



وضع المعادلات لدراسة توضع الطبقات الرقيقة لمزيج غازي بواسطة تقنية PECVD-DECR

من إعداد الطالبة : برقوق السعدية* , تحت إشراف الأستاذ: خلفاوي فتحي** و الأستاذة : بلة زكية

جامعة قاصدي مرباح ورقلة كلية الرياضيات وعلوم المادة
مخبر الإشعاع والبلازما وفيزياء السطوح (L. R. P. S), قسم فيزياء, ورقلة 30000, الجزائر
** fethi.khelfaoui@gmail.com , * physisadiabergoug@gmail.com

ملخص: تقنية توضع الطبقات الرقيقة بواسطة بلازما الرنين السيكلوتروني (PECVD – ECR) تعد من التقنيات الأكثر استخداما في مجال الصناعة والإلكترونيات الدقيقة، تسمح هاته التقنية بالترسيب مختلف أنواع المواد [1]. يستعمل ترسيب السيليسيوم باستعمال هاته التقنية في عدة تطبيقات ضوئية. في دراستنا قمنا بتحضير النمذجة العددية لدراسة الخصائص الكهربائية (الكثافة الإلكترونية n_e ، الكثافة الأيونية n_i و كثافة الجسيمات المحايدة n_n و الحقل الكهربائي) لغاز الأرغون داخل مفاعل توزيع الرنين السيكلوتروني Distributed Electron Cyclotron Resonance (DECR) في بعد واحد Z و باعتبار النظام مستقر. وقد استعنا في الدراسة بنموذج الموانع و بتحديد معادلة الاستمرارية و معادلة بواسون. بانجاز برنامج عددي بلغة الفورتران 77 و بتطبيق طريقة الفروق المنتهية و غوص صايدل التكرارية نتمكن من حساب توزيع الكثافات على طول المحور Z .

الكلمات المفتاحية: PECVD ، DECR ، نموذج الموانع، معادلة الاستمرارية، معادلة بواسون، غاز الأرغون، تفاعلات الحركة الكيميائية، طريقة الفروق المنتهية.

بالأخذ بعين الاعتبار سرعة الانزياح V_{DB} الناتجة عن تدرج الحقل المغناطيسي:

$$\vec{V}_D = \frac{\vec{E}_\perp \times \vec{B}}{B^2} + \frac{\mu}{2q_{e,i} B^3} (\vec{B} \times \nabla_\perp B^2)$$

$$\vec{E} = \vec{E}_\parallel + \vec{E}_\perp - \frac{m_{e,i} V_\perp^2}{2q_{e,i} B} \nabla_\perp B$$

$$\vec{D}_{e,i} = \begin{pmatrix} D_\parallel & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\theta_{e,i}^2 D_\parallel}{(\theta_{e,i}^2 + \omega_c(z)^2)} & \frac{\theta_{e,i} D_\parallel \omega_c(z)}{(\theta_{e,i}^2 + \omega_c(z)^2)} \\ 0 & -\frac{\theta_{e,i} D_\parallel \omega_c(z)}{(\theta_{e,i}^2 + \omega_c(z)^2)} & \frac{\theta_{e,i}^2 D_\parallel}{(\theta_{e,i}^2 + \omega_c(z)^2)} \end{pmatrix}$$

بالإسقاط على المحور Z نجد معامل الحركة ومعامل الانتشار الأيوني والإلكتروني:

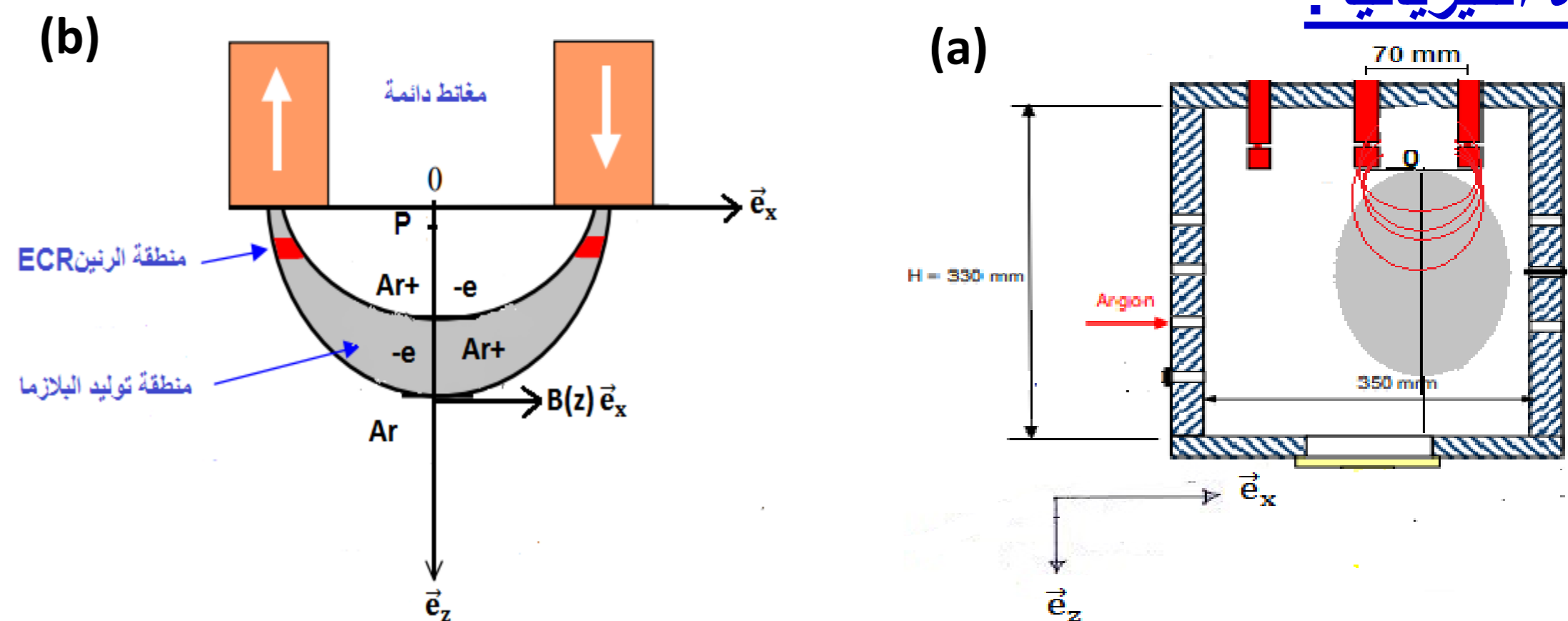
$$\mu_{e,i} = \frac{\theta_{e,i}^2 D_\parallel}{(\theta_{e,i}^2 + \omega_c(z)^2)} \left(1 - \frac{m_{e,i} V_\perp^2}{2q_{e,i} E(z) B(z)} \frac{dB}{dz} \right)$$

$$D_{e,i} = \frac{\theta_{e,i}^2 D_\parallel}{(\theta_{e,i}^2 + \omega_c(z)^2)}$$

$\mu_{e,i}$ معامل الحركة ومعامل الانتشار $D_{e,i}$ في غياب الحقل المغناطيسي.

$$\nabla E = -\Delta V = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0} \quad \text{معادلة بواسون}$$

الظاهرة الفيزيائية:



الشكل 1: (a) مخطط لمفاعل DECR [2] ، (b) رسم تخطيطي لخطوط الحقل المغناطيسي بين القطبين .

- باعتماد الحقل المغناطيسي بين المغنطين $\vec{B}(z) \vec{e}_x$ ، $\frac{\partial B}{\partial z} \neq 0$.
- باعتماد معادلات التفاعلات الكيميائية للوسط الغازي.
- ثابت التفاعل k_{rec}
- $Ar+e \rightarrow Ar^++2e$
- بحساب معاملي الحركة ومعاملي الانتشار الإلكترونيات والأيونات .
- نقوم بحساب الكثافة الأيونية ، الكثافة الإلكترونية وكثافة الجسيمات المحايدة على المحور \vec{e}_z .

