جـامعـة قـاصـدي مـربـاح ورقـلة

كليـة العلوم و التكنلوجـيا و علـوم الـمادة

رقم الترتيب :...........
الرقم التسلسلي :.........

****

قسم علـوم الـمادة

مذكـرة

لنيـل شهـادة الـمـ ـاجست

تـخصص: فيزيـ ـاء

فرع: فيزياء الإشعاع و ا طيافية و الإلكترونيات الضوئية

من إعـداد الطـالبـة: عبيـد سعيـدة

العنوان

دراسـة ثلاث أبعـاد للمقـاديـر الكهربـائية جهـاز الـرش ا هبطـي ا غنطرونـي باستعمال طريقـة ا جـوم ا نتهيـة

نوقشت يوم : 2012/05/23

أمام لـجنة ا ناقشة ا كونة من السادة:

-د. بوكـراع عمـار	أستاذ اضر	(جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	رئيسا
-د. شيحي إ اعيـل	أستاذ اضر	(جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	تحنا
-د. وهاب عبد الوهاب	أستاذ اضر	(جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	تحنا
-أ.د. خلفاوي فتحـي	أستاذ تعليم عا	(جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	مقررا
-أ. بـلة زكيـة	أستاذة مساعدة ب	(جامعة قاصدي مرباح ورقلة)	مدعوة

تشكرات

الحمد و الشكر لله سبحانه و تعالى الذي وفقني في إنجاز هذا العمل

أتقدم بجزيل الشكر لكل من ساهم في إعداد هذه المذكرة خاصة:

الأستاذ المشرف **خلفاوي فتحي** أستاذ تعليم عالي بجامعة قاصدي مرباح على كل المجهودات التي بذلها و النصائح السامية التي قدمها لي خلال مسيرتي في إنجاز هذه المذكرة.

الأستاذ **بوكراع عمار** أستاذ محاضر بجامعة قاصدي مرباح ورقلة رئيس لجنة المناقشة. كما أشكر كلا من الأستاذ **شيحي إسماعيل** أستاذ محاضر بجامعة قاصدي مرباح ورقلة و الأستاذ **وهاب عبد الوهاب** أستاذ محاضر بجامعة قاصدي مرباح ورقلة، اللذين شرفاني بقبولهما مناقشة هذه المذكرة.

ولا يفوتني أن أتقدم بالشكر الجزيل للأستاذة **بلة زكية** أستاذة مساعدة بجامعة قاصدي مرباح ورقلة على كل ما قدمته لي من مساعدة و توجيه، كما شرفتني بقبولها كأستاذة مدعوة في لجنة المناقشة.

كما أشكر كل أعضاء فريق البحث بمخبر الإشعاع و البلازما و فيزياء السطوح بقسم علوم المادة جامعة قاصدي مرباح ورقلة. وأقدم خالص الشكر للزملاء و الزميلات: كلثوم، محمد، أسماء، زهية، سمية، حنان، يمينة، سعيدة، سالمة، فوزية، آمال.

أهدي ثمرة هذا الجهد للوالدين الكريمين و إخوتي و أخواتي ولكل الأقارب و الأصدقاء.

الـــفـــهـــرس

قـائـمة الـجـداول

قـائـمة الأشـكـال

الفصل الأول: عموميات حول البلازما و الرش ا هبطي

الفصل الثانــي : ـذجة بلازما التـفريغ الكهربائـي

الفصل الثالث: تطبيق وذج ا وائع على بلازما التفريغ الكهربائـي

الفصل الـرابـع: نتـائـج و ـليـل

المقدمـــة

المـقـدمـة

نظرا للإستخدام الكب للطبقات الرقيقة ا ال الصناعي، خاصة ال الإلكترونيات الدقيقة إذ تدخل تركيب ا ركبات الإلكترونية. اهتمت البحوث العلمية بدراسة طرق ض هذه الطبقات و الوسائط ا ستعملة فيها، و اتضح أن ا عدة تقنيات نذكر منها [1]:

- التوضع الكيميائي للطور البخاري (CVD : Chemical Vapor Deposition)
- التوضع الفيزيائي للطور البخاري (PVD : Physical Vapor Deposition)

تعتمد هاتان التقنيتان أساسا على عملية التفريغ ا توهج للغاز، و تتازان عن غ ا من التقنيات بإمكانية توضع ا واد العازلة والناقلة ونصف الناقلة [2]. تنقسم هاتان التقنيتان لعدة طرق، تلف باختلاف الوسائط ا ستعملة، وأكثرها شيوعا طريقة التوضع الكيميائي للطور البخاري باستعمال البلازما (PECVD : Plasma Enhanced CVD) وطريقة الرش ا هبطي.

علاوة عن ا زايا سالفة الذكر لطرق التفريغ ا توهج استفردت طريقة الرش ا هبطي بسرعة توضع ومردود رش كب ين، بالإضافة لإمكانية سينها بتطبيق حقول مغناطيسية موازية لسطح ا هبط[3]، أين يتم زيادة إمكانية تأين ذرات الغاز. تسمى هذه الطريقة بالرش ا هبطي ا غنطرو و تعتمد أساسا على وساطة البلازما. لتحس خصائص الطبقات ا توضعة بطريقة الرش ا هبطي ا غنطرو ركز الباحثون أكثر على دراسة البلازما ا ستعملة كوسيط، و ديد خصائصها الكهربائية وتأث العوامل ا اكروسكوبية على هذه ا صائص ريبيا أو نظريا.

تتم دراسة البلازما ريبيا باستخدام طرق التشخيص، كطريقة الإصدار الضوئي والتشخيص طياف الكتلة أو باستخدام التحليل الطيفي. و يعت مسبار لا م أكثر مشخص آ ذه العملية[4]. أما بالنسبة للدراسة النظرية فقد اقترحت عدة اذج كالنموذج ا ركي والنموذج ا هري والنموذج ا ج ، و وذج ا وائع الذي يدرس البلازما باعتبارها مائعا متجانسا يتميز قادير متوسطة، و ثلها ملة معادلات تفاضلية جزئية (معادلة الاستمرارية، معادلة ا فاظ الطاقة، معادلة ويل كمية ا ركة)، وهي معادلات مشتقة من ا عادلة الأصلية لبولتزمان، بتزاوجها مع

معادلة بواسن[5]. و لأن ا ل التحليلي ذه ا عادلات التفاضلية متعذر يصبح ا ل العددي ضروريا الدراسة النظرية.

هناك عدة طرق للحل العددي تعتمد على ديد ال الدراسة و ا اكاة نذكر منها[6]:

- طريقة الفروق ا نتهية.
- طريقة ا جوم ا نتهية.
- طريقة العناصر ا نتهية.

ر طريقة ا جوم ا نتهية رحلت أساسيت ، أولا زئة ال الدراسة إ حجوم عنصرية، مكاملة ا عادلات التفاضلية هذه ا جوم العنصرية[6].

عملنا هذا سنقوم بتحديد بعض ا صائص الكهربائية (الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية و ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي) لبلازما الأرغون ا ستخدمة لتوضع طبقات السيليسيوم بطريقة الرش ا هبطي ا غنطرو الثنائي. يغذى ا هاز(مهبط اسطوا) صدر جهد متناوب لتردد مذياعي RF تواتره(13.5 MHz). يتم هذا العمل بتطبيق وذج ا وائع لنظام مستقر حيث نقدمه أربعة فصول كما يلي:

الفصل الأول نتطرق فيه لدراسة موجزة عن البلازما بشكل عام. تعريفها و بعض ا فاهيم الفيزيائية صائصها كدرجة التأين، درجة ا رارة الإلكترونية، كثافة ا سيمات ا شحونة وكمون البلازما، بالإضافة لبعض خصائص ظواهر التفاعل كطول دوباي، طول لاندي و تردد التصادم، نتطرق لطرق توضع الطبقات الرقيقة حيث سنتكلم بشكل مفصل عن طريقة الرش ا هبطي و بالأخص الرش ا هبطي ا غنطرو .

الفصل الثا نقدم فيه أهم النماذج ا قترحة لنمذجة بلازما التفريغ الكهربائي، حيث سنتكلم بإ از عن النموذج ا ركي و النموذج ا هري و النموذج ا جـ . أما وذج ا وائع فسنتكلم عنه ببعض التفصيل إذ نتطرق عادلاته و معاملات الانتقال ا تتمثل معاملات ا ركية و الانتشار.

الفصل الثالث يتضمن وصف النموذج الذي اعتمدناه هذا البحث، بإعطاء ا عادلات ا تصف حركية ا سيمات بصفة عامة و صيغتها الإحداثيات ا ستعملة (الأسطوانية).

نقدم طريقة العا ة العددية و هي طريقة ا جوم ا نتهية. و الأخ نوضح طط س ا ساب العددي ا نا نا.

الفصل الرابع و الأخ ذه ا ذكرة نعرض فيه النتائج ا تحصل عليها للكثافة الالكترونية و الكثافة الأيونية و ا قل الكهربائي من خلال ا نامج. نبدأ با قارنة ب نتائجنا و نتائج باحث آخرين لإثبات صحة ا عادلات و مصداقية ا نامج. نقدم النتائج على شكل منحنيات و ذلك غياب ا قل ا غناطيسي و وجوده لإظهار تأث ه على هذه ا صائص. بالإضافة لذلك نتطرق إ تأث بعض العوامل ا اكروسكوبية على خصائص البلازما.

و الأخ نقدم حوصلة ا قمنا به خلاصة عامة، مع بعض الاقتراحات ا تبقى جهود البحث و قد تكون منطلقات لبحوث أخرى.

مـراجـع ا ـقـدمـة

[1] A. Moustaghfir ; ‘’ *Élaboration et caractérisation de couches minces d’oxyde de zinc. Application à la photoprotection du polycarbonate*’’ ; Thèse de doctorat, Université de Blaise Pascal (2004).

[2] A. Marie, J. Perrin.et J. Jolly, ’’*Plasmas froids de décharge’’*, Technique de l’ingénieur, D 2830.

[3] ز.بـلة، "الدراسة التشخيصية با اكاة العددية سبار كهربائي ساكن رش مهبطي"، ماجست ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2007)

[4] P. Scheubert ; *‘’Modeling and Diagnostics of Low Pressure Plasma Discharges’’*; Thèse de doctorat, Université de Munchen (2002).

[5] J. Balaji et S. Wei ;*’’Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer*’’; Progress in Aerospace Sciences 44 Vol.**139-191;** pp 140-188 (2007) .

[6] C. Vanhille; A. Lavie et C. Campos-Pozuelo ; *‘’Modélisation numérique en mécanique’’* ; Lavoisier (2007).

الفصــل الأول

عمــوميــات حــول البــلازمــا و الــرش ا هبــطــي

الفصـل الأول

عمـوميـات حـول البـلازمـا و الـرش ا هبـطـي

I-1. عموميات حول البلازماالباردة

ثل البلازما ا الة الرابعة للمادة، وهي عبارة عن غاز مؤين، حيث تش البلازما الباردة للغازات ضعيفة التأين، و توي على شحنات سالبة (إلكترونات وأيونات سالبة)، شحنات موجبة (أيونات موجبة) وجسيمات ايدة. تعت وسطا متعادلا كهربائيا يتميز بعدة خصائص ماكروسكوبية [1]. تتميز بعدة خصائص كهربائية تسمح لنا بتفس الظواهر الفيزيائية على مستوى البلازما كدرجة التأين، درجة ا رارة الإلكترونية، كمون البلازما، طول دوباي،......

ما يأ سنتطرق للتعريفات الفيزيائية لبعض هذه ا صائص.

I-1-1- درجة التأين:

ثل درجة التأين إحدى ا عاي لتصنيف البلازما. وتعرف بأ ا النسبة ب كثافة ا سيمات ا شحونة (إلكترونات، أيونات) و الكثافة الكلية للبلازما.تصاغ رياضيا با عادلة الآتية[2]:

$$\alpha = \frac{n_{e,i}}{n_{e,i}+n_N} \quad \text{(I-1)}$$

حيث:

$n_{e,i}$ ثل الكثافة العددية للجسيمات ا شحونة (إلكترونات وأيونات).

n_N ثل الكثافة العددية للجسيمات ا ايدة.

الغازات ضعيفة التأين (البلازما الباردة)تتراوح درجة التأين ب 10^{-6} و 10^{-4} و قق

$$\alpha < \alpha_0 \quad \text{(I-2)}$$

α_0 ثل القيمة ا رجة لدرجة التأين، يث تظهر أفعال البلازما

I-1-2-درجة الحرارة الإلكترونية و الأيونية:

درجة الحرارة الإلكترونية T_e تشير لدرجة حرارة الإلكترونات. و تعتبر الأكثر أهمية مقارنة بدرجة حرارة الجسيمات الأخرى (أيونات، جسيمات حيادة) في تحديد الظواهر التي تحدث في البلازما، إذ أن الإلكترونات هي العامل الأكثر فعالية في تأين البلازما. في نظام متوازن ترموديناميكيا درجة حرارة الإلكترونات تحقق المعادلة الآتية[3]

$$E_c = \frac{1}{2} m_e \langle V \rangle^2 = \frac{3}{2} K_B T_e \qquad \text{(I-3)}$$

حيث:

E_c تمثل الطاقة الحركية.

m_e كتلة الإلكترون.

V سرعة الإلكترون.

T_e درجة حرارة الإلكترونات بالكلفن.

K_B ثابت بولتزمان.

تعبر هذه المعادلة عن تساوي الطاقة الحركية المتوسطة للجسيمات مع طاقة التحريض الحراري. و بما أن كتلة الجسيمات المحايدة و الأيونات متقاربة فتكون لهم درجة حرارة متساوية و تقارب درجة حرارة الغرفة، بخلاف الإلكترونات التي تكون لها درجة حرارة مرتفعة.

I-1-3 كثافة الجسيمات و دوال التوزيع:

كثافة البلازما N تمثل عدد الجسيمات في وحدة الحجم لكل صنف(أيونات، إلكترونات، جسيمات حيادية)، و يخضع توزيعها لعبارات إحصائية تدعى دوال التوزيع التي تصف عدد الجسيمات في اللحظة t و الموضع بين r و r+dr، حيث:

f -دالة في الزمن و الموضع و السرعة.

$$f \equiv f(t, r, v) \qquad \text{(I-4)}$$

الفيزياء الإحصائية تميز ثلاث دوال لتوزيع الجسيمات.

- توزيع فيرمي ديراك
- توزيع بوز–إنشتاين
- توزيع ماكسويل بولتزمان

إذا كان الغاز حالة توازن ترموديناميكي و طاقة التفاعل بـ ا سيمات مهملة أمام الطاقة ا ركية فإن ا سيمات ضع لتوزيع ماكسويل بولتزمان، الـ تعـ عن التصادمات أثناء ا ركة العشوائية و تكتب دالة توزيع السرعات هذه ا الة كما يلي[4] :

$$f_m = \left(\frac{m}{2\pi K_B T}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{-mv^2}{2K_B T}\right) \qquad \text{(I-5)}$$

K_B، T، m ثل على الترتيب ثابت بولتزمان درجة ا رارة وكتلة ا سيم.

