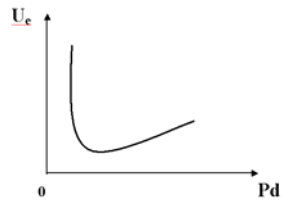


donde N_0 es el número máximo de pares de iones monovalentes que se forman en el volumen del gas en la unidad de tiempo con una intensidad de ionización dada. La dependencia lineal entre I_s y N_0 confirman la naturaleza iónica de la conductividad de los gases.

3°. Se da el nombre de *descarga en gas automantenida* a la descarga eléctrica que continúa en el gas después de cesar la acción del agente ionizador externo. Para que exista esta descarga es necesario que en el gas tenga lugar la formación continua de nuevos pares de partículas cargadas, de signos contrarios.

Fig.III.9.3



La principal fuente de éstas partículas es la ionización por choque del gas (III.9.4.5°). Con una tensión suficiente entre los electrodos, los electrones en el volumen del gas son tan fuertemente acelerados por el campo eléctrico, que su energía resulta ser suficiente para ionizar las moléculas del gas (III.9.4.5°) (*ionización volumétrica*). Los electrones secundarios, acelerándose en el campo eléctrico, también ionizan las moléculas del gas.

Como resultado, aumenta mucho el número de portadores de corriente en el gas y su conductividad (4ª parte de la curva de la fig. III.9.2). Pero la ionización por la acción de los electrones es insuficiente para que se efectúe la descarga automantenida.

Los electrones que se mueven en sentido del cátodo al ánodo ionizan las moléculas del gas que están más cerca del ánodo que el punto en que surgen los electrones. Si la energía de los iones positivos no basta para la ionización por choque de las moléculas del gas o para arrancar electrones del cátodo mecánico (*ionización superficial*), los electrones sólo pueden surgir cerca del cátodo del tubo de descarga por la acción de agentes ionizadores externos. Cuando dicha acción cesa disminuye la región en que se produce la ionización por choque, la cual se va apretando hacia el ánodo a medida que los electrones se mueven hacia él. El cese de la ionización por choque en estas condiciones hace que se interrumpa la descarga en el gas.

4°. La ionización superficial (p.3°) que se produce cuando la tensión U es grande, genera electrones secundarios y engendra un alud bilateral de electrones e iones positivos. En este caso la acción del agente ionizador externo no tiene importancia para la continuación de la descarga en el gas. Aumentando la tensión U entre los electrodos de los tubos de descarga se puede efectuar la *descarga eléctrica disruptiva* en el gas, es decir, el paso de la descarga no automantenida a la automantenida. Se llama *tensión de encendido (tensión disruptiva)* la tensión $U = U_e$ correspondiente a la ruptura eléctrica. Para la descarga en un tubo con electrodos planos, paralelos entre sí, situados a la distancia d uno de otro, la tensión disruptiva depende del producto pd , en el que p es la presión del gas (fig.III.9.3). Además, U_e depende de la naturaleza química del gas y del material de cátodo.

Las descargas en un gas *luminiscente, por efecto de corona, por chispas y en arco*, son variedades de descargas automantenidas en gases las cuales se omiten en este manual.

§ III.9.6. Algunos conocimientos sobre el plasma

1°. Se denomina *plasma* el estado especial de la sustancia cuya propiedad más importante es que sus partículas están ionizadas en su mayoría y pueden llegar a estarlo en su totalidad. El *grado de ionización* α es la relación entre el número de partículas ionizadas y su cantidad inicial. Por su grado de ionización, el plasma se clasifica en: *débilmente ionizado* (α constituye una fracción de %), *moderadamente ionizado* (α es igual a varios %), y *totalmente ionizado* (α se aproxima al 100%).

El plasma débilmente ionizado existe en la ionosfera, capa conductora de la atmósfera que se extiende a alturas desde 60 hasta 2×10^4 km. sobre la superficie de la Tierra.

El plasma totalmente ionizado, que se forma a temperaturas ultra altas (*plasma de alta temperatura*), existe en el Sol y en las estrellas calientes.

En condiciones de laboratorio el plasma es generado en las descargas en gas (III.9.5.1°) de las fuentes de luz por descarga en gas. El plasma acelerado se utiliza como agente activo (II.4.1.1°) en los motores de reacción. El plasma se puede emplear también para transformar directamente la energía interna en eléctrica (generadores magnetohidrodinámicos y fuentes de energía eléctrica a base del plasma).

La gran cantidad de partículas cargadas que hay en el plasma condiciona su gran conductibilidad y, en este sentido, hace que se aproxime a las propiedades de los conductores de corriente eléctrica.

