

---

## OS PLASMAS POUCO IONIZADOS

---

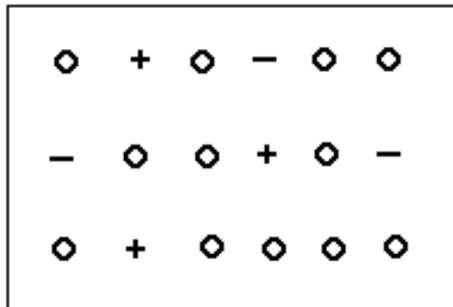
Joel L. R. Muzart  
Depto de Física – UFSC  
Florianópolis – SC

### Resumo

*Neste artigo vamos definir, de maneira simplificada, o que é um plasma pouco ionizado, estudar um exemplo, algumas de suas propriedades e, no final, descrever uma de suas aplicações.*

### I. Definição

Também chamado de quarto estado da matéria, o plasma que, segundo alguns autores<sup>(1)</sup>, constitui 99% do Universo, é composto de elétrons livres, átomos ou moléculas e íons. A taxa de ionização dos plasmas pouco ionizados é da ordem de  $10^{-4}$ , ou seja, para cada par elétron-íon temos dez mil átomos ou moléculas neutros.



*Fig. 1 - Representação de um plasma pouco ionizado ((-)elétron, (+)íon, (o) átomo ou molécula).*

Na temperatura ambiente, essas partículas recebem uma quantidade de energia e adquirem velocidade, cuja distribuição é, aproximadamente, a de Max-

well-Boltzman. É possível demonstrar que a velocidade média das partículas é dada por:

$$\bar{v} = \left( \frac{8kt}{\pi m} \right)^{1/2},$$

sendo k a constante de Boltzman, T a temperatura absoluta e m a massa da partícula.

Uma massa de 70 kg, à temperatura ambiente, teria uma velocidade média de

$$\bar{v} \cong 4 \times 10^{-8} \text{ km/h}$$

Já, na mesma temperatura, um átomo de Argônio, cuja massa é  $6,64 \times 10^{-23}$  g, tem uma velocidade de 1400 km/h. Na Fig. 2, comparamos a velocidade média do Argônio com as de outras partículas do universo.

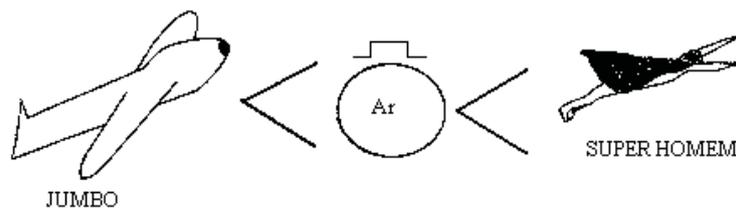


Fig. 2 - A velocidade média do átomo de Argônio segundo B. Chapman(2).

Os íons, na ausência de campo elétrico, tendo uma massa quase igual à dos átomos, têm praticamente a mesma velocidade.

Finalmente os elétrons, por serem muito mais leves, alcançam velocidade muito maior:

$$\bar{v}_e \cong 400.000 \text{ km/h}$$

Considerando as altas velocidades das partículas e o grande número de átomos existentes, em torno de  $3 \times 10^{16}$  por  $\text{cm}^3$  numa descarga à pressão de 1 torr (1 Atmosfera/760), podemos imaginar que muitas colisões, em particular elétrons-átomos, vão acontecer. Usando as equações de conservação da energia e de momento, podemos mostrar que os elétrons transferem somente energia potencial aos átomos. O produto dessas colisões resulta principalmente em ionização e excitação.

## II. Um exemplo de plasma pouco ionizado

Se colocamos em um tubo de vidro, por exemplo, Argônio a uma pressão de 1 torr e aplicamos uma diferença de potencial nos eletrodos, obtemos um plasma pouco ionizado, também chamado de descarga. Na Fig. 3a, mostramos a geometria da descarga.

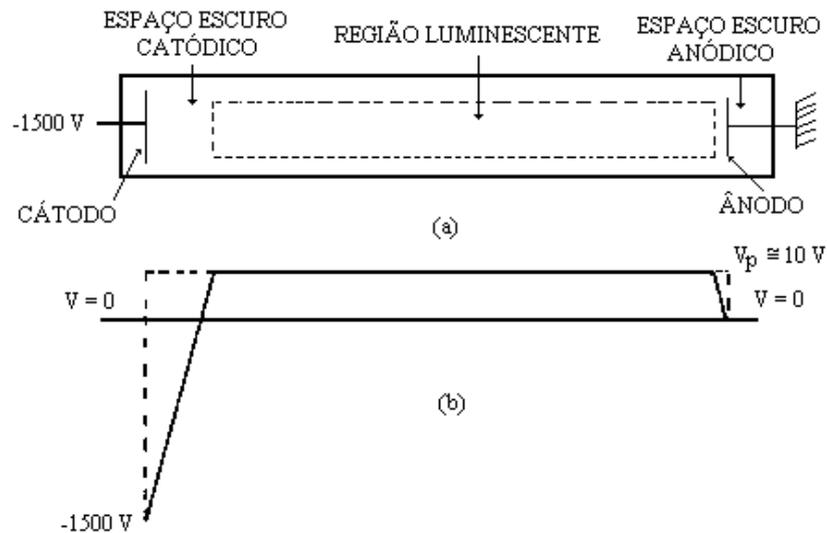


Fig. 3 - (a) Geometria de descarga, (b) Evolução de potencial.