و قق هذا التوزيع كامل ا جم الذي يشغله العلاقة التالية[5]:

$$\int_{R^3} f(v)\,dV = 1 \qquad \text{(I-6)}$$

I-1-4 تردد البلازما:

عند حدوث إضطراب داخلي أو خارجي البلازما فإنه يؤدي إ إزاحة جسيماتا (إلكترونات، أيونات) عن وضع التوازن ذلك بسبب تراكم الشحنات الكهربائية، لكنها سرعان ما تعود التها الطبيعية[6].هذا التصرف الذي تتميز به البلازما يؤدي إ حركة جسيماتا حركة إهتزازية غ متخامدة تتميز بنبض ا ركة الإلكترونية و الأيونية $\omega_{p_{e,i}}$ حيث[7]

$$\omega_{p_{e,i}} = \sqrt{\frac{q^2 n_{e,i}}{\epsilon_0 m_{e,i}}} \qquad \text{(I-7)}$$

كما تتميز هذه ا ركة بالتردد الإلكترو و الأيو :

$$f_{p_{e,i}} = \frac{\omega_{p_{e,i}}}{2\pi} \qquad \text{(I-8)}$$

$$f_{p_e} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \qquad \text{(I-9)}$$

$$f_{p_i} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{q^2 n_i}{\epsilon_0 m_i}} \qquad \text{(I-10)}$$

عدديا د:

$$f_{p_e} = 9000\sqrt{n_e} \qquad \text{(I-11)}$$

يث التردد f_{pe} ب Hz و كثافة الشحنة الالكترونية n_e ب cm^{-3}

با قارنة بـ تردد البلازما والتردد ا طبق من طرف ا ولد f يز ثلاثة أنواع للبلازما[8]

➢ **بلازما الترددات ا نخفضة:** $f < f_{p_i} < f_{p_e}$

الإلكترونات و الأيونات تتصرف وفقا للحقل ا طبق.

➢ **بلازما ذات التردد ا ذياعي (ا كروويف):** $f_{p_i} < f < f_{p_e}$

يتراوح بـ $1MHz \sim 0.5GHz$

الأيونات تنحبس داخل البلازما أما الإلكترونات فتتصرف وفقا للحقل ا طبق.

➢ **بلازما الترددات ا رتفعة :** $f_{p_i} < f_{p_e} < f$

يتراوح بـ $500MHz \sim GHz$

الإلكترونات و الأيونات لا تتصرف وفق ا قل ا طبق.

I-1-5 كمون البلازما و الكمون العائم :

إن حيادية البلازما تؤدي ا إنعدام ا قل الكهربائي، ا عل الكمون الكهروستاتيكي وامل الشحنة ثابتا قلب البلازما يسمى هذا الكمون **بكمون البلازما.**

أماجدران الغرفة ا يطة بالبلازما فيكون الكمون عندها موجبا، وبسبب ا ركية الكب ة للإلكترونات فإن عدد الإلكترونات الواردة للجدران يكون أكـ من عدد الأيونات، بالتا تشحن بكمون سالب بالنسبة لكمون البلازما، يسمى **الكمون العائم**. وهو كمون جاذب للأيونات، حيث تتشكل بالقرب من ا دران منطقة **الغمد الأيونـي**[9].

I-1-6 طول دوباي:

هو ا سافة ا يتم عندها ا جب الكولو لأي شحنة كهربائية البلازما، و تصاغ رياضيا بالعلاقة الآتية[10-11]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 K_B T_e}{n_e e^2}} \quad \text{(I-12)}$$

بالتطبيق العددي د.

$$\lambda_D(cm) = 9.6\sqrt{\frac{T_e(K)}{n_e(cm^{-3})}} \quad \text{(I-13)}$$

I-1-7 متوسط المسار الحر و المقطع الفعال للتصادم :

متوسط المسار الحر λ يعبر عن المسافة المتوسطة للجسيم (إلكترون، أيون، جسيم محايد) بين تصادمين متتاليين [3]، وتتعلق بسرعة الجسيم و احتمالية التصادم، و نكتب:

$$\lambda = \frac{1}{\sigma n_p} \qquad (1\text{-}14)$$

σ تمثل المقطع الفعال للتصادم حيث

$$\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2 \qquad (1\text{-}15)$$

r_1 وr_2 تمثلان نصفي قطري الجسيمات المتصادمة.

n_p الكثافة العددية للجسيمات.

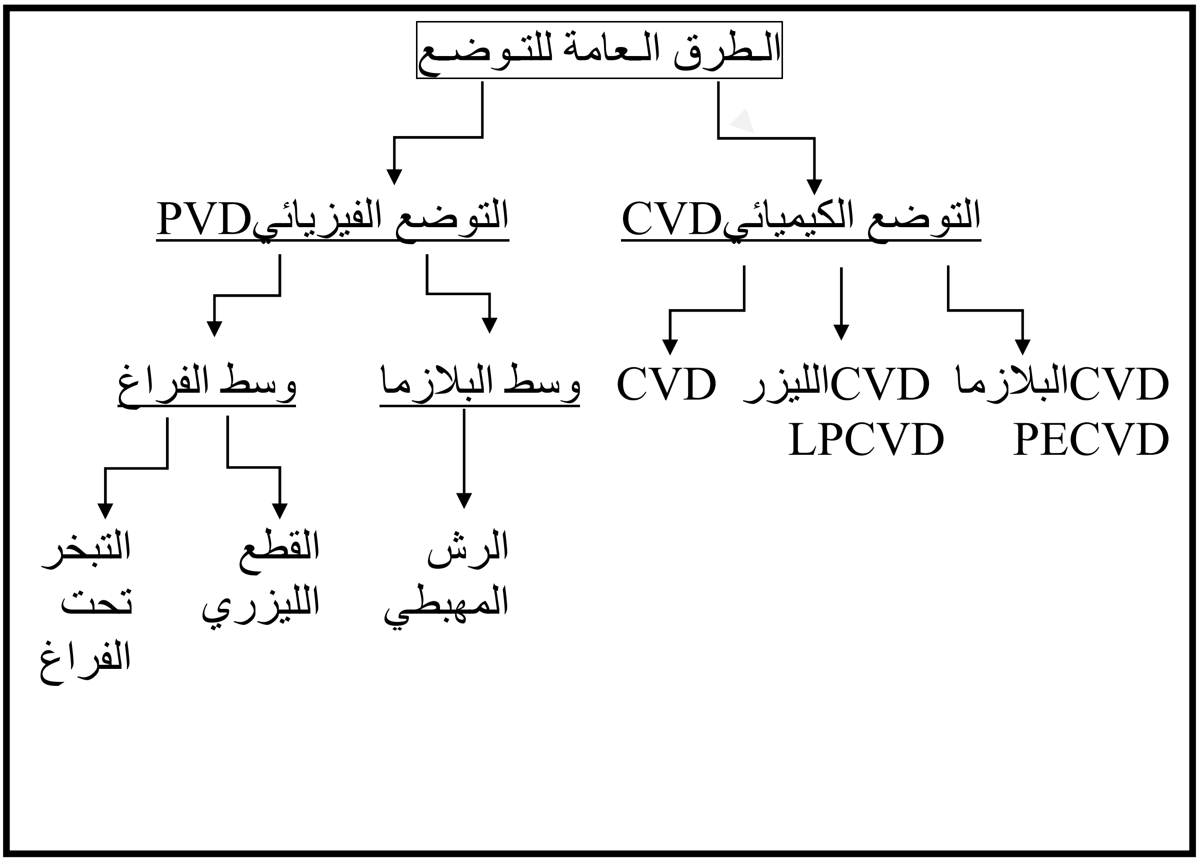
I-2.الرش المهبطي:

I-2-1.الطرق العامة لتوضع الطبقات الرقيقة:

توجد عدة طرق لتوضع الطبقات الرقيقة تصنف حسب التقنية :

- التوضع الفيزيائي للطور البخاري PVD
- التوضع الكيميائي للطور البخاري CVD

المخطط أدناه يلخص أهم هذه الطرق وفقا لهاته التقنية [12]



الشكل(I-1): مخطط تصنيف طرق توضع الطبقات الرقيقة[13]

1. ***التوضع الكيميائي للطور البخاري***: [CVD: Chemical Vapor Deposition]

هذه الطريقة مستعملة بكثرة لإعداد الطبقات الرقيقة، وهي تعتمد على التفاعل الكيميائي ب مكونات الغاز لتتوضع على ا سند مشكلة طبقة رقيقة [14]، حيث تتدخل هذه الطريقة عدة وسائط كالضغط، و درجة ا رارة، و البلازما....إ ، و هذا ما يز تصنيفها إ عدة أصناف:

- تأث الضغط يعطي LPCVD حالة الضغوط ا نخفضة وHPCVD إذا كان الضغط مرتفعا.
- إذا كان الوسيط ا ستعمل بلازما تتحول CVD إ PECVD للحصول على التوضع، وذلك درجات ا رارة ا نخفضة.

2. *التوضع الفيزيائي للطور البخاري*: [PVD: Physical Vapor Deposition]

تعتمد تقنية التوضع الفيزيائي للطور البخاري على عملية التبخر ا راري للمواد ت الضغوط ا نخفضة، و ا عدة يزات مقارنة بطريقة CVD، فهي غ ملوثة كما أن الطبقات ا توضعة تكون كثيفة و سهلة ا راقبة.

ومن ب طرق التوضع البخاري للطور الفيزيائي الأكثر استعمالا د طريقة الرش ا هبطي ،وهي الطريقة ا عتمدة عملنا هذا، وال سنتكلم عنها بشكل موسع الفقرات ا والية.

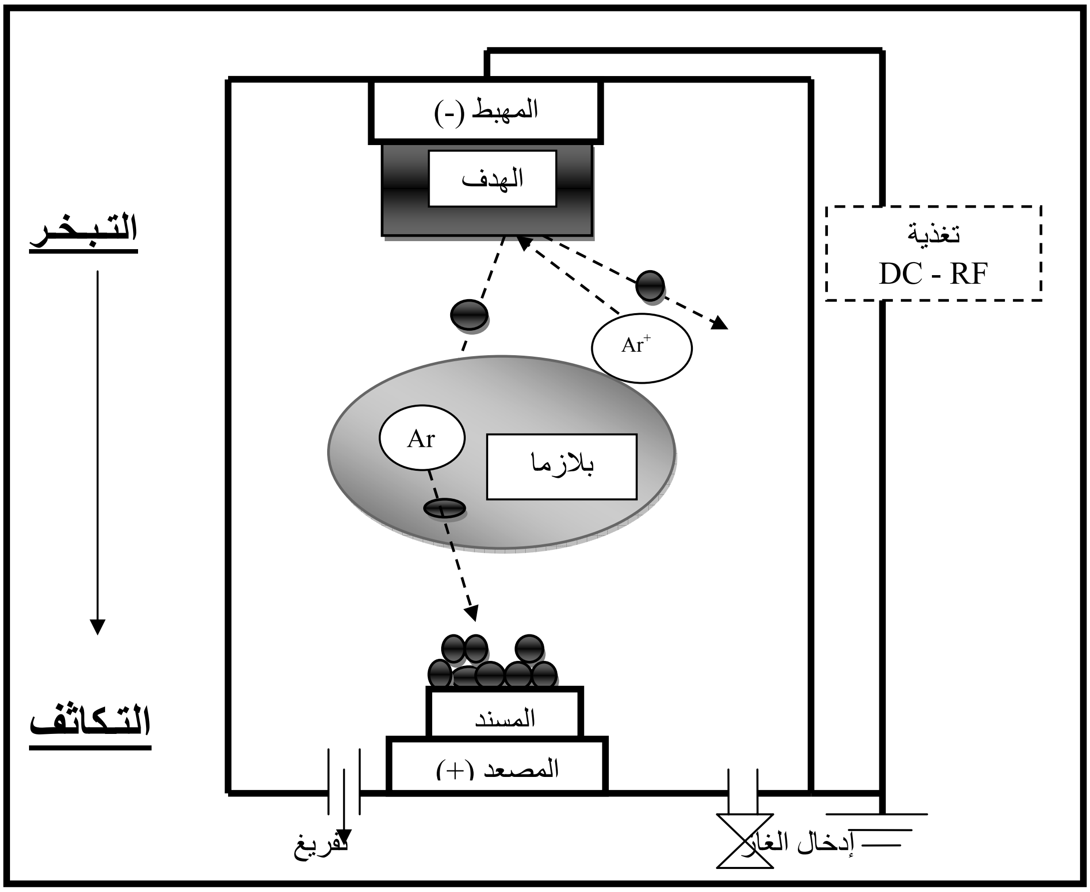
I-2-2. *التوضع بطريقة الرش ا هبطي*:

ظهرت هذه الطريقة منذ 1852 من طرف Grove Pluker [5]، الذي أثبتها باستخدام التفريغ الكهربائي ب إلكترودين ناقل (مصعد و مهبط)، يفصل بينهما فراغ توي على غاز خامل ضغط منخفض، حيث ظهرت على ا صعد شرائح رقيقة. استغرقت هذه الظاهرة وقتا طويلا و ذلك لتأث عدة عوامل منها مدة حياة الذرات، و مع مرور الزمن ت دراستها و تطويرها لإنتاج أسرع للطبقات الرقيقة.

I-2-2-1. ا بدأ العام للرش ا هبطي:

ثل الشكل (I-2) الرسم التخطيطي بدأ الرش ا هبطي، والذي يتمثل إقتلاع ذرات مادة ا دف بواسطة قذفها بأيونات طاقوية نا ة عن التفريغ الكهربائي للغاز (الغاز ا ستخدم عموما يكون غازا خاملا كغاز الأرغون) [10].

تثبت مادة ا دف على ا هبط الذي مل جهدا سالبا (3 إ 5 kV) بالنسبة للمصعد و موازيا له تفصل بينهما مسافة بضع سنتيمترات (ب 3 و 5 cm). إذا كان الضغط ا طبق ب اللبوس يتراوح ب ($1\sim10^2$ Pa) تتسارع الأيونات الطاقوية ت تأث ا قل الكهربائي الناتج، متجهة و ا هبط فتتصادم مع مادة ا دف و يتبادلان كمية ا ركة ما بينهما، ينتج عن ذلك اقتلاع ذرات ايدة كهربائيا، تتوضع على صفيحة مستوية متصلة با صعد تسمى ا سند، مشكلة شر ة هرية ثل الطبقة الرقيقة [16].