2°. Condición necesaria para que pueda existir el plasma en cierta densidad mínima ρ_{\min} de partículas cargadas, a partir de la cual puede hablarse ya de plasma y no de una simple aglomeración de partículas cargas aisladas. La densidad ρ_{\min} se determina por la desigualdad $L \gg D$, en la que L es la dimensión lineal del sistema de partículas, y D , un parámetro — distancia del «plasma», llamado *distancia o radio de apantallamiento*

de Debye:
$$D = \left(\sum_i \frac{4\pi e_i^2 n_i}{kT_i} \right)^{1/2}$$
 (en el sistema CGSE) donde e_i es la carga; $n_{i,l}$ la concentración; T_i la temperatura del i -ésimo tipo de partículas; y k , la constante de Boltzmann (II.1.4.5°). La suma se extiende a todos los tipos de partículas. D es la distancia a la cual se produce el apantallamiento del campo coulombiano de una carga cualquiera del plasma. La causa del apantallamiento es que toda carga esta rodeada principalmente por partículas con cargas de signo contrario al suyo.

Una definición mas exacta del plasma es: el conjunto casi neutro de un gran numero de partículas cargadas que ocupan una región del espacio de dimensiones lineales $L \gg D$. Cuando $L \gg D$, en cuanto se producen alteraciones de la neutralidad del plasma, esta se restablece a expensas de los intensos campos eléctricos recuperadores que surgen en el plasma. El radio de apantallamiento de Debye caracteriza la interacción

de las partículas en el plasma. Resulta que $\frac{W_p}{W_c} \sim N^{2/3}$, donde $N = \frac{4}{3} \pi D^3$. Aquí W_p

es la energía potencial de la interacción de dos partículas que se hallan entre si a la distancia media, igual a $n^{-1/3}$ (n es la concentración de partículas), y W_c , la energía cinética de estas partículas. La magnitud N es el número total de partículas que hay en una esfera de radio D y se llama *número de Debye*. Si N es grande, el plasma se llama *gaseoso* y termodinámica se considera como un gas perfecto con ecuación de estado $p = nkT$ (II.1.4.5°).

$$C = \frac{k_+ n_0 z_+}{N_A} = \frac{k_- n_0 z_-}{N_A},$$

llamada *concentración equivalente de la solución*, que representa el número de equivalentes gramo de iones de un signo, contenidos en la unidad de volumen del electrólito (en estado libre y ligados en las moléculas), tenemos que

$$\rho = \frac{1}{FC\alpha(u_+ + u_-)}.$$

§ III.9.4. Conducción de la electricidad por los gases

1°. Los gases constituidos por átomos y moléculas neutras son aisladores y no conducen la corriente eléctrica. La conducción de electricidad se produce en los gases ionizados.

Se llama *ionización de una molécula (átomo)* la separación de uno o varios electrones de ella y su transformación en un ion positivo. Si la molécula (átomo) de un gas captura electrones, surgen iones negativos.

El proceso inverso a la ionización, en el cual los electrones al unirse a un ion positivo forman una molécula (átomo) neutra, recibe el nombre de *recombinación*.

2°. Para ionizar las moléculas (átomos) hay que realizar un *trabajo de ionización* A_i contra las fuerzas de atracción entre el electrón que se arranca y el residuo atómico, es decir, contra las demás partículas de la molécula (átomo). La magnitud de A_i depende del estado energético del electrón que se arranca (IV.2.1.9°) en el átomo o en la molécula de un gas dado. La energía de ionización aumenta a medida que crece la multiplicidad de la ionización, o sea, el número de electrones arrancado del átomo.

3°. Se denomina *potencial de ionización* φ_i la diferencia de potencial del campo eléctrico acelerador que debe recorrer la partícula cargada para acumular una energía igual a la de ionización: $\varphi_i = A_i / e$, donde e es la magnitud absoluta de la carga de la partícula.

4°. La ionización de un gas se debe a las acciones externas: suficiente elevación de la temperatura, influencia de diversas radiaciones, rayos cósmicos y bombardeo de las moléculas (átomos) del gas con electrones o iones rápidos. La *intensidad de la ionización* se mide por el número de pares de partículas cargadas, con signos contrarios y que se forman por unidad de tiempo en la unidad de volumen del gas.

5°. Se da el nombre de *ionización por choque* de un gas, a la ionización debida a la acción de los electrones o iones móviles.

La energía cinética mínima (I.3.2.1°) que debe tener la partícula ionizante se calcula partiendo de las leyes de conservación del impulso y la energía y es igual a

$$\frac{mv^2}{2} = A_i \left(1 + \frac{m}{M} \right),$$

donde A_i es el trabajo de ionización; m , la masa del electrón; y M , la masa del átomo.

