

パッシェンの法則

電流を発生させる作用

距離 d を隔てて向かい合った平行板電極間に電圧を加えて持続放電をしているとき、主に次の4つの作用により荷電粒子が発生し電流が流れる。

- 電子による衝突電離作用 (作用)
- 作用によって生じた正イオンによる衝突電離作用 (作用)
- 正イオンが陰極に衝突する際の二次電子放出 (作用)
- 放電で発生した光による光電効果

作用

外来の電離作用 (宇宙線や放射線など) によって電極間にわずかながら存在している電子は、電界によって陽極側に運ばれ、その途中で気体分子に衝突する。このとき電界が十分強いと、電子は加速されて気体の電離電圧以上のエネルギーをもって気体分子に衝突するので、そこで電離が行われる。この衝突電離作用により、気体中の電子の数は陽極に近づくにつれ増えていき、その結果火花が発生する。

これを数式で表すことを考える。1個の電子が陽極方向に dx だけ移動する間に気体分子と α 回衝突するとすると、単位面積あたり n 個の電子が陽極方向に dx だけ移動する間に増加する電子の数 dn は、

$$dn = n\alpha dx$$

である。陽極表面 ($x = 0$) での電子の数を n_0 とすると、

$$n = n_0 \exp \alpha x$$

であるから、結局、陽極での電子による電流密度 I は

$$I = I_0 \exp \alpha d$$

となる。ここで、 $I_0 = en_0$ であり、これは陰極での電子による電流密度である。

α は電子の衝突電離係数と呼ばれ、統計的な量で、また放電環境によって変動する。 α は理論的には次の式で表される。

$$\alpha = Ap \exp \left(-\frac{Bp}{E} \right) \quad (1)$$

ここで、 A 、 B は定数、 p は気体の気圧、 E は電界である。

作用

電極間の電界が強い場合、作用で生じた正イオンも電界によって陰極方向に加速され、衝突電離を行うことができる。

α と同様に正イオンに対しても衝突電離係数 β を定めると、 α と β を用いて電流密度 I は、

$$I = \frac{(\alpha - \beta) \exp(\alpha - \beta)d}{\alpha - \beta \exp(\alpha - \beta)d} I_0$$

と表すことができる。放電で問題になるような電界では、 $\alpha \gg \beta$ なので、

$$I = \frac{\alpha \exp \alpha d}{\alpha - \beta \exp \alpha d} I_0$$

と近似できる。

作用

気体中で発生し電界によって加速された正イオンが陰極に衝突する際、陰極表面から二次電子が放出される。こうして発生した電子も電界によって加速されて作用に加担するので、結果電流は増加する。

電子 n 個が陰極に衝突したときに放出される二次電子の数を γn とする。 γ は陰極表面の状態や電界、イオンの種類で変化する。最初、1個の電子が陰極から陽極まで移動すると、作用により $\exp \alpha d - 1$ 個の正イオンが発生する。これらがすべて陰極に到達すれば、陰極から放出される二次電子の数 n_1 は、

$$n_1 = \gamma(\exp \alpha d - 1)$$

である。この二次電子による作用で、 $n_1(\exp \alpha d - 1)$ 個の正イオンが発生し、それらによって $n_2 = \gamma n_1(\exp \alpha d - 1)$ 個の二次電子が放出される。これを繰り返していくと、陽極に到達する電子の総数 Z は、

$$\begin{aligned} Z &= (1 + n_1 + n_2 + \dots) \exp \alpha d \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k (\exp \alpha d - 1)^k \exp \alpha d \end{aligned} \quad (2)$$

である。等比級数の公比 $\gamma(\exp \alpha d - 1)$ が1より小さければ Z は収束し、

$$Z = \frac{\exp \alpha d}{1 - \gamma(\exp \alpha d - 1)}$$

となる。1個の電子によって Z 個の電子が陽極に到達するので、陽極の電流密度 I は

$$I = Z I_0 = \frac{\exp \alpha d}{1 - \gamma(\exp \alpha d - 1)} I_0$$

となる。作用のみの場合と比べると、電流密度は $1/\{1 - \gamma(\exp \alpha d - 1)\}$ 倍になっている。

光電効果

電子や正イオンは、電極間で再結合して光を発する。また、励起された気体分子が元の状態に戻るときにも光が放射される。放電中に発生したこれらの光が陰極表面に当たると、そこから光電効果によって二次電子が放出される。

いま、1個の電子が電界方向に単位長さ移動する間に発生する光によって、陰極から光電効果により放出される二次電子の数を θ とすれば、電流密度 I は、次のように表される。

$$I = \frac{\alpha \exp \alpha d}{\alpha - \theta(\exp \alpha d - 1)}$$

パッシェンの法則の導出

放電開始電圧を問題にする場合、電流を発生させる最も主な作用は 作用と作用によるものである。よって放電を開始して持続放電が行われるための条件は、式 (2) において公比が 1 以上となって級数が発散すればいいので、

$$\gamma(\exp \alpha d - 1) = 1$$

である。式 (1) をこれに代入すると、放電開始電圧 V_s は、

$$V_s = Ed = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} = \frac{Bpd}{C + \ln pd}$$

となり、 pd のみの関数となる。これをパッシェンの法則と呼ぶ。パッシェンはこの法則を実験的に見出した。

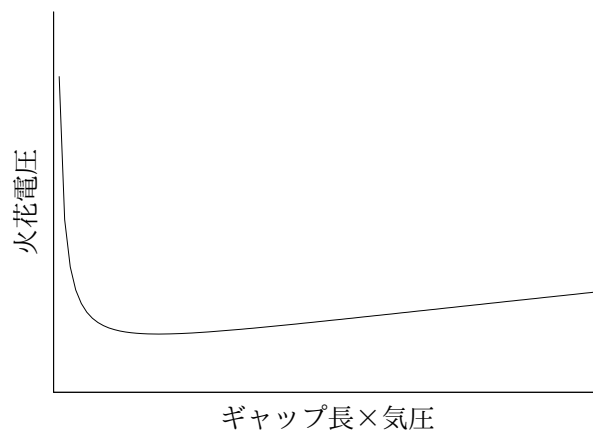


図 1: パッシェンの法則によるギャップ長と気圧の積と火花電圧の関係の概形