الشكل (2-I) : رسم طيطي بدأ الرش ا هبطي

تتميز هذه الظاهرة با ردود S و الذي ثل النسبة ب الذرات ا قتلعة و الذرات الواردة.

$$S = \frac{N_p}{N_i} = \frac{\text{عدد الذرات ا قتلعة}}{\text{عدد الذرات الواردة}}$$

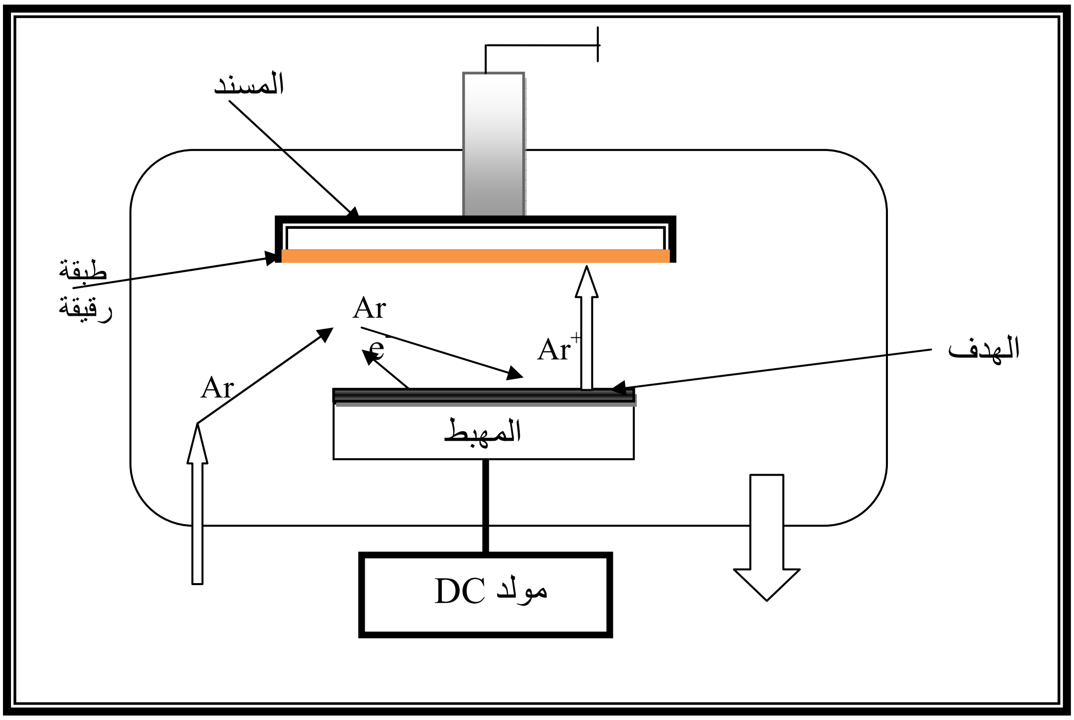
يتعلق هذا ا ردود با عاملات التالية:

- ✓ طبيعة ا دف (ا ادة و حالة السطح)
- ✓ طبيعة الأيونات الواردة (أيونات غاز نادر أو غاز فعال)
- ✓ طاقة الأيونات الواردة
- ✓ زاوية الورود

I-2-2-2.أنواع الرش ا هبطي:

1- الرش ا هبطي ا ستمر

الرش ا هبطي ا ستمر يسمح فقط بتوضع ا واد الناقلة أو نصف الناقلة، حيث يتم تطبيق جهد سالب و مستمر على ا هبط، ا يولد تفريغا كهربائيا (تأين الغاز) و ظهور أيونات طاقوية ذات طاقة حركية عالية، تتجه و ا هبط لاقتلاع ذراته و ترسبها على ا سند، مشكلة طبقة رقيقة [17].



الشكل (I-3) : رسم طيطي للرش ا هبطي ا ستمر DC

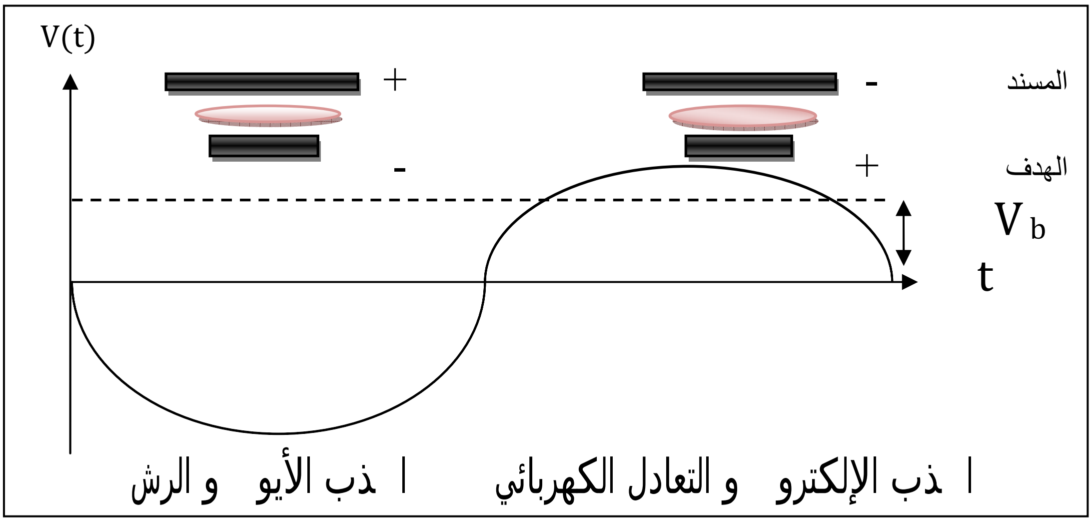
2- الرش ا هبطي ا تناوب:

ذكرنا الفقرة السابقة أن الرش ا بطي ا ستمر يسمح فقط بتوضع ا واد الناقلة و نصف الناقلة، أما إذا كانت مادة ا دف، عازلة فإن ا هد ا ستمر ا طبق لا كنه فصل الشحنات ا مولة مع الأيونات، و ا تتراكم على سطح ا دف، مشكلة الا كهربائيا يعمل على إبعاد الأيونات [18]. إذا طبقنا جهدا متناوبا يزول فعل هذا ا ال الكهربائي خلال الإهتزازة السالبة منها حيث يتم ا ذب الأيو و ا هبط إ أن يشحن بكمون موجب. هذه ا رحلة دث عملية الرش،

و توضع الطبقات، أما خلال الاهتزازة ا وجبة من هذا الإستقطاب تتسارع الإلكترونات و ا هبط و دث التعادل الكهربائي ب الشحنات ا وجبة و الإلكترونات.

- **الإستقطـاب الذاتـي للمهبـط:**

تنتمي الترددات ا طبقة الرش ا هبطي ا تناوب للمجال [1~30 MHz]، وتعة الإشارة (13.56MHz)أحسن تردد عملي هذا ا ال، حيث تكون الأيونات شبه ساكنة بالنسبة للإلكترونات ا تتميز ركية كب ة، نتيجة لفارق الكتلة بينهما تسمح، ا بالتسارع و ا هبط ح يشحن بكمون سالب تسمى هذه الظاهرة **بالاستقطـاب الذاتـي**. هذا ا هد مهم عملية التوضع، و يلعب دور ا هد ا سرع للأيونات ح تقذف مادة ا دف (ا هد السالب ا طبق الرش ا هبطي ا ستمر)، و يتأثربصفة مباشرة بطاقة هذه الأيونات، و بالنتيجة يتم التأث على سرعة التوضع.



الشكل (4-I) : مبدأ الرش ا هبطي ا تناوب

3- الرش ا هبطي للصمام الثلاثي (PCT : Pulvérisation Cathodique Ttriode)

لتسهيل عملية إنتاج إلكترونات إضافية لتأين الغاز كن استعمال سلك ساخن يلعب دور مصعد ثان يطبق عليه استقطاب سالب بالنسبة للبلازما، و يتم إخراج الإلكترونات الصادرة حراريا للحفاظ على هذا الإستقطاب و التقليل من إمكانية إعاقة عملية التوضع، تدعى هذه

الطريقة بطريقة الرش ا بطي للصمام الثلاثي (PCT)، وتكون سرعة التوضع فيها مرتفعة، و لك الطبقات ا توضعة كب ا نوعا ما.

I-2-2-3 الرش ا هبطي ا غنطرونـي:.

الضغط ا طبق من أجل الرش ا هبطي العادي يتراوح عموما ب (1~100 Pa)، هذا ا ال من الضغوط متوسط ا سار ا ر للإلكترونات يكون صغ ا بالنسبة لطول غمد البلازما، ا يؤدي لزيادة احتمالية تصادم الأيونات و تباد ا للطاقة ا ركية قبل وصو ا لسطح ا دف، فيكون هناك ا فاض مردود الرش ا هبطي وسرعة توضع الطبقات.

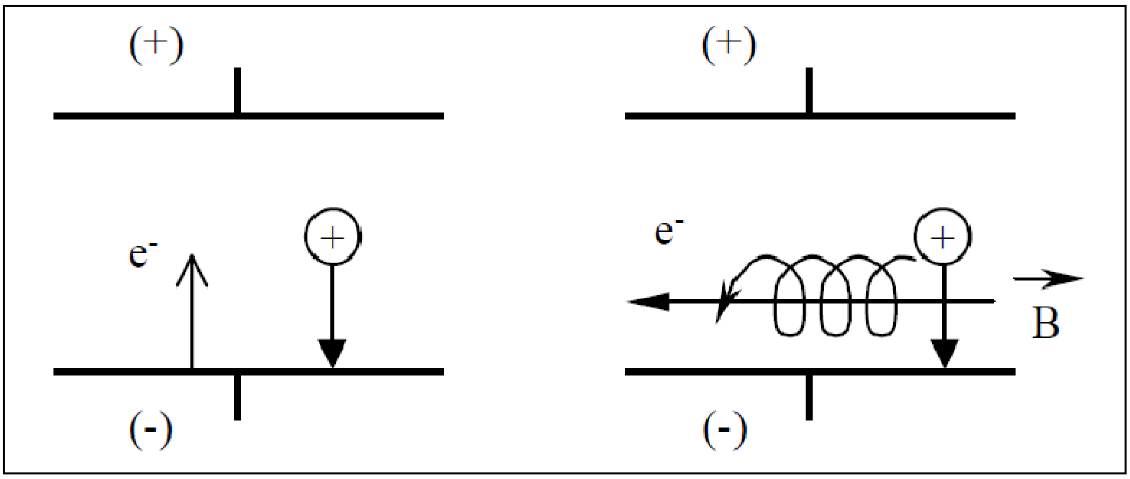
عا ة هذا الإشكال تطوير ا هابط ا غنطرونية ذب الإلكترونات ا اورة للمهبط وزيادة كثافتها حوله، وبالتا زيادة نسبة التأين و سرعة التوضع و ا فاض ا هد ا طبق.

I-2-2-3-1.التـأثـ ا غنطرونـي:

إن تراكب ا قل الكهربائي $\vec{E}$ لغمد البلازما و ا قل ا غناطيسي $\vec{B}$ا طبق يؤثر على الشحنات الكهربائية بقوة لورنتز حيث:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad \text{(I-16)}$$

ا قل ا غناطيسي ا طبق $\vec{B}$ بس الإلكترونات ا اورة للهدف إذا كان تردد التصادم (إلكترون–أيون) أصغر من التردد السيكلترو للإلكترونات، و يغ مساراتا إ مسارات دائرية حول خطوط ا قل ا غناطيسي، ا يزيد من كثافتها هذه ا نطقة بالقرب من ا دف. حيث تسمح بارتفاع نسبة تأين ذرات الغاز، و بالتا زيادة القذف الأيو للهدف، الذي ينتج عنه ارتفاع مردود الرش ا هبطي و سرعة التوضع [19].



الشكل (I-5) : تأث ا قل ا غناطيسي على مسار الإلكترونات

الرش ا هبطي ا غنطرو يسمح با صول على سرعة توضع للطبقات الرقيقة أكثر منها الرش ا هبطي العادي، و تتعلق هذه السرعة بـ :

- ✓ ا ادة ا توضعة
- ✓ غاز التفريغ ا ستعمل.
- ✓ ا سافة ب ا سند و ا دف.
- ✓ الضغط: السرعة تتناقص كلما زاد الضغط ا طبق.
- ✓ كثافة الإستطاعة الإلكترونية ا طبقة على ا دف.

ا دول (I-1) يب مقارنة ب خصائص الرش الـ مهبطي العادي و الرش ا هبطي ا غنطرو

نوع التفريـغ	عـادي (مستمر– متناوب)	مغـنطرونـي
الضغط	1 ~100Pa	0.1~10 Pa
متوسط ا سار ا ر	<1cm	> 1 cm
التيار الأيو على ا دف	$1mA.cm^{-2}$	$>10mA.cm^{-2}$
ا هد ا طبق	1.5 ~3 KV	<1KV
سرعة التوضع	$5 \sim 50\ nm.min^{-1}$	$=\mu m.min^{-1}$

جدول (I-1) : مقارنـة ب خصائص الرش الـ مهبطي العـادي و الرش الـ مهبطي الـ مغنطرو

I-2-2-3-2. أنواع ا هابط ا غنطرونية:

تصنف ا هابط ا غنطرونية حسب إ اه خطوط ا قل ا غناطيسي إ نوع [20]:

- ا غنطرون ا توازن:

تكون فيه يع خطوط ا قل ا غناطيسي مغلقة على سطح ا هبط

- ا غنطرون غ ا توازن:

خطوط ا قل ا غناطيسي هذا النوع تكون مغلقة و مفتوحة (بعضها متجه و سطح ا هبط و البعض الآخر متجه و ا ارج) [20]

- ✓ النوع الأول: تكون الإلكترونات ا نبعثة من ا هبط منحرفة والتيار الأيو الذي يسري ا اه ا صعد ا رتبط بالكتلة يكون كب ا جدا بالنسبة للتيار الإلكترو .
- ✓ النوع الثا : تتقارب الإلكترونات من وسط ا هبط وتقودها با اه ا صعد، هذه ا الة يكون التيار الإلكترو أك من التيار الأيو الذي يسري ا اه ا صعد ا رتبط بالكتلة.

كلا النوع ا هبط ا غنطرو يأخذ إما الشكل ا ستوي (ا سطح–الدائري) أو الشكل الأسطوا [20].

مـراجـع الفـصل الأول:

[1] D. R. Nicholson; *"introduction to plasma theory"*; University of lowa; John Wiley & Sons (1983).

[2] J. L. Delcroix, A. Bers, *"physique des plasmas"*, Ed. CNRS ; Paris (1994).

[3] J. M. Rax ; *''physique des plasmas cour et applications''* ; Dunod ;Paris (2005).

[4] L. R. Jean, *''Introduction `a la Physique des Plasmas''* ; cours de Master Physique Appliquée et Mécanique, Université Paris-Sud (2011).