La energía media de los electrones en el plasma de descarga gaseosa se caracteriza por cierta *temperatura electrónica* T_e , que corresponde a la distribución de Maxwell de los electrones según sus energías (11.3.3.7°). En virtud de la ausencia de equilibrio termodinámico en este plasma, T_e tiene carácter convencional. La energía cinética media de las partículas neutras es mucho menor que la energía cinética media de los electrones. Además de la temperatura electrónica T_e , también son parámetros del plasma de descarga gaseosa: la concentración de electrones n_e , el número de ionizaciones correspondiente a un electrón por segundo, la densidad de la corriente iónica o electrónica y la intensidad longitudinal E_z del campo eléctrico establecido a lo largo del eje de simetría del plasma.

7°. La posible existencia del plasma de descarga gaseosa termodinámicamente inestable se establece a costa de la energía de la corriente de descarga que lo atraviesa. En ausencia de campo eléctrico externo, el plasma de descarga gaseosa desaparece.

Se denomina *desionización del gas* la desaparición del plasma de descarga gaseosa no mantenido, es decir, <<abandonado a su propia suerte>>.

Además de los procesos de ionización y recombinación (III.9.4.1°), en el balance de energía del plasma existente en un volumen limitado, desempeña un gran papel su interacción con las paredes que limitan su volumen, la radiación del mismo y el desplazamiento de la radiación en él. La difusión de las partículas cargadas hacia las paredes y su recombinación en éstas, así como la transmisión de energía a dichas paredes por conductibilidad térmica del plasma (11.3.8.2°), contaminan este último con impurezas y hacen que disminuya su energía. Para proteger el plasma contra tales fenómenos se tiende a evitar su contacto con las paredes confinándolo en un campo magnético. La radiación del plasma en la banda óptica y en la ultravioleta lejana esta constituida por la radiación de frenado de los electrones, debida al frenado de estos en los iones, por la radiación ordinaria de las partículas excitadas y por la radiación de precombinación que surge en el proceso de precombinación (III. 9.4.1°). En el campo magnético el plasma tiene además una radiación especial, de betatrón (sincrotrón), cuyo estudio rebasa el marco de este manual.

permite esclarecer el sentido físico de F , porque precisamente cuando $M = \frac{A}{z}$, el número de Faraday $F = Q$. La cantidad de substancia igual a $1/z$ moles recibe el nombre de *equivalente gramo*. Cuando $z = 1$, el equivalente-gramo de la substancia es igual a un mol. La constante de Faraday es numéricamente igual a la carga eléctrica que debe pasar por el electrolito para que en el electrodo se desprenda un equivalente-gramo de substancia.

5°. La descomposición de las moléculas neutras en iones con cargas de signos opuestos, como resultado de la interacción de la substancia disuelta con el disolvente, se llama *disociación electrolítica*. Las causas de la disociación electrolítica son el movimiento térmico de las moléculas polares (III.5.1.4°) de la substancia disuelta, constituidas por iones con cargas opuestas y enlazados entre sí (VI.2.4.3°), y la interacción de estas moléculas con las moléculas polares del disolvente. Estas dos causas hacen que se debilite el enlace heteropolar en las moléculas iónicas (VI.2.4.3°) y que éstas se transformen en dos iones con cargas opuestas.

Se llama *coeficiente (grado) de disociación* α la relación entre el número de moléculas n' disociadas en iones en un volumen determinado, y el número total n_0 de moléculas de la substancia disuelta en el mismo volumen: $\alpha = \frac{n'}{n_0}$

6°. El proceso inverso a la disociación electrolítica (p. 5°) se denomina *recombinación*, o sea, reagrupación de los iones de signos opuestos, en moléculas neutras. Si entre los procesos de disociación y de recombinación existe un equilibrio dinámico, α se halla por la ecuación

$$\frac{1-\alpha}{a^2} = \text{const } n_0,$$

cuando $n_0 \rightarrow 0$, tenemos que $\alpha \rightarrow 1$ es decir, en las disoluciones débiles todas las moléculas están disociadas. A medida que aumenta la concentración de la disolución, α disminuye. En las soluciones muy concentradas

$$\alpha \approx \frac{\text{const}}{\sqrt{n_0}}.$$

§ III.9.2. Atomicidad de las cargas eléctricas

1°. De las leyes de la electrólisis de Faraday se deduce que todas las cargas eléctricas están constituidas por un número entero de cargas elementales indivisibles.

2°. La magnitud Q de la carga de cualquier ion:

$$Q = \pm \frac{zF}{N_A},$$

donde z es la valencia del ion; F , el número de Faraday (III.9.1.4°); y N_A , el número de Avogadro (IX). La carga de ion monovalente es igual a la carga e del electrón o del protón:

$$Q_1 = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ CGS } Eq$$

Toda carga eléctrica está constituida por un número entero de cargas elementales e (III.1.1.2°).