

## 5. CARACTERÍSTIQUES D'UN PLASMA. SONDA DE LANGMUIR

### Introducció

Un plasma de descàrrega per filament calent està format per ions, electrons, àtoms i molècules neutres. A aquest estat s'hi arriba amb la ionització d'un gas contingut en una cambra a baixa pressió. En l'experiment següent, la ionització es produeix mitjançant l'aplicació d'una tensió elevada entre dos elèctrodes situats a l'interior del gas, i amb l'ajut d'una aportació d'electrons procedents del càtode calent. Els electrons alliberats des del filament calent (efecte termoelectrònic) s'acceleren dins del camp elèctric i ionitzen alguns dels àtoms del gas com a resultat d'un xoc inelàstic entre l'electró i l'àtom. Els electrons secundaris, que sovint es produeixen, a la vegada poden ser accelerats pel camp elèctric i ionitzar altres àtoms en un procés d'abalança, que fa que la descàrrega esdevingui un procés automantingut.

Els paràmetres físics que caracteritzen aquest tipus de descàrrega són:

- Temperatura electrònica,  $T_e$ , i iònica,  $T_i$ .
- Densitats volúmica de càrrega: densitat electrònica,  $n_e$ , i densitat iònica,  $n_i$ .
- Densitats de corrent electrònic,  $j_e$ , i iònic,  $j_i$ .

Per determinar aquests paràmetres utilitzarem un petit elèctrode, anomenat *sonda de Langmuir* (Langmuir i Mott-Smith, 1924), que introduïrem dins del plasma. A partir de la mesura de la característica d'intensitat-tensió que ens proporciona aquesta sonda podrem determinar els paràmetres locals del plasma per a unes condicions de pressió i temperatura donades.

### Fonaments teòrics

Un plasma està format per electrons, ions i molècules, àtoms i radicals neutres. En general, els plasmes amb què es treballa al laboratori són de baixa energia (plasmes freds), és a dir, amb una ionització baixa que fa que la densitat d'àtoms neutres sigui uns quants ordres de magnitud més elevada que la densitat iònica o l'electrònica.

Els electrons poden adquirir la seva energia directament del camp elèctric aplicat externament o bé de les mateixes col·lisions ionitzants entre les partícules del plasma. La velocitat dels electrons presenta, doncs, una distribució aleatòria, a causa precisament dels xocs continuats amb les partícules del plasma. En els plasmes freds la distribució de velocitats dels electrons es pot considerar com del tipus de Maxwell-Boltzmann, la qual cosa permet definir una temperatura electrònica com un paràmetre associat a l'energia cinètica mitjana dels electrons. Aquesta situació també es pot considerar per al cas dels ions presents en el plasma.

Els electrons tenen una massa milers de vegades més petita que la dels ions, i això fa que la seva mobilitat sigui molt més alta. L'energia cinètica que poden adquirir els electrons dins del camp elèctric en el temps  $\tau$  entre xoc i xoc és molt més gran que la dels ions. Un ió pot adquirir un nivell d'energia cinètica comparable a la dels electrons només després de milers de xocs, i el temps invertit seria més gran que el de la pròpia vida mitjana de l'ió. Tot i que estem en un sistema fora de

l'equilibri termodinàmic, podem parlar d'un plasma com si estigués format per dos sistemes termodinàmics en equilibri, ja que tant els ions com els electrons estan en equilibri entre ells, però no els uns amb els altres. Així doncs, tant els ions com els electrons es caracteritzen per les seves temperatures,  $T_i$  i  $T_e$  respectivament. Però per tal de simplificar els càlculs podem suposar que  $T_i$  és molt petita comparada amb  $T_e$ , i amb caràcter general podem considerar-la nul·la. Aquesta suposició es basa en la gran diferència entre la velocitat mitjana dels ions (molt lents) i la dels electrons.

D'altra banda, quan s'estableix un plasma estacionari, es compleix la condició de neutralitat elèctrica, és a dir, que les densitats electrònica i iònica són iguals. Aquesta condició no es compleix per a regions de dimensions més petites que la longitud de Debye,  $\lambda_D$  (per la mateixa definició de  $\lambda_D$ ) i, en particular, no es compleix en els límits espacials del plasma (beines).