[5]P. M. Bellan,*''Fundamentals of Plasma Physics''*, Pasadena; California (2004).

[6] P. Fauchais, *''Gaz ionisé et plasma''*, Technique de l'ingénieur, AF.60.

[7] R. O. DENDY, *''Plasma Dynamics'';* Oxford Academic; Pres (1990).

[8] E. Konies and K. Kieger; summer university for plasma physics september 27-october 1 (2004).

[9] R. Fitzpatrick; *''introduction to plasma Physics'';* the University of Texas; a graduate level lecture course; spring 1998.

[10] ز.بـلة، "الدراسة التشخيصية با اكاة العددية سبار كهربائي ساكن رش مهبطي"، ماجست ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة(2007).

[11] A. Marie ; J. Perrin.et J. Jolly, *''Plasmas froids de décharge''*, Technique de l'ingénieur, D 2830, pp (4, 6-8).

[12] V. Edon ; *''Dépôt d'oxydes de grille par pulvérisation cathodique magnétron corrélation entre les propriétés du plasma et celles des films déposés''* ; Thèse de doctorat, Université Paris-Sud (2007).

[13] D. Benzeggouta; *''Etude de procédés de dépôts de films minces par décharge magnétron fortement ionisée'';* Thèse de Doctorat; Université Paris-Sud(2008)

[14] Y. Jiang; *''Pulvérisation cathodique assistée par ordinateur''*; Thèse de doctorat, Université Pris xi Orsay (1992).

[15] D. Depla et S.Mahieu ; *''Reactive sputter deposition''* ; Springer Berlin Heidelberg ; New York (2008).

[16] F. O. Hassani ; *''couches minces d'oxydes spinelles et nano composites spinelles-CuO A propriétés semi-conductrice destinées A la réalisation de capteurs de gaz '' ;* Thèse de doctorat, Université de Toulouse (2009).

[17] Y. Benzahi ; *''simulation numérique par la dynamique moléculaire de l'interaction de plasma-surface lors de déposition sur couches minces''* ; Mémoire de magister Université de Ouargla (2003).

[18] J.J. Bessot ; *''dépôt par pulvérisation cathodique''* ; Technique de l'ingènieur ; M1657.

[19] C. Manasterski ; *''la pulvérisation cathodique industrielle''*; Presses Polytechniques et universitaires romandos (2005).

[20] F. Ledrappier, Thèse doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, (2004).

الفصل الثاني

ـذجة بلازما
التفريغ الكهربائي

الفصـل الثـانـي

ـنذجـة بـلازمـا التـفريـغ الكـهربـائـي

تعتـ الدراسة النظرية أداة مهمة و مكملة للعمل التجري ، حيث تتم دراسة بلازما التفريغ الكهربائي نظريا إما بوصفها على شكل مائع أو فضاء حركي، حيث تسمح لنا هذه الدراسة بتحديد:

- ❖ التغـ الزمـ و ا وضعي للخصائص الكهربائية كا قل الكهربائي، الكمون الكهربائي، ا ميز تيار-جهد.
- ❖ الكثافة و دالة توزيع الطاقة للجسيمات ا شحونة و التغـ الزمـ و ا وضعي ا طابق ا.
- ❖ نسبة (تردد) تلف عمليات التصادم كالتأين و الإثارة و الالتحام.

اختلفت النماذج ا طبقة على البلازما و يز منها:

- النموذج ا ركـي.
- النموذج ا زيئي (ا هري).
- النموذج الكهربائي.
- وذج ا وائع.
- النموذج ا جـ .

هذا الفصل سنقدم شرحا وافيا ذه النماذج، خاصة وذج ا وائع ا طبق عملنا هذا.

1-II.النمـوذج ا ركـي:

يرتكز هذا النموذج على ا ل ا باشر عادلة بولتزمان ا تعلقة بالزمن، و معادلة غوص بصيغتها التفاضلية آن واحد لتحديد دالة توزيع السرعات أو طاقة ا سيمات ا شحونة، و منها ديد ا صائص ا هرية للبلازما[1].

تع معادلة بولتزمان عن تأث ا قل الكهربائي ا طبق E و تأث التصادمات على دالة التوزيع $f(\vec{r},\vec{V},t)$ ثل كثافة ا سيمات ا شحونة الزمن t و ا جم ب r و r+dr والسرعة ب $\vec{V}$ و $(\vec{V}+\vec{dv})$ ونكتب [2]

$$\underbrace{\frac{\partial f}{\partial t}}_{a}+\underbrace{\vec{V}.\vec{\nabla}_r f}_{b}+\underbrace{\frac{\vec{F}}{m}.\vec{\nabla}_v f}_{c}=\underbrace{\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll}}_{d} \qquad \text{(II.1)}$$

$\vec{V}$ سرعة ا سيمات ا شحونة.

$\vec{F}$ القوة ا طبقة على البلازما لأي جسيم مشحون حيث:

$$\vec{F}=q(\vec{E}+\vec{V}\times\vec{B}) \qquad \text{(II.2)}$$

وهي تع عن قوة لورنتز، حيث $\vec{E}$ و $\vec{B}$ ا قل الكهربائي و ا قل ا غناطيسي على التوا .

$\vec{\nabla}_r$ ا ؤثر التفاضلي الشعاعي لفضاء الإحداثيات.

$\vec{\nabla}_v$ ا ؤثر التفاضلي الشعاعي لفضاء السرعات.

حيث ثل ا دود:

- a التغ الزم لدالة التوزيع.
- b عبارة الإنتشار الفضائي للجسيمات الذي يعيد النظام إ حالة التجانس.
- c تأث القوى ا ارجية على ا سيمات.
- d تغ دالة التوزيع ت تأث التصادمات مع ا سيمات ا يادية.

أما معادلة غوص فهي ثل ا عادلة الثالثة عادلات ماكسويل، وهي تع عن تغ ا قل الكهربائي (أو الكمون) بدلالة شحن الفضاء، وتعطى صيغتها التفاضلية كما يأ :

$$\vec{\nabla}.\vec{E}=\frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad \text{(II.3)}$$

ρكثافة الشحنة.

ε_0السماحية الكهربائية للفراغ.

إن حل معادلا بولتزمان و غوص آن واحد يكون صعبا نوعا ما و ا يزيده تعقيدا ظهور حد التصادم، و بالتا نلجأ للطريقة ا زيئية اا تعتمد على ا اكاة بطريقة مون كارلو[3].

II-2- النـموذج ا ـجـهـري (ا زيئي):

هذا النموذج تكون ا ركة الفردية لكل جسيم مشحون ددة بدالة توزيع السرعات$f(\vec{r},\vec{V},t)$. ولتحديد هذه الدالة نلجأ للحل التزام عادلا بولتزمان و بواسن. لا نستع هنا بالطرق العددية كطريقة الفروق ا نتهية، العناصر ا نتهية،...... إ ا نستخدم الطريقة العشوائية، حيث نأخذ عددا منتهيا من ا سيمات ا شحونة، حيث تتأثر حركية هذه ا سيمات فضاء الطور (r,v) با قل الكهربائي وفعل التصادمات.

لتحديد تأث ا قل الكهربائي نكامل معادلة ا ركة ب تصادم اثن ال زم منتظم، أما تأث التصادمات فيعا إحصائيا حسب طريقة مون كارلو، حيث نع العدد العشوائي، و ترتبط كثافة الاحتمال با قاطع الفعالة للتصادمات. دد كل ظة طبيعة التصادم، مسارات ا سيمات بعد التصادم[4].

3-II نـموذج الـمـوائـع:

لدراسة بلازما التفريغ الكهربائي بنموذج ا وائع لا كن حساب دوال التوزيع، إ ا تم بتحديد القيم ا توسطة للمقادير ا اصة با سيمات ا شحونة كالكثافة و السرعة ا توسطة و الطاقة. تتم هذه الدراسة ل ا عادلات الثلاثة ا تصف التغ ات ا وضعية و الزمنية ذه القيم، و هي معادلة الاستمرارية، معادلة كمية ا ركة، معادلة ا فاظ الطاقة، و هي موعة معادلات تفاضلية جزئية، كن حلها بالطرق العددية.

يسمح لنا هذا النموذج ساب توزيع ا قل الكهربائي و الكثافة والطاقة لكل جسيم داخل البلازما، وكذا تأث العوامل ا اكروسكوبية عليها كالضغط، ا هد ا طبق... [5].

يعتمد هذا النموذج على تقريب أساسي :

- تقريب ا قل ا لي (ACL: l'Approximation du Champ Local)
- تقريب الطاقة ا لية (AEL: l'Approximation de l'Energie Local)

تقريب ا قل ا لي (ACL) معاملات انتقال الإلكترونات و نسبة التفاعل تكون دوال ا قول الضعيفة $\frac{E(r,t)}{P}$، حيث E(r,t) ا قل الكهربائي ا وضع r و اللحظة t و P ضغط الغاز. حالة التوازن الطاقة ا كتسبة من الإلكترونات تعادل الطاقة الضائعة بفعل التصادمات[6].

أما تقريب الطاقة ا لية (AEL) فمعاملات انتقال الإلكترونات و نسبة التفاعل تكون دوال الطاقة ا توسطة للإلكترونات[7].

1-3-II ا عادلات الأساسية لنموذج ا وائع:

ثل معادلات وذج ا وائع العزوم الثلاثة الأو عادلة بولتزمان. ويتم ا صول عليها كاملة هذه ا عادلة فضاء السرعات، حيث تع معادلة الاستمرارية عن كثافة ا سيمات، و معادلة كمية ا ركة عن السرعة ا توسطة أما معادلة حفظ الطاقة فهي تع عن الطاقة ا توسطة للإلكترونات.

1. مـعادلة كـمية الـحركة:

ثل هذه ا عادلة العزم الثا عادلة بولتزمان وتكتب على الشكل الآ [8]:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\left(n_{e,i}m_{e,i}\langle\vec{V}\rangle\right)}_{1} + \underbrace{\vec{\nabla}\left(n_{e,i}m_{e,i}\langle\vec{V}\vec{V}\rangle\right)}_{2}$$

$$= \underbrace{-\vec{\nabla}P}_{3} + \underbrace{n_{e,i}\vec{F}}_{4} - \underbrace{n_{e,i}m_{e,i}\langle\vec{V}\rangle\nu_{m_{e,i}}}_{5} \qquad \text{(II.4)}$$

حيث:

$m_{e,i}$ كتلة ا سيمات ا شحونة

$\langle\vec{V}\rangle$ السرعة ا توسطة للجسيمات ا شحونة

ν_m تردد تصادم ا سيمات

P تد الضغط فإذا كان موحد ا واص يأخذ القيمة $P = nKT$

K ثابت بولتزمان و T درجة حرارة ا سيمات

ثل حدود ا عادلة (II.4)

1. التسارع ا لي.
2. العطالة.
3. ا ركة النا ة عن تدرج الضغط.
4. حركة ا سيمات ت تأث القوة النا ة عن ا قول ا غناطيسية و الكهربائية.
5. كمية ا ركة ا تبادلة على خلفية تصادم ا سيمات.

يكون الطرف الأيسر من ا عادلة $(II.4)$ معدوما نتيجة تطبيق ا ؤثر التفاضلي و عليه فإن سرعة ا سيمات تصبح:

$$\vec{V} = \frac{1}{m\nu_m}\left(q\vec{E} - \frac{1}{n}\vec{\nabla}(nKT)\right) \qquad (II.5)$$

وتعطى كثافة تدفق ا سيمات ا شحونة بالشكل الآ :

$$\vec{J}_{e,i} = n_{e,i}\vec{V} \qquad (II.6)$$

بتعويض ا عادلة $(II.6)$ ا عادلة $(II.5)$ صل على:

$$\vec{J}_{e,i} = -D_{e,i}\vec{\nabla}n_{e,i} \mp n_{e,i}\mu_{e,i}\vec{E} \qquad (II.7)$$

$\mu_{e,i}$معامل حركية ا سيمات ا شحونة

$D_{e,i}$ معامل انتشار ا سيمات ا شحونة

تعرف ا عادلة (II.7) بتقريب انتشار الإ راف (drift diffusion)، وتستعمل بدلا من ا عادلة الكاملة لكمية ا ركة، و خاصة حالة الضغوط ا نخفضة [9].

2. مـ عادلة الـ طاقـ ة:

ثل معادلة الطاقة العزم الثالث عادلة بولتزمان، وتكتب بالصيغة الرياضية التالية [10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(n.m\langle\vec{V}^2\rangle/2\right) + \vec{\nabla}.\left(nm\langle\vec{V}^2\vec{V}\rangle + \vec{\nabla}.\vec{V}.P + \vec{\nabla}.\vec{Q} - n\vec{F}.\langle\vec{V}\rangle\right) = R_{em} \qquad (II.8)$$

حيث

$\vec{Q}$ شعاع النقل ا راري و يعطى بـ :

$$\overrightarrow{Q} = nm\langle\vec{V}^2.\vec{V}\rangle/2 \qquad (II.9)$$

R_{em}الطاقة الضائعة بفعل التصادمات.

كن تعريف ا قادير التالية [10]

$$\begin{cases} \langle E\rangle = m\langle \vec{V}^2\rangle/2 = m\left(\vec{V}^2 + \langle \vec{V}_t^2\rangle\right)/2 \\ q = nm\langle \vec{V}^2\rangle \frac{\vec{V}}{2} + \vec{V}P + \vec{Q} = \vec{J}\langle E\rangle + \vec{V}P + \vec{Q} \end{cases} \quad \text{(II.10)}$$

q شعاع التدفق الكلي

بتعويض المقدارين $\langle E\rangle$ و q في المعادلة (II.8) نحصل على العبارة الأخيرة لمعادلة الطاقة

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\langle E\rangle) + \vec{\nabla}.\vec{q} - n\vec{F}.\vec{V} = R_{em} \quad \text{(II.11)}$$

3. *معادلة الاستمرارية*:

تمثل العزم الأول لمعادلة بولتزمان و هي تعبر عن قانون انحفاظ الشحنة:

$$\int fV^n dV = n \quad \text{(II.12)}$$

n تمثل الكثافة الحجمية للجسيمات.

V تمثل حجم الفضاء.

بمكاملة طرفي المعادلة $(II.1)$ نجد:

$$\int \frac{\partial f}{\partial t} dV + \int \vec{V}\,\vec{\nabla} f dV + \int \frac{\vec{F}}{m} \vec{\nabla}_v f dV = \int \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} dV \quad \text{(II.13.a)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\int f dV + \vec{\nabla}\int \vec{V} f dV + \frac{\vec{F}}{m}\int \vec{\nabla} f dV = \int \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} dV \quad \text{(II.13.b)}$$

بتعويض المساواة $(II.13.b)$ في الطرف الأول من المعادلة $(II.13.a)$، و بالاعتماد على الصيغة الآتية:

$$\int AfdV = \langle A\rangle n \quad \text{(II.14)}$$

$\langle A\rangle$ هذه الحالة تمثل القيمة المتوسطة للسرعة.