Na Fig. 3b, Representamos a evolução do potencial ao longo da descarga. Algumas observações devem ser feitas sobre as diferentes regiões.

### II.1 O potencial de Plasma $V_p$

Observamos, na Fig. 3b, que o potencial de plasma,  $V$ , é maior do que zero. Isto pode ser explicado de uma maneira simples observando a Fig. 4.

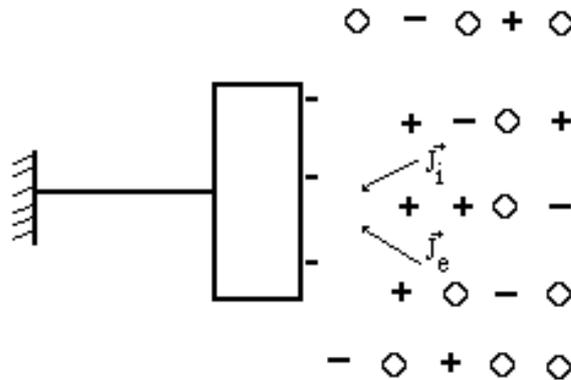


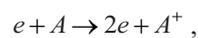
Fig. 4 - Fluxo de partículas no substrato.

Seja uma placa colocada no plasma. As partículas vão se deslocar de maneira aleatória em sua direção. Como os elétrons têm velocidade muito maior do que os íons, a densidade de corrente eletrônica ( $\vec{j}_e$ ) no início será muito maior do que a densidade de corrente iônica ( $\vec{j}_i$ ). Depois da fase transitória, haverá na placa uma carga negativa e ao redor um espaço de carga positiva. Usando a equação de Poisson, podemos mostrar que o espaço de carga positiva cria uma barreira de potencial para os elétrons, de tal maneira que, na fase estacionária, a densidade total de corrente na placa seja nula ( $\vec{j}_e = \vec{j}_i$ ); isto quer dizer que o plasma tem potencial superior ao da placa. Se a placa é colocada na terra ( $V = 0$ ), o potencial do plasma será  $V_p > 0$ .

## II.2 A região luminescente

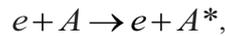
Nesta região, temos um potencial praticamente constante. Ela pode ser considerada como um plasma porque temos aí o mesmo número de elétrons e íons. As colisões elétron-átomo são responsáveis por dois efeitos principais:

- A ionização:

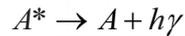


sendo “A” um átomo no estado fundamental, “A<sup>+</sup>” o íon e “e” o elétron. Esta reação é responsável pela manutenção da descarga;

-a excitação seguida de emissão da luz:



sendo A\* um átomo excitado que, em geral, produz a reação:



onde  $h\gamma$  é um fóton de luz emitido. Este último processo é a razão do nome dado a esta região.

Existem ainda outras colisões e, em particular, a recombinação elétron-íon. O estado estacionário na descarga é obtido quando o número de pares elétron-íon, criado por excitação, é igual ao número de recombinações.

Comentamos, no início deste item, que na região luminescente o potencial é praticamente constante. De fato existe um campo elétrico fraco que não modifica muito o comportamento dos íons, mas aumenta significativamente a energia dos elétrons por eles serem muito mais leves. Na verdade, os elétrons podem alcançar uma temperatura média de 30000K, o que corresponde a uma velocidade média de

$$\bar{v}_e \cong 4 \times 10^6 \text{ km/h}.$$

No entanto, como os elétrons numa colisão com uma partícula pesada transferem essencialmente energia potencial e quase nenhuma energia cinética, eles não chegam a esquentar substancialmente o tubo de descarga.

### II.3 O espaço escuro catódico

Nesta região temos um campo elétrico muito forte. Os íons que aleatoriamente saem da região luminescente são acelerados, adquirindo energias muito altas, em torno de 300 eV, e batem com violência no cátodo. Este é o fenômeno mais importante que acontece no espaço escuro catódico. Na Fig. 5, apresentamos um esquema da interação dos íons de alta energia com o cátodo.

O íon incidente, tendo energia suficiente, pode ser implantado no cátodo modificando a sua estrutura, ou pode ser refletido. Além disto, como na colisão ele perde toda ou quase toda sua energia cinética, ele pode extrair átomos do cátodo e também elétrons, chamados de elétrons secundários. Esses elétrons secundários são acelerados pelo campo elétrico da região catódica, alcançando energias muito grandes, e vão bater no ânodo. Os átomos extraídos, ou o íon refletido (em geral neutralizado) vão difundir no plasma.