Si considerem les regions del plasma on es compleix la condició de neutralitat elèctrica (fora de les beines), la situació és molt similar a la d'un conductor en equilibri, en el qual el camp elèctric al seu interior és nul. En un plasma estacionari s'estableix, doncs, una regió amb un potencial constant, que s'anomena *potencial de plasma*,  $V_p$  (potencial del plasma respecte a l'ànode), que per al cas d'un plasma generalment és positiu.

En els límits del plasma, juntament amb els elèctrodes trobem una caiguda de potencial des del potencial de plasma  $V_p$  fins al potencial de l'elèctrode,  $V$ , imposat exteriorment. Això succeeix a les vores dels elèctrodes que mantenen el plasma encès (ànode, càtode i filament calent) i a la vora de la sonda quan aquesta es polaritza a un potencial  $V_0$ . Considerant, doncs, que a la zona propera als elèctrodes hi ha una variació de potencial, hem de convenir llavors que allí hi haurà també camp elèctric, i la condició de la neutralitat elèctrica no es complirà. És precisament en aquesta zona on es fa l'aportació energètica des del camp elèctric als electrons que mantenen el plasma «encès», i on es produeixen els corrents d'electrons i ions que, en arribar als elèctrodes o a una sonda, poden ser detectats en polaritzar adequadament.

Beina de Debye: per trobar la variació del potencial a les vores de la sonda de Langmuir considerarem el cas d'una sonda a potencial  $V_0$  immersa en un plasma a potencial  $V_p$  i en absència de corrents, i escriurem l'equació de Poisson entre dos plans paral·lels infinits: pla de la sonda i un pla imaginari situat suficientment endins del plasma perquè es verifiqui la neutralitat elèctrica, (zona neutra amb densitats electrònica i iònica iguals:  $n_e = n_i = n_0$ ):

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0}. \quad (1)$$

Per resoldre aquesta equació, suposarem que la densitat iònica (per als ions positius, majoritaris) és:

$$n_i = n_0 \quad (2)$$

a totes les regions, a causa de la seva molt baixa energia cinètica. En canvi, la densitat dels electrons, que tenen una temperatura més elevada  $T_e$  i un potencial  $V$ , vindrà donada per la distribució de Maxwell:

$$n_e = n_o \cdot e^{-\frac{eV}{kT_e}}. \quad (3)$$

Si considerem que  $eV \ll kT_e$ , aleshores,  $n_e \approx n_o(1 - eV/kT_e)$ , i l'equació de Poisson queda com:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{n_o e^2}{\epsilon_o kT_e} V. \quad (4)$$

La resolució de l'equació (4) dona:

$$V = (V_o - V_p) \cdot e^{-\frac{x}{h}} + V_p, \quad (5)$$

on el paràmetre  $h = \sqrt{\frac{\epsilon_o kT_e}{n_o e^2}}$  s'anomena *longitud de Debye* i representa la distància que el plasma necessita per apantallar una pertorbació del seu potencial elèctric. Al voltant de la sonda de Langmuir es forma una beina —la beina de Debye— en la qual hi ha un fort camp elèctric i una densitat de càrrega espacial que apantalla la sonda respecte al plasma.

Corrents captats per la sonda: si alguna de les partícules carregades del plasma penetra la beina de Debye, serà accelerada o frenada per l'intens camp elèctric, de tal manera que a l'elèctrode hi arribarà un flux de partícules carregades que constituirà un corrent. La densitat de corrent,  $j$ , a una distància  $x$  del pla de la sonda serà en el cas unidimensional:

$$j(x) = j_i(x) - j_e(x) = e \cdot n_i(x) \cdot \langle v_i(x) \rangle - e \cdot n_e(x) \cdot \langle v_e(x) \rangle, \quad (6)$$