نتحصل على المعادلة الآتية:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \vec{\nabla}\langle V\rangle n + \frac{\vec{F}}{m}\int \nabla_v f dV = \int \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} \quad \text{(II.15)}$$

لتبسيط المعادلة الأخيرة نقوم بحساب الحد الثالث من الطرف الأيسر.

$$\frac{\vec{F}}{m}\int \vec{\nabla}_v\, f dV\, \frac{1}{m}\left[F_x\vec{\imath}+F_y\vec{\jmath}+F_z\vec{K}\right]\iiint\left(\frac{\partial f}{\partial v_x}\vec{\imath}+\frac{\partial f}{\partial v_y}\vec{\jmath}+\frac{\partial f}{\partial v_z}\vec{k}\right)dv_x dv_y dv_z=\frac{1}{m}\left[F_x\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\partial f}{\partial v_x}dv_x\iint dv_y dv_z+F_y\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\partial f}{\partial v_y}dv_y\iint dv_x dv_z+F_z\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\partial f}{\partial v_z}dv_z\iint dv_x dv_y\right]$$

(II.16)

بالتعويض ا عادلة $(II.15)$ صل على معادلة الاستمرارية:

$$\frac{\partial n_{e,i}}{\partial t}+\vec{\nabla}\left(n_{e,i}\langle\vec{V}\rangle\right)=S_e \qquad \text{(II.17)}$$

S_e ثل عبارة ا صدر عادلة الاستمرارية، و تلف صيغته من مرجع لآخر، حسب الفرضيات الفيزيائية ا عتمد عليها.

باسترجاع ا عادلات $(II.7)$ و $(II.13)$ نكتب لة ا عادلات التفاضلية ال تصف التوزيع الإلكترو و الأيو البلازما با لة الآتية:

$$\begin{cases}\frac{\partial n_e}{\partial t}+\vec{\nabla}\vec{J}_e=S_e\\ \frac{\partial n_i}{\partial t}+\vec{\nabla}\vec{J}_i=S_e\\ \vec{J}_e=-\bar{\bar{\mu}}_e n_e\vec{E}-\bar{\bar{D}}_e\vec{\nabla}n_e\\ \vec{J}_i=-\bar{\bar{\mu}}_i n_i\vec{E}-\bar{\bar{D}}_i\vec{\nabla}n_i\end{cases} \qquad \text{(II.18)}$$

هذه ا لة بالتزاوج مع معادلة غوص بصيغتها التفاضلية تسمح لنا عا ة البلازما باعتبارها مائعا متجانسا.

II-3-2: ا ركية والانتشار للجسيمات ا شحونة

ضع ا سيمات ا شحونة البلازما لعدة عوامل كا ركية العشوائية و التصادمات ا ختلفة ال تؤدي لتغي سرعتها و طاقتها ا ركية، و بالتا اختلال انس كثافة البلازما. ونظرا ا تاز به البلازما من توازن، تظهر حركة منظمة للجسيمات تعمل على إعادة التجانس ا فقود. تندرج هذه ا ركة ظواهر الانتقال ال تتلخص ظاهر ا ركية و الإنتشار [11].

II-3-2-1 ا ركـية:

تتحرك الإلكترونات و الأيونات البلازما ت تأث ا ال الكهربائي حركة انسحابية تتميز عاملات تسمى معاملات ا ركية، تلف باختلاف نوع ا سيمات (إلكترونات، أيونات).

1- ا ركية الإلكترونية:

تتحرك الإلكترونات ت تأث ا ال الكهربائي الا اه ا عاكس له وتتميز عامل حركية. وصف كل من M. Moisan. وJ. Pelletier [12] هذه ا عاملات بأ ا دالة ا قل ا غناطيسي ا طبق حيث يكتب على شكل تنسور كما يلي:

$$\bar{\bar{\mu}}_{e}=\begin{pmatrix} \mu''_e & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{e_\perp} & -\mu_{e_H} \\ 0 & \mu_{e_H} & \mu_{e_\perp} \end{pmatrix} \qquad (II.19)$$

حيث:

$$\mu''_e=\frac{e}{m_e.\nu_m} \qquad (II.20)$$

$$\mu_{e\perp}=\frac{\nu_m^2.\mu''_e}{\omega_c^2+\nu_m^2} \qquad (II.21)$$

μ_{eH} معامل حركية Hall

$$\mu_{eH}=\frac{\nu_m.\mu''_e.\omega_c}{\omega_c^2+\nu_m^2} \qquad (II.22)$$

ω_c تردد سيكلترون إلكترون حيث:

$$\omega_c = \frac{e.B}{m_e} \qquad (II.23)$$

انعدام الحقل المغناطيسي معامل الحركية الالكترونية يأخذ قيمة سلمية تعطى بـ [13]

$$\mu_e = \frac{e}{m_e.\nu_m} \qquad (II.24)$$

2- الحركية الأيونية:

بما أن الأيونات لا تتأثر بالحقل المغناطيسي نتيجة كبر كتلتها،فإن اتجاهها يكون مستقلاً عن سرعتها الإبتدائية، و تتميز حركيتها هي الأخرى بمعامل الحركية الذي أعطي كدالة للحقول الكهربائية المنخفضة، قدم بعدة صيغ:

أعطى كل من H. Kumar و S. Roy [14-15] أعمالهما الحركية الأيونية بالعلاقة التالية:

$$\begin{cases} \mu_i P = 10^3 \left[1 - 2.3 \times 10^{-3} \frac{E}{P}\right] & : \quad \frac{E}{P} \leq 60\ V.cm^{-1}Torr^{-1} \\ \mu_i P = \frac{8.25}{\sqrt{\frac{E}{P}}}\left[1 - \frac{86.5}{\left(\frac{E}{P}\right)^{1.5}}\right] & : \quad \frac{E}{P} > 60\ V.cm^{-1}Torr^{-1} \end{cases} \qquad (II.25)$$

كما قدمها A. M. Pointu [16] بالعلاقة التالية:

$$\mu_i = \frac{K}{P}\left(\frac{E}{P}\right)^{-\beta} \qquad (II.26)$$

حيث

$$K = 8.25 \times 10^3\ cm^{3/2}Torr^{1/2}V^{1/2} \qquad (II.27)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & : \quad \frac{E}{P} < \left(\frac{E}{P}\right)_L \\ 0.5 & : \quad \frac{E}{P} > \left(\frac{E}{P}\right)_L \end{cases} \qquad (II.28)$$

P تمثل ضغط الغاز

حيث القيمة النموذجية للحقل المنخفض $\left(\frac{E}{P}\right)_L$ تتراوح بـ 10~100 V $Torr^{-1}$ cm^{-1}

و في أغلب الأحيان تعتبر الحركية الأيونية قيمة ثابتة حيث[17]:

$$\mu_i = \frac{e}{m_i v_m} \quad \text{(II.29)}$$

II-3-2-2 الإنتشار:

الإنتشار هو ظاهرة تسوية التوزيع الإتزا لتراكيز ا سيمات ا شحونة البلازما، و تتميز عامل الانتشار لكل نوع من هذه ا سيمات.

1- الإنتشار الإلكترونـي:

حسب النظرية ا ركية للغازات نعرف معامل الإنتشار الإلكترو [11]:

$$D_e = \frac{\langle V_e \rangle \lambda_e}{3} \quad \text{(II.30)}$$

$\langle V_e \rangle$القيمة ا توسطة لسرعة الإلكترونات.

كما يعرف هو الآخر كدالة للحقل ا غناطيسي، و يكتب على الشكل التنسوري التا [12]

$$\overline{\overline{\mathrm{D}}}_{\mathrm{e}} = \begin{pmatrix} D''_e & 0 & 0 \\ 0 & \mathrm{D}_{\mathrm{e}_\perp} & -\mathrm{D}_{\mathrm{e}_\mathrm{H}} \\ 0 & -\mathrm{D}_{\mathrm{e}_\mathrm{H}} & \mathrm{D}_{\mathrm{e}_\perp} \end{pmatrix} \quad \text{(II.31)}$$

حيث:

$$D''_{\mathrm{e}} = \frac{\mathrm{KT}}{\mathrm{e}} . \mu''_{\mathrm{e}} \quad \text{(II.32)}$$

$$D_{\mathrm{e}\perp} = \frac{\nu_{\mathrm{m}}^2 . \mathrm{D}''_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{c}}^2 + \nu_{\mathrm{m}}^2} \quad \text{(II.33)}$$

$$D_{\mathrm{eH}} = \frac{\nu_{\mathrm{m}} . \mathrm{D}''_{\mathrm{e}} \omega_{\mathrm{c}}}{\omega_{\mathrm{c}}^2 + \nu_{\mathrm{m}}^2} \quad \text{(II.34)}$$

و غياب ا قل ا غناطيسي يعطى بالقيمة السلمية

$$D_e = \frac{KT}{e} . \mu_e \quad \text{(II.35)}$$

2- الإنتشـار الأيونـي:

يعرف أيضا حسب النظرية ا ركية للغازات بـ [11]

$$D_i = \frac{\langle V_i \rangle \lambda_i}{3} \quad \text{(II.36)}$$

ا أن تأث ا قل ا غناطيسي على الأيونات ضعيف جدا مقارنة بتأث ه على الإلكترونات فإن معامل الانتشار الأيو يعرف دائما كقيمة سلمية بالصيغة التالية[18]:

$$D_i = \frac{V_u^2}{\nu_m} = \frac{K_B T}{m_i \nu_m} \qquad (II.37)$$

V_u سرعة التحريض ا راري

3-2-3-II ***علاقة إنشتاين:***

نعرف النسبة ب معامل ا ركية و معامل الإنتشار للجسيمات ا شحونة بالصيغة التالية [2]:

$$\frac{D_{e,i}}{\mu_{e,i}} = \frac{K_B T_{e,i}}{e} \qquad (II.38)$$

تسمى هذه العلاقة بعلاقة إنشتاين.

4-2-3-II معامل الإصدار الإلكترو الثانوي:

يع معامل الإصدار الإلكترو الثانوي γ عن عدد الإلكترونات الصادرة من ا دف خلال قذفه بأيون طاقوي واحد، و هو عامل مهم ديد خصائص البلازما، و تلف قيمته حسب مادة ا دف و الغاز ا ستعمل عملية التفريغ [19]. يوضح ا دول أدناه قيمة هذا ا عامل لبعض ا واد و الغازات.

γ	الأيــون	السـطح
0.12	Ar^+	AL
0.06	Ar^+	Cu
0.02	Ar^+	Si
0.17	He^+	Si
0.1	Ar^+	W
0.26	He^+	W

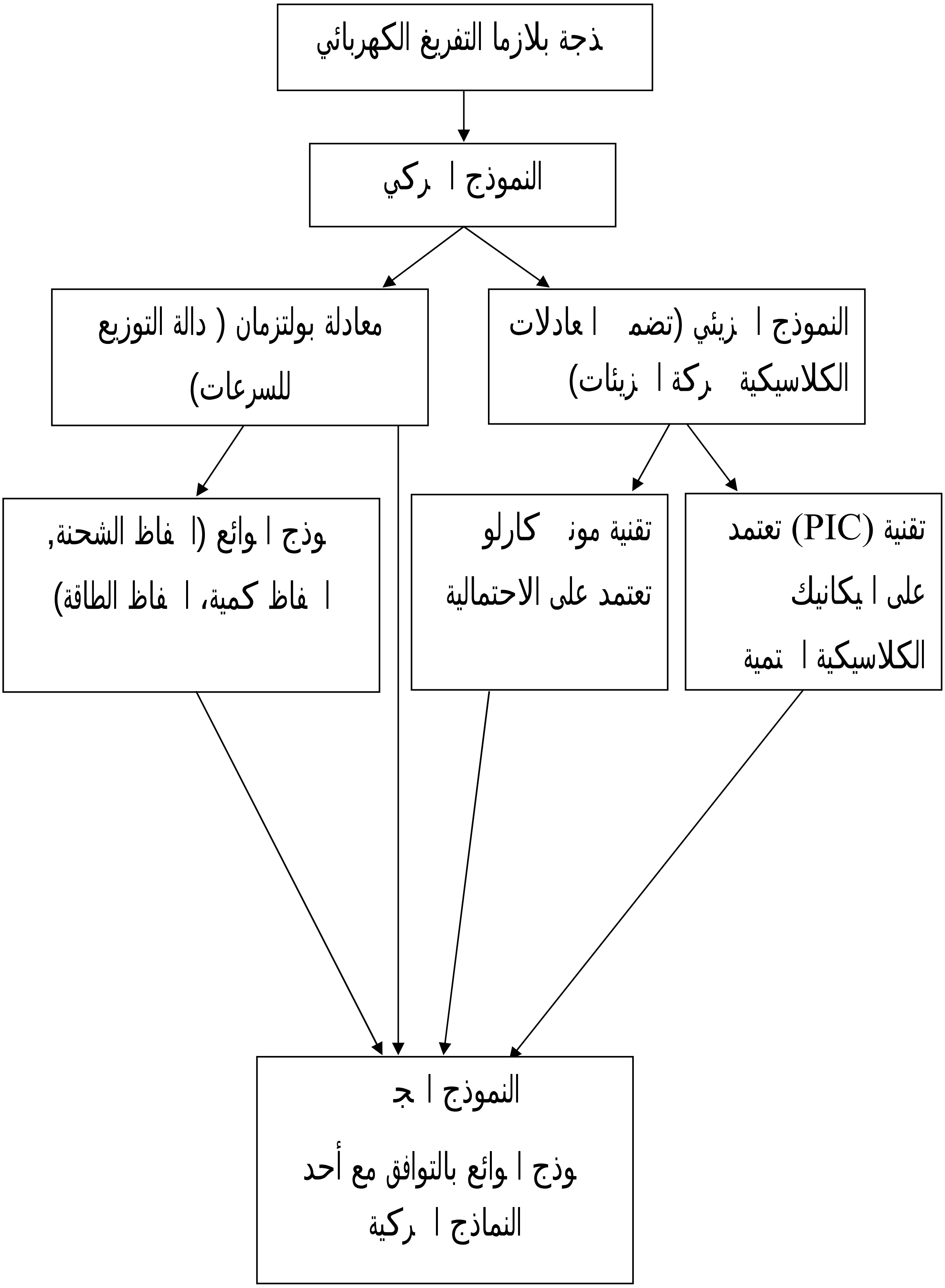
جدول(3-II) : معامل الإصدار الإلكترو الثانوي حسب نوعي الغاز و ا عدن[19]

4-II النــموذج الــهــجيــن:

النموذج ا جـ مع ب وذج ا وائع و النموذج ا هري، حيث يقسم البلازما إ منطقتـ ، ا نطقة الأو تتوي على إلكترونات ذات طاقة عالية تتسارع وجود ا قل الكهربائي، تسمى منطقة غمد البلازما، نعا ها بالنموذج ا هري. أما ا نطقة الثانية فتحتوي على إلكترونات ذات طاقة وحركية منخفضة وتتم معا تها حسب وذج ا وائع [20].

