\int_0^d \alpha dx$$

$$\gamma e > 1$$

(γ = coeficiente de emisión de electrones por efectos secundarios).

Para que haya posibilidad de chispa hace falta que estas condiciones sean favorables. Lo que no quiere decir que la descarga se vaya a producir necesariamente si se cumplen estos requisitos.

Para el SF_6 , γ es del orden de 10^{-8} . Hace falta que haya unos 100 millones de electrones en una avalancha para que, estadísticamente, se produzca un electrón por los mecanismos secundarios al exterior de la avalancha.

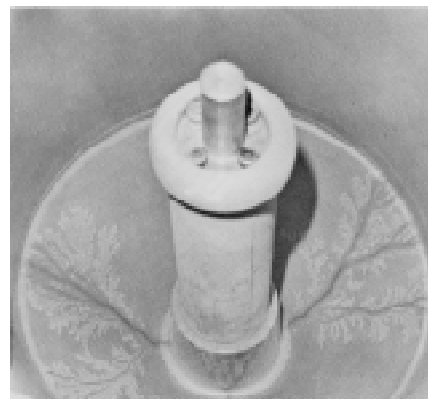


Fig. 18: Esta fotografía muestra la traza de dos descargas en el SF_6 a lo largo de un soporte aislante cubierto de productos pulverulentos. Las ramificaciones son visibles en dirección del electrodo de masa externa. Es en la zona del electrodo interno, al pie de las ramificaciones donde hay que intervenir si se quieren mejorar las características del aparato en estas condiciones.

Conclusión

Para explicar la buena rigidez dieléctrica del SF₆ gaseoso, se han examinado las características del SF₆ mediante los procesos físicos de la conducción de la chispa de descarga.

Sus múltiples posibilidades de parar los electrones energéticos, junto a su facultad de fijarlos a baja energía en forma de iones pesados retardan la aparición de la cadena de avalanchas electrónicas que forman la descarga.

Hoy por hoy, parece que son éstas las propiedades del SF₆ que le confieren su gran rigidez dieléctrica.

Bibliografía

Maury, Pariselle, Vigreux: *Cigre*. 23-06-1970.

J.-C. Pebay Peyroula et B. Cagnac: *Physique atomique*. Dunod, Paris, 71, p. 29.

Banwell *Fundamentals of molecular Spectroscopy*. Mac Graw Hill.

Liu, Moe, Duncan: *The absorption Spectrum of Sulfur hexafluoride in the vacuum ultra violet region*. Journal of Chemical Physics, vol. 19, 1951, p. 71.

Gianturco, Guidotti, Lamanna: *Electronic properties of sulfur hexafluoride. Molecular orbital interpretation of X ray absorption spectra*. Journal of Chemical Physics, vol. 57-1972, tabla 4, p. 844.

Fehsenfeld: *Electron attachment to SF₆*. Journal of Chemical Physics, vol. 53, sept. 70, p. 2000.

Herzberg: *Electronic spectra and electronic structure of polyatomic molecules*. Vol. III: *The Jahn Teller Theorem*. p. 40. Van Norstrand, New York 1966.

Blechs Schmidt, Haensel, Koch, Nielson, Sagawa: *The optical Spectra of gaseous and solid SF₆ in the extreme ultraviolet and soft X*. Chemical Physics Letters. Vol. 14, 1972, p. 34.

Thakur: *Force constant of SF₆ from isotopic substitution*. Journal of Molecular structure. Vol. 7, 1971, p. 315.

Stockdaje, Compton, Sweinler: *Negative ion formation in selected hexafluorides molecules*. Journal of Chemical Physics 1970, vol. 53, p. 1505.

Christophorou, Mc Corkle, Carter: *Cross sections for electron attachment resonance Peaking at subthermal energies*. Journal of Chemical Physics, vol. 54, 1971, p. 253.

Boyd, Crichton: *Measurement of ionisation and attachment coefficients in SF₆*. Proceeding IEE, vol. 118, 1971, p. 1872.

Bortnik, Cooke: *Electrical Breakdown and the Similarity law in SF₆ at extra high voltages*. Paper number T-72-116-7. IEEE Winter Meeting 1972.