on  $\langle v_i \rangle$  i  $\langle v_e \rangle$  són les velocitats mitjanes dels ions i dels electrons. En la posició  $x = 0$  tindrem el corrent total captat per la sonda,  $j_{tot}$ :

$$j_{tot}(x) = e \cdot \{n_i(0) \cdot \langle v_i(0) \rangle - n_e(0) \cdot \langle v_e(0) \rangle\}, \quad (7)$$

on:

$$n_i(0) = n_o \sqrt{1 - \frac{eV_{SP}}{\frac{1}{2} m_i v_o^2}}$$

$$\langle v_i(0) \rangle = v_o$$

$$n_e(0) = n_o \cdot e^{-\frac{eV_{SP}}{kT_e}}$$

$$\langle v_e(0) \rangle = \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}},$$

en què  $V_{SP} = V_o - V_p$  és el potencial de polarització de la sonda respecte a l'ànode.

Quan  $V_{SP} = 0$ , la sonda recull tant el corrent d'ions com el d'electrons. Com que el corrent

d'electrons és molt més gran que el d'ions, a causa de la seva més gran velocitat, el primer domina. A mesura que  $V_{SP}$  es va fent negatiu, els electrons són repel·lits i el corrent electrònic disminueix, fins al punt en què els corrents electrònic i iònic s'igualen. El potencial a  $j_{tot} = 0$  s'anomena *potencial flotant*,  $V_F$ . Si  $V_{SP}$  és suficientment negativa, aleshores predomina el corrent d'ions, ja que la quantitat d'electrons amb prou energia per arribar a la sonda és negligible.

De l'expressió del corrent  $I(V_{SP})$  recollit per la sonda:

$$I = eAn_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \cdot e^{\frac{e(V_{SP}-V_P)}{kT_e}} - I_i, \quad (8)$$

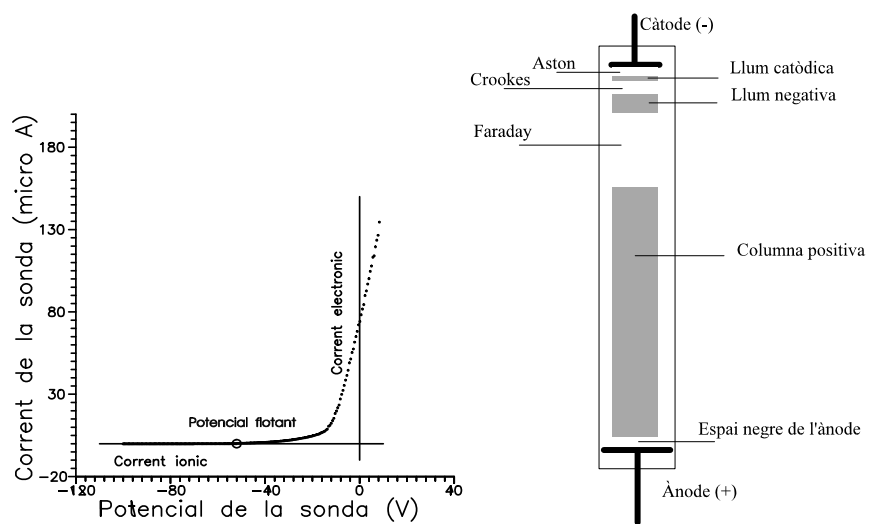
on: 
$$I_i = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} eAn_o \sqrt{1 - \frac{e(V_{SP} - V_P)}{kT_i}} \cdot \sqrt{\frac{kT_i}{2\pi m_i}}, \quad (9)$$

en què A és la secció transversal al corrent de la sonda i  $I_i$  és el corrent iònic (valor de saturació a polaritzacions negatives).