هذا النموذج معاملات التأين و الإثارة ت تأث الصدم الإلكترو لا تظهر معادلات ا ركة لأن الإلكترونات ا شاركة الظاهرت لك طاقة عالية، وبالتا تظهر فقط ا عاملات ا تعلقة بالتفاعلات ضعيفة الطاقة (الإلتصاق، إعادة الإلتحام)[4].

و كن تلخيص تلف النماذج ا ذكورة سابقا ا خطط التا :



الشكل (II.1) ترتيب اذج معا ة

بلازما التفريغ الكهربائي [3]

مـراجـع الفصـل الثانـي

[1] F. Vidal ; *"Modélisation des plasmas froids I "* ; 17 novembre 2000

[2] J. L. Delcroix, A. Bers, *"physique des plasmas"*, Ed. CNRS; Paris (1994).

[3] J. Balaji et S. Wei ; *"Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer"*; Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, , USA Vol.**139-191;** pp 140-188 (2007).

[4] D. Benyoucef ; *"Modélisation particulaire et multidimensionnelle des décharges hors équilibre a basse pression excitées par champs électromagnétiques"*; Thèse de doctorat ; Université de Toulouse (2011)

[5] ز.بـلة، "الدراسة التشخيصية با اكاة العددية سبار كهربائي ساكن رش مهبطي"، ماجست ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة(2007)

[6] J.P. Boeuf; Th. Callegari; C. Punset et R. Ganter; "*Modeling as a Tool for Plasma Display Cell Optimization*"; Workshop Digest of the 18th International Display Research Conference, Asia Display Vol.**98**; pp 209-220 (1998).

[7] C. Guangye and L. R. Laxminarayan; *"Fluid modeling of electron heating in low-pressure, high-frequency capacitively coupled plasma discharges"*; Journal of applied physics; Vol. **96** n^{O} 11 ; pp 6073-6081; The University of Texas (2004).

[8] P. Dimitris. Lymberopoulos and D. J. Economou ; *"Two-Dimensional Self-Consistent Radio Frequency Plasma Simulations Relevant to the Gaseous Electronics Conference RF Reference Cell"*; J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. Vol.**100**, 473 (1995).

[9] M. M. Tsay et M. Martinez-Sanchez ; *"Two-Dimensional Numerical Modeling of Radio-Frequency Ion Engine Discharge"*; Thèse de doctorate (2010).

[10] E. Gogolidesa; et E. H. Sawin ; *''Continuum modeling of radio-frequency glow discharges. I. Theory and results for electropositive and electronegative gases''*; J. Appl. Phys. Vol.**72** (9); 3988-4000 (1992).

[11] ب يافورسكي, أ. ديتلاف, تر ة الدكتور فريد يوسف م , *"/ رجع الفيزياء-/ زء الأول"*, دار م -موسكو, ب وت (1992)

[12] M. Moisan et J. Pelletier ; *"Physique des plasmas collisionnels"*; Edition sciences, France (2006).

[13] P. Scheubert ; *"Modelling and Diagnostics of Low Pressure Plasma Discharges''*; Thèse de doctorat, Université de Munchen (2002).

[14] H. Kumar et S. Roy ; *"Multidimensional hydrodynamic plasma-wall model for collisional plasma discharges with and without magnetic-field effects"*; Physics of Plasmas.Vol.**12**, 093508 (2005).

[15] H. Kumar et S. Roy ; *"Two-dimensional Fluid Model of DC and RF Plasma Discharges in Magnetic Field"*; 36th AIAA Plasma Dynamics and Laser conference Toronto; Canada (06-09 Jun 2005)

[16] A. M. Pointu; *"Modélisation des propriétés électrique des décharges RF diode"*; Revue Phys. Appl.Vol.**24** ; 257-276 (1989).

[17] X. Xu; H. Ge; S. Wang; Z. Dai; Y. Wang et A. Zhu; *"Influence of the low-frequency source parameters on the plasma characteristics in a dual frequency capacitively coupled plasma reactor: Two dimensional simulations*" ; Progress in Natural Science. Vol.**19**; 677–684 (2009).

[18] T. Sergey. Surzhikov; Joseph S. Shang; *''Two-component plasma model for two-dimensional glow discharge in magnetic field''*; Journal of Computational Physics.Vol.**199** 437–464 (2004).

[19] N. St. J. Braithwaite; *"Introduction to gas discharges"*; Plasma Sources Sci.Technol**.**Vol.**9**; 517-527 (2000).

[20] N. Baguer ; A. Bogaerts et R. *Gijbels "Hybrid model for a cylindrical hollow cathode glow discharge and comparison with experiments"*; Spectrochimica Acta Part B.Vol.**57** 311–326 (2002).

الفصـل الثـالث

تطبيق وذج ا وائع على

بـلازما التفريغ الكهربائـي

الفصـل الثـالث

تطبيق وذج ا وائع على بـلازما التفريغ الكهربائـي

إن التمثيل الرياضي للظواهر الفيزيائية ضروري لدراسة تطورها ا وضعي و الزم ، الذي يعتمد عموما على حل موعة من ا عادلات التفاضلية لتحديد الدوال ال تصف الظاهرة. هذه ا عادلات من الصعب جدا حلها ليليا، لذلك نلجأ عادة للطرق العددية، وال لا كنها إعطاء صيغة الدالة، إ ا إعطاء قيم عددية لبعض ا قادير نقاط ددة.

تطرقنا الفصل الثا لبعض النماذج ال كننا من دراسة ا صائص الكهربائية لبلازما التفريغ الكهربائي و التحديد الرياضي ذه ا صائص. هذا الفصل سنقوم بتطبيق وذج ا وائع لنظام مستقر بعدين، على بلازما الرش ا هبطي ا غنطرو ، و حل ا عادلات التفاضلية ذا النظام بالطرق العددية التكرارية. سنعتمد على طريقة ا جوم ا نتهية و الطريقة التكرارية غوص-صيدل ل النظام ا صفو الناتج.

III-1.النموذج الرياضي:

يستخدم غاز الأرغون عملية التفريغ الكهربائي لتوضع الطبقات الرقيقة بتقنية الرش ا هبطي و يكون ضغط يتراوح ب (1Torr~0.1 Torr).حيث 1 Torr =Pa133 غاز الأرغون عبارة عن غاز خامل ضروري لرش هدف صلب، وهو يتميز اصية مهمة ، فهو غ فعال و يتميز بدرجة تأين مرتفعة، ا عله مستخدما بكثرة توضع الطبقات الرقيقة و معا ة السطوح بالبلازما.

درجة حرارة النظام (غاز–مهبط–مصعد) ثابتة و تساوي 300K، و ا سافة ب ا صعد و ا هبط تتراوح ب (5cm~2cm)، أما الكمون ا طبق فيتغ ب 100V إ 1kV.

III-1-1-وصف النموذج الرياضي:

إعتمدنا هذا العمل على طريقة الرش ا هبطي ا غنطرو ا غذى صدر جهد متناوب ذي تردد مذياعي RF تواتره يساوي13.5 MHz لتوضع رقائق السيلسيوم، وذلك باستخدام بلازما الأرغون(Ar). من أجل ديد ا صائص الكهربائية ذه الأخ ة (كثافة الإلكترونات، كثافة الأيونات، ا قل الكهربائي) اقترحنا وذج ا وائع لنظام مستقر، والذي يرتكز على ا عادلات التالية:

III-1.1.1.معادلة الإستمرارية[1]

- بالنسبة للإلكترونات:

$$\vec{\nabla}\vec{J}_e = S_e \qquad \text{(III.1)}$$

- بالنسبة للأيونات:

$$\vec{\nabla}\vec{J}_i = S_e \qquad \text{(III.2)}$$

حيث S_e عبارة ا صدر عادلة الاستمرارية.

ع كل من W. Schmitt et al [2] و S. Michael [3] عن عبارة ا صدر عادلة الاستمرارية فقط با سا ة الإلكترونية ظاهرة التأين و صاغوه رياضيا كما يلي:

$$S_e = \alpha|\vec{J}_e| \qquad \text{(III.3)}$$

III-2.1.1. معادلة تحويل كمية الحركة:

- بالنسبة للإلكترونات:

$$\vec{J}_e = n_e\vec{v}_e = -\bar{\bar{D}}_e\vec{\nabla}n_e - n_e\bar{\bar{\mu}}_e\vec{E} \quad \text{(III.4)}$$

- بالنسبة للأيونات:

$$\vec{J}_i = n_i\vec{v}_i = -\bar{\bar{D}}_i\vec{\nabla}n_i + n_i\bar{\bar{\mu}}_i\vec{E} \quad \text{(III.5)}$$

حيث:

$\bar{\bar{\mu}}_{e.i}$:تنسور حركية الإلكترونات و الأيونات

$\bar{\bar{D}}_{e.i}$:تنسور إنتشار الإلكترونات و الأيونات

$$\bar{\bar{\mu}}_e = \begin{pmatrix} \mu''_e & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{e_\perp} & -\mu_{e_H} \\ 0 & \mu_{e_H} & \mu_{e_\perp} \end{pmatrix} \qquad \bar{\bar{D}}_e = \begin{pmatrix} D''_e & 0 & 0 \\ 0 & D_{e_\perp} & -D_{e_H} \\ 0 & -D_{e_H} & D_{e_\perp} \end{pmatrix}$$

أما معاملات الإنتشار و الحركية بالنسبة للأيونات فلا تتأثر بالحقل المغناطيسي، و تعطى بقيم سلمية

$$\bar{\bar{D}}_i = D_i \qquad \bar{\bar{\mu}}_i = \mu_i$$

حيث

$$\mu_i = \frac{19.152}{P}\ [S^{-1}Pa\ V^{-1}m^2] \qquad D_i = \frac{0.552}{P}[Pa\ s^{-1}m^{-1}]$$

P يمثل ضغط الغاز بوحدة الباسكال[Pa]

α معامل التأين

$$\alpha = A_\alpha P exp\left[-C_\alpha\left(\frac{P}{E\cos\theta}\right)\right]$$

$$A_\alpha = 21.92m^{-1}Pa^{-1} \quad C_\alpha = 23.04m^{-1/2}V^{1/2}$$

$$\nu_m = 4.5 \times 10^7.P$$ [5]

الجدول(III-1) ندون مختلف مركبات تنسوري الحركية والإنتشار.

المقدار	القيمة	الوحدة	المرجع
معامل الحركية الإلكتروني الموازي	$\mu''_e = \frac{e}{m_e . \nu_m}$	[cm²V⁻¹S⁻¹]	[4]
معامل الحركية الإلكتروني العمودي	$\mu_{e\perp} = \frac{\nu_m^2 . \mu''_e}{\omega_c^2 + \nu_m^2}$	[cm²V⁻¹S⁻¹]	[5]
معامل حركية Hall	$\mu_{eH} = \frac{\nu_m . \mu''_e . \omega_c}{\omega_c^2 + \nu_m^2}$	[cm²V⁻¹S⁻¹]	[6]
معامل الإنتشار الإلكتروني الموازي	$D''_e = \frac{KT}{e} . \mu''_e$	[cm²S⁻¹]	[4]
معامل الإنتشار الإلكتروني العمودي	$D_{e\perp} = \frac{\nu_m^2 . D''_e}{\omega_c^2 + \nu_m^2}$	[cm²S⁻¹]	[5]
معامل إن تشار Hall	$D_{eH} = \frac{\nu_m . D''_e \omega_c}{\omega_c^2 + \nu_m^2}$	[cm²S⁻¹]	[6]
النبض السيكلتروني	$\omega_c = \frac{e . B}{m_e}$	Rad.s ⁻¹	[7]
الطاقة الحركية	$K.T = 4$	eV	[7]

ا **دول (III-1)** : مركبات تنسوري ا ركية والإنتقال الإلكترو

III-1.1.3.الصيغة التفاضلية عادلة غوص:

$$\vec{\nabla}\vec{E} = \frac{e}{\varepsilon_0}(n_i - n_e) \qquad (III.6)$$

III-1-2-كتابة المعادلات بالإحداثيات الاسطوانية:

تنسب معادلات الموائع في هذه الدراسة لجملة الإحداثيات الاسطوانية (r,θ,z)، حيث يعرف المؤثر التفاضلي $\vec{\nabla}$ في الإحداثيات الأسطوانية بـ:

$$\vec{\nabla}\vec{A} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial A_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \quad \text{(III.7)}$$

$$\vec{\nabla}\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r}\vec{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}\vec{e}_\theta + \frac{\partial \varphi}{\partial z}\vec{e}_z \quad \text{(III.8)}$$

باعتبار التناظر الأسطواني حيث $\left(\frac{\partial \ldots}{\partial \theta}\right) = 0$: للمقادير السلمية،

وبتطبيق المؤثر $\vec{\nabla}$ على المعادلات (1.III) و (2.III) و (3.III) و (4.III) و (5.III) نجد:

1. غياب الحقل المغناطيسي $B = 0$

عندما يكون الحقل المغناطيسي B معدوما فإن تنسوري الحركية الإلكترونية والإنتشار الإلكتروني يأخذان قيما سلمية حيث:

$$\bar{\bar{\mu}}_e = \mu_e'' \qquad \bar{\bar{D}}_e = D_e''$$

بالتالي تكتب معادلات الإستمرارية ومعادلات كمية الحركة كما يلي:

❖ ***معادلة الإستمرارية:***

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r j_{e,i_r}\right) + \frac{\partial j_{e,i_z}}{\partial z} = \alpha|\vec{j}_e| \quad \text{(III.9)}$$

❖ ***معادلة تحويل كمية الحركة:***

✓ ***وفق المحور r***

$$j_{er} = -D_e''\frac{\partial n_e}{\partial r} - \mu_e'' n_e E_r \quad \text{(III.10)}$$

$$j_{ir} = -D_i\frac{\partial n_i}{\partial r} + \mu_i n_i E_r \quad \text{(III.11)}$$

✓ ***وفق المحور z***

$$j_{ez} = -D_e''\frac{\partial n_e}{\partial z} - \mu_e'' n_e E_z \quad \text{(III.12)}$$

$$j_{ez} = |\vec{j}_e|\cos\varphi \quad \text{(III.13)}$$

$$j_{iz} = -D_i\frac{\partial n_i}{\partial z} + \mu_i n_i E_z \quad \text{(III.14)}$$