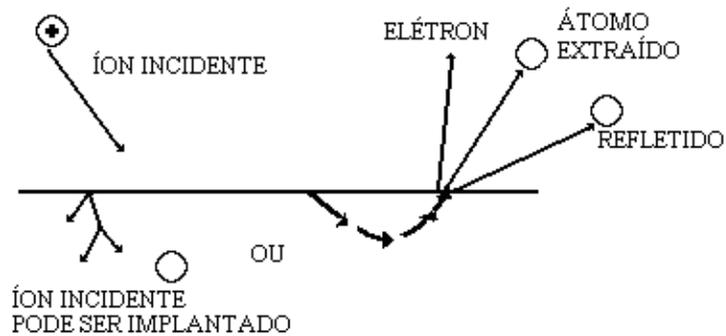


Fig. 5 - Interação dos íons com a superfície.

Devemos notar ainda que no espaço catódico não temos elétrons provenientes da região luminescente. Somente estão presentes os elétrons secundários que rapidamente saem, não contribuindo significativamente para ionização ou excitação, razão pela qual esta região é escura.

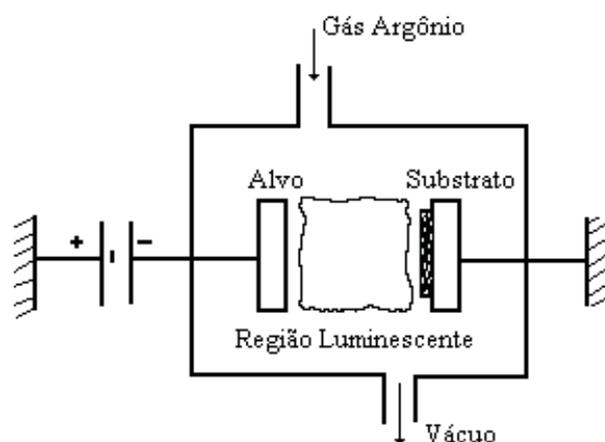
#### II.4 O espaço escuro anódico

Voltando à Fig. 3, podemos ver que o potencial de plasma é maior do que o do ânodo. Isso faz com que a maioria dos elétrons provenientes da região luminescente não tenha energia suficiente para alcançar o ânodo. Somente os elétrons rápidos provenientes do cátodo vão alcançar o ânodo.

Por outro lado, os íons da região luminescente vão ser acelerados em direção ao anodo com energia da ordem de 10eV, não suficiente para provocar grandes modificações como no cátodo, mas em condições de nele se depositarem.

### III. Um sistema convencional de depósito por plasma

Usando as propriedades do plasma pouco ionizado vamos ver como funciona um dispositivo para deposição por plasma.



*Fig. 6 - Reator de deposição por plasma.*

Em geral, usa-se um gás nobre que por ter a camada externa de elétrons cheia não reage quimicamente com o alvo ou o substrato. O sistema trabalha em pequeno fluxo, permitindo assim a renovação do ambiente. Existem impurezas presas na parede do reator que saem devido ao aquecimento do sistema durante o tratamento, e podem prejudicar o processo de deposição; a renovação do ambiente permite maior limpeza e portanto melhor qualidade da camada depositada. O gás nobre escolhido é o Argônio por ser o mais barato dos gases nobres.

O alvo colocado a uma tensão de -500 Volts, por exemplo, é bombardeado pelos íons de Argônio os quais arrancam átomos do alvo, que por difusão vão se propagar até o substrato onde se realiza o depósito. Em geral a densidade de corrente é relativamente baixa (da ordem de  $10\text{mA}/\text{cm}^2$ ), fazendo com que o gasto com energia seja baixo.

Um inconveniente deste sistema é que ele é lento, mas por outro lado gasta-se muito menos energia e é mais limpo do que outros processos, em particular, o de banho químico.

Existem muitas outras propriedades dos plasmas reativos que podem ser estudadas, como também discutidas muitas outras aplicações, por exemplo, em microeletrônica, análise da atmosfera, depósito em polímeros, lasers a gases, etc...

#### IV. Referências Bibliográficas

<sup>1</sup> CHEN, F.F. Introduction to plasma physics. Plenum Press. 1974.

<sup>2</sup> CHAPMAN, B. Glow discharge processes. John Wiley, 1980.

---

#### PENSE E RESPONDA!

---

Na água flutua uma cruz de madeira. Cada uma das partes da mesma foi pintada em um lado com verniz (ver figuras). Como consequência de diferentes umedecimentos da madeira e do verniz, a água nos dois lados de cada parte eleva-se a diferentes alturas; o ângulo será diferente e, conseqüentemente, a componente horizontal da força de tensão superficial  $F$  será diferente em ambos os lados de cada parte. Como consequência disto, a cruz ira girar?