De l'expressió (8) i ajustant els valors experimentals de la característica  $I(V)$  de la sonda de Langmuir, es poden determinar els paràmetres:  $T_e$ ,  $n_o$ ,  $V_F$  i  $I_i$ , que caracteritzen el plasma. En l'experiment que durem a terme suposem que la sonda és cilíndrica i que estem en condicions de distribució maxwell·liana, llavors per a temperatures iòniques,  $T_i$ , suficientment baixes, les expressions per als corrents iònic i electrònic obtinguts amb la característica  $I-V$  de la sonda de Langmuir seran:

$$I_i = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} eAn_o \sqrt{\frac{e(V_{SP} - V_P)}{kT_i}} \quad (10)$$

$$I_e = eAn_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \cdot e^{\frac{e(V_{SP}-V_P)}{kT_e}} \quad (11)$$

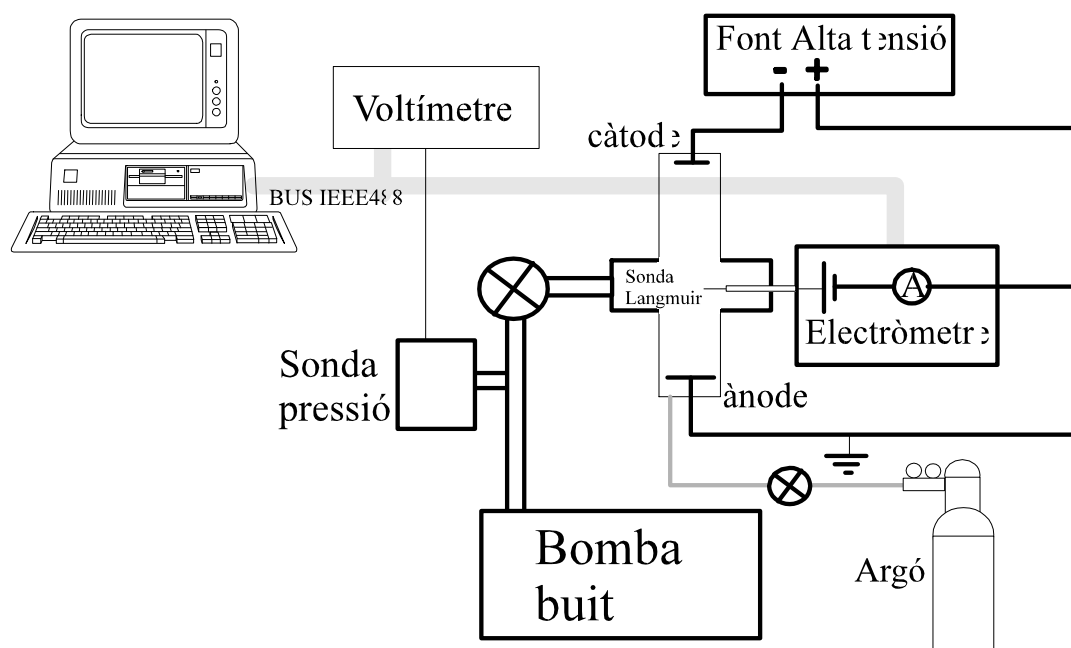


### Material disponible per a l'experiment

- Sistema de buit amb bomba mecànica, vàlvula i cambra de buit.
- Ampolla d'argó (200 bar) amb manoreductor (1 bar), i microvàlvula d'entrada del gas a la cambra (interval de treball des de 0,2 mbar fins a 1 mbar). Per protegir la bomba de buit, NO CONVENEN PRESSIONS MÉS ELEVADES.
- Voltímetre amb sonda capacitativa per mesurar la pressió (0-10 V del voltímetre equivalent al rang 0-10 mbar de la pressió).
- Font d'alta tensió regulable per la polarització dels elèctrodes (0-2000 V, 0-10 mA).
- Sonda de Langmuir (radi = 0,2 mm, longitud = 3 mm).
- Electròmetre KEITHLEY (font de polarització + amperímetre).
- Ordinador i sistema de comunicació amb norma IEEE488.
- Instrument virtual, SONDA-LW.vi en l'entorn Windows 3.1.
- Determinació dels paràmetres físics del model amb full de càlcul, SONDA.xls en l'entorn Windows 3.1.