φ تمثل الزاوية التي يصنعها التدفق الإلكتروني مع المحور z. في هذه الحالة $\varphi = 0$

2. وجود ا قل ا غناطيسي: $B \neq 0$

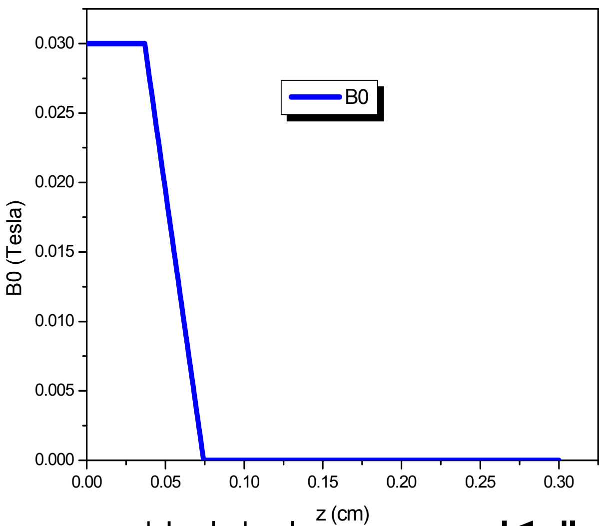
ا قل ا غناطيسي موازٍ لسطح ا هبط أي $\vec{B} = (B_r, 0{,}0)$ والذي يتغ على ا ورين (r,z) وفقا للمعادلة الافتراضية الآتية [8]

$$B_z(r,z) = \begin{cases} \frac{B_0(z)}{r_1^2} r^2 & 0 \le r \le r_1 \\ B_0(z) & r_1 < r \le r_2 \\ \frac{B_0(z)}{(r_2-R)^2}(r-R)^2 & r_2 < r \le R \end{cases} \qquad \text{(III.15)}$$

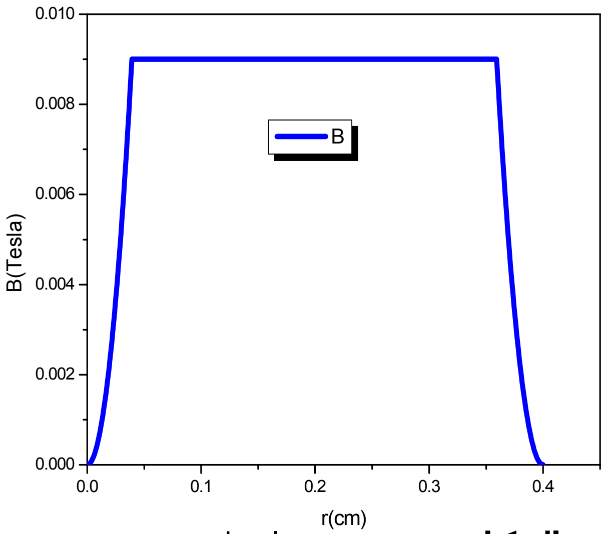
$B_0(z)$ ثل سعة ا قل ا غناطيسي و اا تتغ وفق ا عادلة ا طية الآتية

$$B_0(z) = \begin{cases} B_0 & 0 \le z \le z_1 \\ \frac{B_0}{(z_2-z_1)} z - \frac{B_0 z_1}{(z_2-z_1)} & z_1 < z \le z_2 \\ 0 & z_2 < z \le H \end{cases} \qquad \text{(III.16)}$$

B_0 القيمة الثابتة للحقل ا غناطيسي ب اللبوس



الشكل(III-1) : تغ ا قل ا غناطيسي على ا ور Z



الشكل(III-2) : تغ ا قل ا غناطيسي على ا ور r

❖ معادلة الإستمرارية:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r j_{e,i_r}\right) + \frac{\partial j_{e,i_z}}{\partial z} = \alpha|\vec{J}_e| \quad \text{(III.17)}$$

❖ معادلة ويل كمية ا ركة

نتيجة تأث ا قل ا غناطيسي على مركبات تنسوري ا ركية و الانتقال الإلكترو
تكتب معادلة كمية ا ركة على الشكل التا :

✓ **وفق ا ور r**

$$j_{er} = -D''_e\frac{\partial n_e}{\partial r} - \mu''_e n_e E_r \quad \text{(III.18)}$$

$$j_{ir} = -D_i\frac{\partial n_i}{\partial r} + \mu_i n_i E_r \quad \text{(III.19)}$$

✓ **وفق ا ور z**

$$j_{ez} = -D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z} - \mu_{e\perp} n_e E_z \quad \text{(III.20)}$$

$$j_{ez} = |\vec{J}_e|\cos\varphi \quad \text{(III.21)}$$

$$j_{iz} = -D_i\frac{\partial n_i}{\partial z} + \mu_i n_i E_z \quad \text{(III.22)}$$

أين:

$$\tan\varphi = \frac{\mu_{eH}}{\mu_{e\perp}} = \frac{\omega_c}{\nu_m} \quad \text{(III.23)}$$

بتعويض معادلات ويل كمية ا ركة   معادلة الإستمرارية صل على:

1. $B = 0$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left[D''_e\frac{\partial n_e}{\partial r} + \mu''_e n_e E_r\right]\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D''_e\frac{\partial n_e}{\partial z} + \mu''_e n_e E_z\right) =$$
$$\alpha\left(D''_e\frac{\partial n_e}{\partial z} + \mu''_e n_e E_z\right) \quad \text{(III.24)}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\left[-D_i\frac{\partial n_i}{\partial r} + \mu_i n_i E_r\right]\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(-D_i\frac{\partial n_i}{\partial z} + \mu_i n_i E_z\right) =$$
$$\alpha\left(-D''_e\frac{\partial n_e}{\partial z} - \mu''_e n_e E_z\right) \quad \text{(III.25)}$$

2. $B \neq 0$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left[D_e^{''}\frac{\partial n_e}{\partial r}+\mu_e^{''}n_eE_r\right]\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z}+\mu_{e\perp}n_eE_z\right)=\frac{\alpha}{\cos\theta}\left(D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z}+\mu_{e\perp}n_eE_z\right) \quad \text{(III.26)}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\left[-D_i\frac{\partial n_i}{\partial r}+\mu_in_iE_r\right]\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(-D_i\frac{\partial n_i}{\partial z}+\mu_in_iE_z\right)=\frac{\alpha}{\cos\theta}\left(-D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z}-\mu_{e\perp}n_eE_z\right) \quad \text{(III.27)}$$

❖ ***معادلة غوص:***

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rE_r)+\frac{\partial E_z}{\partial z}=\frac{e}{\varepsilon_0}(n_i-n_e) \quad \text{(III.28)}$$

باعتبار فرق الكمون ا طبق وفق ا ور (z) فإن مركبة ا قل الكهربائي على ا ور r تكون معدومة ($E_r = 0$).[9]

على هذا الأساس نعيد صياغة معادلات الاستمرارية و معادلة غوص ا الت ($B \neq 0 , B = 0$) على النحو الآ :

$$B=0\begin{cases}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD_e^{''}\frac{\partial n_e}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D_e^{''}\frac{\partial n_e}{\partial z}+\mu_e^{''}n_eE_z\right)\\ \qquad =\frac{\alpha}{\cos\theta}\left(D_e^{''}\frac{\partial n_e}{\partial z}+\mu_e^{''}n_eE_z\right)\\ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(-rD_i\frac{\partial n_i}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(-D_i\frac{\partial n_i}{\partial z}+\mu_in_iE_z\right)\\ \qquad =\frac{\alpha}{\cos\theta}\left(-D_e^{''}\frac{\partial n_e}{\partial z}-\mu_e^{''}n_eE_z\right)\\ \frac{\partial E_z}{\partial z}=\frac{e}{\varepsilon_0}(n_i-n_e)\end{cases} \quad \text{(III.I)}$$

$$B \neq 0 \begin{cases} \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rD_e''\frac{\partial n_e}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z} + \mu_{e\perp}n_eE_z\right) \\ \qquad = \frac{\alpha}{\cos\theta}\left(D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z} + \mu_{e\perp}n_eE_z\right) \\ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(-rD_i\frac{\partial n_i}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(-D_i\frac{\partial n_i}{\partial z} + \mu_i n_i E_z\right) \\ \qquad = \frac{\alpha}{\cos\theta}\left(-D_{e\perp}\frac{\partial n_e}{\partial z} - \mu_{e\perp}n_eE_z\right) \\ \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{e}{\varepsilon_0}(n_i - n_e) \end{cases} \qquad \text{(III.II)}$$

III-1-3-/ عادلات / ختزلة:

نبا للمقادير الك ة ا كن أن يتعرض ا جهاز الكمبيوتر أثناء عملية ا ساب نلجأ لتعريف ا تغ ات دون وحدة ل هذه ا عادلات. ا دول (III-2) يلخص تلف ا تغ ات القياسية ا ستعملة.

تعريف المتغير القياسي	صيغة المتغير القياسي	تعريف الثوابت
r^*	$\frac{r}{R}$	R نصف قطر اللبوس
z^*	$\frac{z}{H}$	H البعد بين اللبوسين (الارتفاع)
n^*	$\frac{n}{n_s}$	n_s الكثافة النوعية
E^*	$\frac{E.H}{V_a}$	V_a فرق الجهد المطبق

ا دول (III-2): تعريف ا تغ ات القياسية

بتعويض هذه ا تغ ات ا ا عادلات (I.III) (II.III) د:

$$\begin{cases} c_1\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial n_e^*}{\partial r^*}\right) + c_2\frac{\partial}{\partial z^*}(n_e^*E_z^*) + c_3\frac{\partial}{\partial z^*}\left(\frac{\partial n_e^*}{\partial z^*}\right) \\ \qquad = c_7\alpha_0 n_e^*E_z^* + c_8\alpha_0\frac{\partial n_e^*}{\partial z^*} \\ -c_4\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial n_i^*}{\partial r^*}\right) + c_5\frac{\partial}{\partial z^*}(n_i^*E_z^*) - c_6\frac{\partial^2 n_i^*}{\partial z^{*2}} \\ \qquad = -c_7\alpha_0 n_e^*E_z^* - c_8\alpha_0\frac{\partial n_e^*}{\partial z^*} \\ \frac{\partial E_z^*}{\partial z^*} = c_9(n_i^* - n_e^*) \end{cases} \qquad \text{(III. III)}$$

$$\begin{cases} c_2 \frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^* \frac{\partial n_e^*}{\partial r^*}\right) + c_{10}\frac{\partial}{\partial z^*}\left(\mu_{e\perp} n_e^* E_z^*\right) + c_{11}\frac{\partial}{\partial z^*}\left(D_{e\perp}\frac{\partial n_e^*}{\partial z^*}\right) \\ \qquad = c_{12}\alpha_0 \mu_{e\perp} n_e^* E_z^* + c_{13}\alpha_0 D_{e\perp}\frac{\partial n_e^*}{\partial z^*} \\ -c_4 \frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^* \frac{\partial n_i^*}{\partial r^*}\right) + c_5 \frac{\partial}{\partial z^*}\left(n_i^* E_z^*\right) - c_6 \frac{\partial^2 n_i^*}{\partial z^{*2}} \\ \qquad = -c_{12}\alpha_0 \mu_{e\perp} n_e^* E_z^* - c_{13}\alpha_0 \mu_{e\perp}\frac{\partial n_e^*}{\partial z^*} \\ \frac{\partial E_z^*}{\partial z^*} = c_9\left(n_i^* - n_e^*\right) \end{cases} \qquad \text{(III. IV)}$$

الثوابت من c_1إ c_{13} معرفة ا دول (3-III)

الثابت	المقدار	الثابت	المقدار
c_1	$\frac{D_e''}{R^2}$	C_7	$\mu_e'' \cdot E_0$
C_2	$\frac{E_0 \cdot \mu_e''}{H}$	c_8	$\frac{D_e''}{H}$
C_3	$\frac{D_e''}{H^2}$	C_9	$\frac{n_s \cdot e \cdot H}{\varepsilon_0 \cdot E_0}$
C_4	$\frac{D_i}{R^2}$	C_{10}	$\frac{E_0}{H}$
C_5	$\frac{E_0 \cdot \mu_i}{H}$	C_{11}	$\frac{1}{H^2}$
α_0	$\frac{\alpha}{\cos\theta}$	C_{12}	E_0
C_6	$\frac{D_i}{H^2}$	C_{13}	$\frac{1}{H}$

ا **دول(3-III):** الثوابت c_1، c_{13}، α_0

III-2.النموذج العددي:

نظرا لصعوبة ا ل التحليلي للمعادلات التفاضلية نلجأ ل ا ملة (III.II) بالطرق العددية، حيث كن أن تعطي الصيغ الرياضية للمقادير الفيزيائية ال ن بصدد حسا ا (الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، ا قل الكهربائي) عند كل نقطة من الفضاء، كطريقة العناصر ا نتهية، الفروق ا نتهية، طريقة ا جوم ا نتهية وهي الطريقة ا ستعملة ثنا هذا.

ر طريقة ا جوم ا نتهية رحلت أساسيت [10]

- زئة ال ا اكاة:

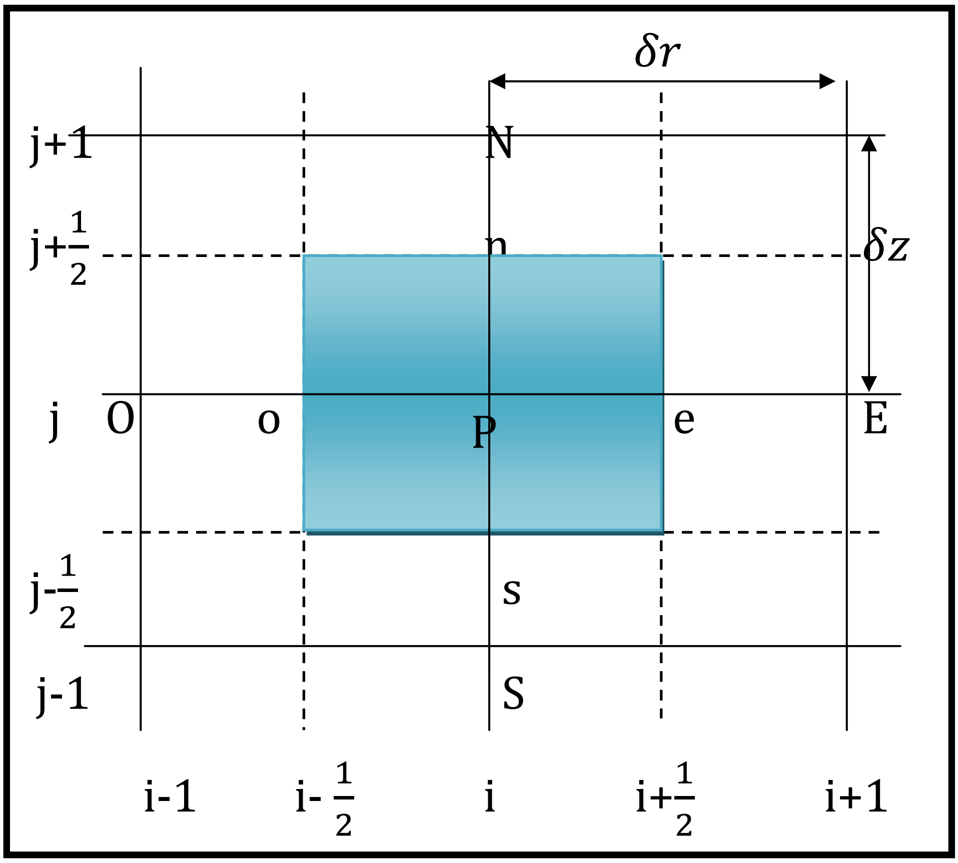
هذه ا رحلة يتم تقسيم ال ا اكاة إ عدد كب و منته من ا جوم العنصرية. هذه الدراسة تكون ا جوم العنصرية متساوية، أي أن التقسيم منتظم

- مكاملة ا عادلات:

يتم فيها مكاملة ا عادلات كل حجم من هذه ا جوم العنصرية.