النموذج الرياضي:

معادلة الاستمرارية لنظام مستقل عن الزمن [3] :

$$\nabla \cdot \vec{J}_{e,i,n} = S^{e,i,n} \quad \vec{J}_{e,i,n} = \pm \mu_{e,i,n} n_{e,i,n} \vec{E} - D_{e,i,n} \nabla n_{e,i,n}$$

$$S^e = S^i = -S^n = K_{rec} n_e n_{Ar} \quad \text{مصدر الجسيمات}$$

$$\vec{J}_{e,i,n} \quad \text{كثافة التدفق الجسيمات } (Ar, e, Ar^+)$$

معامل الانتشار D_i ومعامل الحركة μ_i الأيوني في غياب الحقل المغناطيسي [4] [5]:

$$\frac{D_i}{\mu_i} = \frac{K_B T_{ion}}{e} \quad \frac{P_{tot}}{\mu_j} = \sum_{i=جسيم\ محايد} \frac{P_i}{\mu_{ij}} \quad \mu_{ij} = 0.514 \frac{T_g}{P_{tot} \sqrt{m_{ij} \alpha_i}} (i = \text{أيون } j, \text{ جسيم محايد})$$

معامل الانتشار D_j للجسيمات المحايدة [5] :

$$D_{ij} = \frac{3}{16} \frac{\sqrt{4\pi K_B T_g / 2m_{ij}}}{n_{tot} \pi \sigma_{ij}^2 \Omega_D(T^*)} (m^2/s) \quad \frac{P_{tot}}{D_j} = \sum_j \frac{P_i}{D_{i,j}} \quad \Omega_D(T^*) = \frac{A}{T^* B} + \frac{C}{e^{(D,T^*)}} + \frac{E}{e^{(F,T^*)}} + \frac{G}{e^{(H,T^*)}}$$

$$T^* = \frac{T(kelvin)}{\epsilon_{ij}} , \epsilon_{ij}(k) = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j} , \sigma_{ij}(A^0) = \frac{(\sigma_i + \sigma_j)}{2} \quad \text{ثوابت ليونارد جونز [6] :$$

يجب حل قانون الحركة للسرعة V في وجود الحقل المغناطيسي [7] وإيجاد تنسور معامل الانتشار $\mu_{e,i}$ ومعامل الحركة $D_{e,i}$ للإلكترونات والأيونات :

$$\vec{V} = \frac{1}{m_{e,i} \theta_{e,i}} \left\{ q_{e,i} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) - K_B T_{e,i} \frac{\nabla n_{e,i}}{n_{e,i}} \right\}$$

النموذج العددي:

باستعمال طريقة الفروق المنتهية نتحصل على المعادلة الآتية :

$$B(k,k) = n^{k-1} A_{Ar,e,Ar^+}^{(k,k-1)} + n^k A_{Ar,e,Ar^+}^{(k,k)} + n^{k+1} A_{Ar,e,Ar^+}^{(k,k+1)}$$

$$\frac{dJ_{e,Ar^+}}{dz} = B(k,k) = k_{rec} n^k e n_{Ar}^k$$

بالاستعانة بطريقة غوص صايدل التكرارية للحساب.

باستعمال الشروط الحدية وانحفاظ الكتلة الكلية والشحنة الكلية.

الأعمال المنجزة والمنتظرة:

✓ تم حساب بياني لتدرج الحقل $B(z)$ (تغير أسي).

✓ تم حساب معامل الحركة ومعامل الانتشار.

✓ في طور الانجاز حساب الكثافات.

الشكل 2: مخطط سير الحساب العددي

المراجع:

1. F. Silie, C. Junfang, W. Xianqi, W. Ningxing, Z. Maoping and H. U Shejun; Plasma Science & Technology, Vol. 8, N° 3;(2006)
2. T. V. Tran; Thèse de doctorat; Université Joseph-Fourier (1992).
3. A. V. Phelps; J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol, Vol:95, N° 4,pp. 407-431; (1990).
4. J. Perrin , O. Leroy and M. C. Borge; Contributions to Plasma Physics, Vol: 36, N° 1, pp. 3-49; (1996).
5. D. Herrebout, A. Bogaerts, M. Yan and R. Gijbels, Journal of Applied Physics, Vol : 90, N° 2, pp570-579; (2001).
6. F. Cuadros , I. Cachadina and W. Ahumada ; Molecular Engineering, Vol: 6, pp 319 – 325 ; (1996).
7. M. Moisan and J. Pellet; physique des plasmas collisionnels; EDP Sciences France (2006).
8. Z. Ballah and F. Khelfaoui; Journal of King Saud University, Vol: 32, N° 3, pp 930-937 ;(2018).