### Mètode experimental

L'objectiu d'aquest experiment és mesurar la característica  $I-V$  de la sonda Langmuir corresponent a cada pressió i calcular les dependències dels paràmetres del plasma en relació amb la pressió. Les mesures es fan mitjançant un ordinador amb un sistema d'adquisició de dades que recull un senyal proporcional a la pressió del gas i les tensions i intensitats generades pel programa de mesura de característiques  $I-V$  connectat a la sonda de Langmuir a través del circuit de la figura:



### Operacions que cal dur a terme:

#### a) Per fer el buit

- Comproveu que les vàlvules (de BUIT, i d'entrada de gas) estan tancades.
- Comproveu que la pressió de sortida de l'ampolla de gas està a 1 mbar (en cas contrari pregunteu al professor).
- Connecteu la font d'alimentació de la sonda de pressió capacitativa.
- Connecteu el voltímetre per llegir la pressió.
- Connecteu la bomba de buit i verifiqueu que la pressió se situa a l'ordre de 0,10 a 0,20 mbar.
- Obriu la vàlvula de buit i observeu com la pressió augmenta ràpidament i després torna a disminuir lentament al valor dins de l'interval d'abans.
- Obriu amb molta cura la microvàlvula d'entrada de gas (Ar o aire) i verifiqueu que la pressió se situa entre 0,2 i 0,5 mbar (prement VDC en el voltímetre, llegirem de 0,2 a 0,5 V).

#### b) Per encendre el plasma

- Comproveu que la vàlvula de buit està oberta, que la pressió de la cambra és de l'ordre de 0,3 mbar i que es manté constant.
- Connecteu la font d'alta tensió. Tarda una estona a entrar en règim.
- Poseu 1 mA de corrent límit i 1.400 V de límit de tensió (els botons són del tipus de 10 voltes/fons d'escala).
- Si al cap de 5 min no s'ha encès el plasma (és a dir, el corrent mesurat és zero) aviseu el

professor.

- Un cop encès el plasma, LIMITEU EL CORRENT ENTRE L'ÀNODE I EL CÀTODE a 1 mA (verifiqueu que el pilot vermell de limitació de corrent es manté encès durant tot l'experiment).

### c) Mesura de característiques $I(V)$

- Connecteu l'ordinador.
- Connecteu l'electròmetre i verifiqueu que el voltímetre està mesurant la pressió (1 mbar  $\equiv$  1 V).
- Carregueu el programa *Sonda.exe*.
- Seguiu les indicacions del menú del programa.

La polarització de la sonda fa que els ions i electrons que incideixen sobre el petit elèctrode immers en el plasma creïn un corrent mesurable des de l'exterior.

Per tal d'evitar que la sonda arribi a potencials massa elevats respecte a la massa, polaritzarem la sonda respecte a l'ànode, el qual està connectat a la massa. L'interval de polarització normalment va de  $-100$  V a  $10$  V o  $20$  V. El valor de  $10$  V o  $20$  V és suficient, ja que el corrent electrònic recollit en polaritzar positivament la sonda pot arribar a valors importants que saturarien l'amperímetre de l'electròmetre.

A partir de la corba  $I(V)$  per a cada pressió i comparant amb la dependència teòrica (8) podrem determinar els paràmetres característics del plasma: temperatura electrònica, densitat d'electrons dins del plasma, potencial flotant i corrent iònic recollit per la sonda.

L'experiment de mesura de la  $I(V)$  per a cada pressió es fa de manera automatitzada mitjançant el programa *Sonda-LW.VI* (en l'entorn Windows 3.1) que fa les operacions següents:

- a) Llegeix la pressió actual del recinte de buit, per tal de comprovar que es manté constant durant l'experiment.
- b) Llegeix els valors de corrent de la sonda corresponents a cada valor de la polarització. Aquesta operació es fa des de l'electròmetre KEITHLEY, el qual disposa d'una font de tensió programable i un picoamperímetre.

Posteriorment, mitjançant el full de càlcul *Sonda.xls* fem un tractament de les dades mitjançant un model que s'aplica al corrent total recollit per la sonda (8). D'aquí s'obtenen els valors de:

- potencial de plasma,  $V_p$
- densitat d'ions positius,  $n_o$  (aproximadament igual a la densitat electrònica)
- temperatura electrònica,  $T_e(K)$ , o amb unitats eV ( $kT$  expressat en eV).



### Explotació dels resultats mitjançant un full de càlcul

Donat el model per al corrent total (iònic i electrònic) (8):

$$I + I_i = eAn_o \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \cdot e^{\frac{e(V_{SP} - V_P)}{kT_e}},$$

on 
$$I_i = \frac{2}{\sqrt{\pi}} eAn_o \sqrt{1 - \frac{e(V_{SP} - V_P)}{kT_i}} \cdot \sqrt{\frac{kT_i}{2\pi m_i}},$$

tenim que, quan el corrent  $I = 0$ , llavors  $V_F = V_{SP}$  i, per tant:

$$V_P - V_F = \frac{kT_e}{e \cdot \ln \sqrt{\frac{m_i}{2\pi m_e}}}.$$

- Obriu el full de càlcul d'Excel 3.0, *Sonda.xls*.
- Dins de l'Excel, genereu una nova plantilla i obriu el vostre arxiu de dades que té tres columnes: corrent total,  $I$  (mA), polarització de la sonda,  $V$  (kV), i pressió durant la mesura,  $P$  (mbar). Enganxeu-hi (*Paste*) les vostres dades des de la posició A1. Verifiqueu que la substitució ha estat correcta.
- Copieu les tres columnes de la plantilla al full de càlcul *Sonda.xls* des de A1 (en substitució de les primeres tres columnes amb dades anteriors del full *Sonda.xls*) i ajusteu les mesures al model matemàtic introduït en la plantilla, mitjançant els paràmetres:  $V_P$ ,  $n_o$ ,  $T_e$ . Durant la simulació és convenient fer una estimació del valor del corrent  $I_0$  (valor de l'ordre o inferior a  $1 \cdot 10^{-7}$  A), com a calibratge del corrent per compensar el zero de l'electròmetre.
- Guardau el full de càlcul amb els valors ajustats per a cada pressió en el vostre disquet.

### Qüestions

- Identifiqueu les característiques qualitatives de la descàrrega DC amb les de la figura.
- Mesureu la corba  $I(V)$  per uns quants valors de pressió a l'interval 0,2-0,6 mbar.
- Calculeu els paràmetres corresponents a cada  $I(V)$  mitjançant el programa SONDA i presenteu-ho en una taula.
- Representeu les corbes  $I(V)$  per a cada pressió.
- Representeu una de les corbes del quadrat del corrent iònic (escala lineal) i del corrent electrònic (semilog) respecte al potencial de la sonda.
- Representeu la variació del potencial de plasma i de la densitat electrònica respecte de la pressió.
- Calculeu la longitud de Debye i el potencial flotant per al cas de la pressió més baixa.
- Calculeu i representeu el grau d'ionització en funció de la pressió (densitat electrònica/densitat del gas dins la cambra de buit).

### Bibliografia

- REITZ, J.; MILFORD, F.; CHRISTY, R. *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Addison-Wesley Iberoamericana, 1984.
- ANDREU, J. *Plasma de silà amb confinament electrostàtic per a l'obtenció de silici amorf hidrogenat*. [Tesi doctoral].
- CAMPMANY, J. *Muntatge d'una sonda de Langmuir per mesurar i calcular de manera automatitzada les característiques d'un plasma*. 1989. [Treball de col·laboració amb el Dept. de Física Aplicada i Electrònica].
- LIEBERMAN, M.; LICHTENBERG, A. *Principle of Plasma Discharges and Material Processing*. Nova York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- ESER, E.; OGILVIE, R. E.; TAYLOR, K. *Measurement of Plasma Discharge Characteristics for Sputtering Applications*, *J.Vac.Sci.Technol.* **15** (1978)199.
- BERTRAN, E. Programa SONDA, DOS, 1997.
- . Full de càlcul SONDA.XLS, 1999.
- TINTÓ, Francesc; CASTELLARNAU, Marc. Programa SONDA-LW.VI, LabView, 1999.