III-2-1- زئـة ـال ا ـاكاة:

نذكر أن ال الدراسة هذه ا الة عبارة عن شكل اسطوا ، و باعتباره متناظرا اسطوانيا فإن التقسيم يكون البعدين (z,r) حيث يعطي عددا منتها من عناصر السطح كما هو موضح الشكل (III – 3)



الشكل : (III – 3) رسم طيطي لتجزئة ال ا اكاة

- ✓ تش i للتقسيم وفق ا ورr الذي زئ إ imax نقطة، حيث نعرف خطوة الانتقال من نقطة لأخرى.

$$\delta r = \frac{R}{imax-1} \qquad \text{(III.29)}$$

$$r(i) = (i-1)\delta r \qquad \text{(III.30)}$$

- ✓ تش j للتقسيم وفق ا ور z الذي زئ إ jmax نقطة، ونعرف خطوة الانتقال من نقطة لأخرى بـ :

$$\delta z = \frac{H}{jmax-1} \qquad \text{(III.31)}$$

$$z(j) = (j-1)\delta z \qquad \text{(III.32)}$$

III-2-2-مكاملة / عادلات / الات العنصرية:

نعرف عنصر ا جم الإحداثيات الأسطوانية كما يلي:

$$dV = rdrdzd\theta \qquad (III.33)$$

وقبل البداية تطبيق طريقة ا جوم ا نتهية سنتطرق لتعريف ا شتقات و الدوال الأصلية بواسطة هذه الطريقة و ال تعطى بـ [11]:

$$\int_P \frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial f}{\partial r}\right)dr = \left[r\frac{\partial f}{\partial r}\right]_o^e \qquad (III.34)$$

$$\int_P \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)dz = [f]_s^n \qquad (III.35)$$

$$\int_P \frac{\partial}{\partial z}\left(f\frac{\partial g}{\partial z}\right)dz = \left[f\frac{\partial g}{\partial z}\right]_s^n = \left[f|_n\frac{\partial g}{\partial z}\Big|_n - f|_s\frac{\partial g}{\partial z}\Big|_s\right] \qquad (III.36)$$

$$\int_P \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2}\right)dz = \left[\frac{\partial f}{\partial z}\right]_s^n \qquad (III.37)$$

$$\int_P f\frac{\partial g}{\partial z}dz = f_P\left(\frac{g_N - g_S}{2\delta z}\right) \qquad (III.38)$$

$$\left[r\frac{\partial f}{\partial r}\right]_o^e = \left[r\frac{\partial f}{\partial r}\Big|_e - r\frac{\partial f}{\partial r}\Big|_o\right] \qquad (III.39)$$

$$\frac{\partial f}{\partial r}\Big|_e = \frac{f|_E - f|_P}{\delta r} \qquad (III.40)$$

$$f|_s = \frac{f|_P + f|_S}{2} \qquad (III.41)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z}\Big|_n = \frac{f|_N - f|_P}{\delta z} \qquad (III.42)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z}\Big|_s = \frac{f|_P - f|_S}{\delta z} \qquad (III.43)$$

$$f|_n = \frac{f|_N + f|_P}{2} \qquad (III.44)$$

حيث النقاط P، e، o، n، s، E، O، N، S ثلة الشكل (**3 – III**)

بعد زئة ال ا اكاة واختيار ا جم العنصري نباشر مكاملة معادلات ا ملة (III.III) (III.IV).

بتطبيق تعريف ا شتقات ا زئية و الدوال الأصلية بطريقة ا جوم ا نتهية نصوغ ا عادلة التفاضلية للكثافة الإلكترونية ا الت بالعبارة التالية:

$$A(i,i+1)n_e^*(i+1,j) + A(i,i)n_e^*(i,j)$$

$$+A(i,i-1)n_e(i-1,j) = C(i) \quad \text{(III.45)}$$

هذه ا عادلة ثل نظاما مصفوفيا ثلاثي الأقطار، تكتب حدوده على الشكل التا :

✓ $\underline{\boldsymbol{B=0}}$

$$A(i,i+1) = \frac{c_1\delta z}{\delta r} r(i+\tfrac{1}{2}) \quad \text{(III.46)}$$

$$A(i,i-1) = \frac{c_1\delta z}{\delta r} r(i-\tfrac{1}{2}) \quad \text{(III.47)}$$

$$A(i,i) = (-\frac{c_1\delta z}{\delta r}(r(i+\tfrac{1}{2}) + r(i-\tfrac{1}{2}))) -$$

$$(2c_3 r(i)\frac{\delta r}{\delta z}) - \left(c_8 \delta z r(i) \delta r \alpha_0(i,j) E_z^*(i,j)\right) \quad \text{(III.48)}$$

$$C(i) = \frac{c_7 r(i)\delta r \alpha_0}{2\delta z}(n_e^*(i,j+1) - n_e^*(i,j-1)) -$$

$$\frac{c_3 r(i)\delta r}{\delta z}(n_e^*(i,j+1) + n_e^*(i,j-1)) - \frac{c_4 r(i)dr}{2}$$

$$(n_e^*(i,j+1)\ E^*z(i,j+1) - n_e^*(i,j-1)E_z^*(i,j-1))$$

(III.49)

✓ $\underline{\boldsymbol{B\neq 0}}$

$$A(i,i+1) = \frac{c_{1\delta z}}{\delta r} r(i+\tfrac{1}{2}) \quad \text{(III.50)}$$

$$A(i,i) = -\frac{c_1\delta z}{\delta r}\left(r\left(i+\tfrac{1}{2}\right) + r(i-\tfrac{1}{2})\right) -$$

$$\frac{c_{11} r(i)\delta r}{2\delta z}(D_{e\perp}(i,j+1) + 2D_e(i,j) + D_{e\perp}(i,j-1)) -$$

$$c_{14} r(i)\delta r \delta z \mu_{e\perp}(i,j)\alpha_0(i,j)E_z(i,j) \quad \text{(III.51)}$$

$$A(i,i-1) = \frac{c_1\delta z}{\delta r} r(i-\tfrac{1}{2}) \quad \text{(III.52)}$$

$$C(i) = n_e(i,j+1)(c_{13}\alpha_0(i,j)\frac{r(i)\delta r D_{e\perp}(i,j)}{2\delta z} - \frac{c_{10} r(i)\delta r}{2}$$

$$\mu_{e\perp}(i,j+1)E_z(i,j+1) - \frac{c_{13} r(i)\delta r}{2\delta z}(D_{e\perp}(i,j+1) + D_{e\perp}(i,j) + n_e(i,j-$$

$$1)(\frac{c_{10} r(i)\delta r}{2}\mu_{e\perp}(i,j-1)E_z(i,j-1) - c_{10}\frac{r(i)\delta r}{2\delta z}(D_{e\perp}(i,j) + D_{e\perp}(i,j-1) -$$

$$c_{13}\alpha_0(i,j)\frac{r(i)\delta r}{2\delta z} D_{e\perp(i,j)})$$

(III.53)

بتطبيق تعريف ا شتقات ا زئية و الدوال الأصلية بطريقة ا جوم ا نتهية كن أيضا صياغة ا عادلة التفاضلية للكثافة الأيونية بالعبارة التالية:

$$A(i,i+1)n_i(i+1,j)+A(i,i)n_i(i,j)$$
$$+A(i,i-1)n_i(i-1,j)=C(i) \qquad \text{(III.54)}$$

هذه ا عادلة ثل نظاما مصفوفيا ثلاثي الأقطار، تكتب حدوده على الشكل التا :

✓ $\underline{\boldsymbol{B=0}}$

$$A(i,i+1)=\frac{-c_4\delta zr}{\delta r}\left(i+\frac{1}{2}\right) \qquad \text{(III.55)}$$

$$A(i,i-1)=\frac{-c_4\delta zr}{\delta r}\left(i-\frac{1}{2}\right) \qquad \text{(III.56)}$$

$$A(i,i)=\left(\frac{c_4\delta z}{\delta r}\left(r\left(i+\frac{1}{2}\right)+r\left(i-\frac{1}{2}\right)\right)\right)+\left(\frac{2c_5r(i)\delta r}{\delta z}\right) \qquad \text{(III.57)}$$

$$C(i)=\frac{-c_7r(i)\delta r\alpha_0(i,j)}{2\delta z}\left(ne(i,j+1)-ne(i,j-1)\right)$$
$$-c_8r(i)\delta r\delta z\alpha_0(i,j)ne(i,j)Ez(i,j)$$
$$+\frac{c_4r(i)\delta r}{\delta z}\left(ni(i,j+1)+ni(i,j-1)\right)-\frac{c_5r(i)dr}{2}$$
$$\left(ni(i,j+1)Ez(i,j+1)-ni(i,j-1)Ez(i,j-1)\right) \qquad \text{(III.58)}$$

✓ $\underline{\boldsymbol{B\neq 0}}$

$$A(i,i+1)=-\frac{c_4\delta z}{\delta r}r\left(i+\frac{1}{2}\right) \qquad \text{(III.59)}$$

$$A(i,i)=\frac{c_4\delta z}{\delta r}\left(r\left(i+\frac{1}{2}\right)+r\left(i-\frac{1}{2}\right)\right)+\left(\frac{2c_6r(i)\delta r}{\delta z}\right) \qquad \text{(III.60)}$$

$$A(i,i-1)=-\frac{c_4\delta z}{\delta r}r\left(i-\frac{1}{2}\right) \qquad \text{(III.61)}$$

$$C(i)=n_i(i,j+1)\left[-\frac{c_6r(i)\delta r}{2}E_z(i,j+1)+\frac{c_7r(i)\delta r}{\delta z}\right]+n_i(i,j-1)\left[\frac{c_7r(i)\delta r}{\delta z}+\frac{c_6r(i)\delta r}{2}E_z(i,j-1)\right]-n_e(i,j)c_{12}\alpha_0(i,j)\mu_{e\perp}(i,j)E_z(i,j)r(i)\delta r\delta z$$
$$-c_{13}\alpha_0(i,j)\frac{r(i)\delta r}{2\delta z}D_e(i,j)\left[n_e(i,j+1)-n_e(i,j-1)\right] \qquad \text{(III.62)}$$

✓/ قل الكهربائي والكمون الكهربائي:

$$E_z^*(\mathrm{i},\mathrm{j}+1) = \mathrm{c}_9\left(\mathrm{n_i}(\mathrm{i},\mathrm{j}) - \mathrm{n_e}(\mathrm{i},\mathrm{j})\right) + \mathrm{E_z^*}(\mathrm{i},\mathrm{j}-1) \quad \text{(III.63)}$$

أما الكمون الكهربائي فيحسب بالعلاقة:

$$E_z = -\overrightarrow{grad_z}V = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad \text{(III.64)}$$

$$V^*(i,j+1) = V^*(i,j-1) - 2\delta z E_z^*(i,j) \quad \text{(III.65)}$$

III-2-3- الشروط ا دية و ا لول الأولية:

من النقاط ا همة حل ا عادلات التفاضلية معرفة ا لول الأولية والشروط ا دية، لذلك وجب علينا ديدها بالنسبة للمقادير الفيزيائية ا طلوب حسا ا.

1) الشروط ا دية:

- **على مستوى اللبوس :**

$$n_e(r,z)|_{z=0} = 0 \quad \text{(III.66)}$$

$$n_e(r,z)|_{z=H} = 0 \quad \text{(III.67)}$$

$$\left.\frac{\partial n_i(r,z)}{\partial z}\right|_{z=0} = 0 \quad \text{(III.68)}$$

$$\left.\frac{\partial n_i(r,z)}{\partial z}\right|_{z=H} = 0 \quad \text{(III.69)}$$

$$E_z(r,z)|_{z=0} = 0 \quad \text{(III.70)}$$

إذا أخذنا بع الإعتبار الإصدار الثانوي للإلكترونات على مستوى ا دف، فإن كثافة التدفق الإلكترو تعطى بـ:

$$J_e|_{Z=H} = -\gamma J_i|_{Z=H} \quad \text{(III.71)}$$

γ: ثل معامل الإصدار الثانوي الإلكترو

- **على مستوى ور و حافة الأسطوانة:**

$$\left.\frac{\partial n_e(r,z)}{\partial r}\right|_{r=0} = 0 \quad \text{(III.72)}$$

$$n_e(r,z)|_{r=R} = 0 \quad \text{(III.73)}$$

$$\left.\frac{\partial n_i(r,z)}{\partial r}\right|_{r=0} = 0 \quad \text{(III.74)}$$

$$n_i(r,z)|_{r=R} = 0 \quad \text{(III.75)}$$

2) ا لول الأولية:

$$\mathrm{n_e}(r,z) = 1 \quad \text{(III.76)}$$

$$\mathrm{n_i}(r,z) = 1 \quad \text{(III.77)}$$

$$\mathrm{E_z}(r,z) = 1 \quad \text{(III.78)}$$

بعد تطبيق طريقة ا جوم ا نتهية و ديد الشروط ا دية و ا لول الأولية عادلة الإستمرارية بالنسبة للأيونات و الإلكترونات صل على لة معادلات خطية من الشكل:

$$An_{e,i} = B \quad \text{(III.79)}$$

وال كن كتابتها على الشكل ا صفو الآ :

$$[A][n_{e,i}] = [B] \quad \text{(III.80)}$$

لتسهيل حل هذه ا ملة من ا عادلات نلجأ للطرق التكرارية و ا تمثلة إنشاء متتالية لول تقريبية تتوقف عند الوصول للدقة ا طلوبة. تعت طريقة غوص–صيدل أكثر الطرق التكرارية شيوعا و ال تعتمد على:

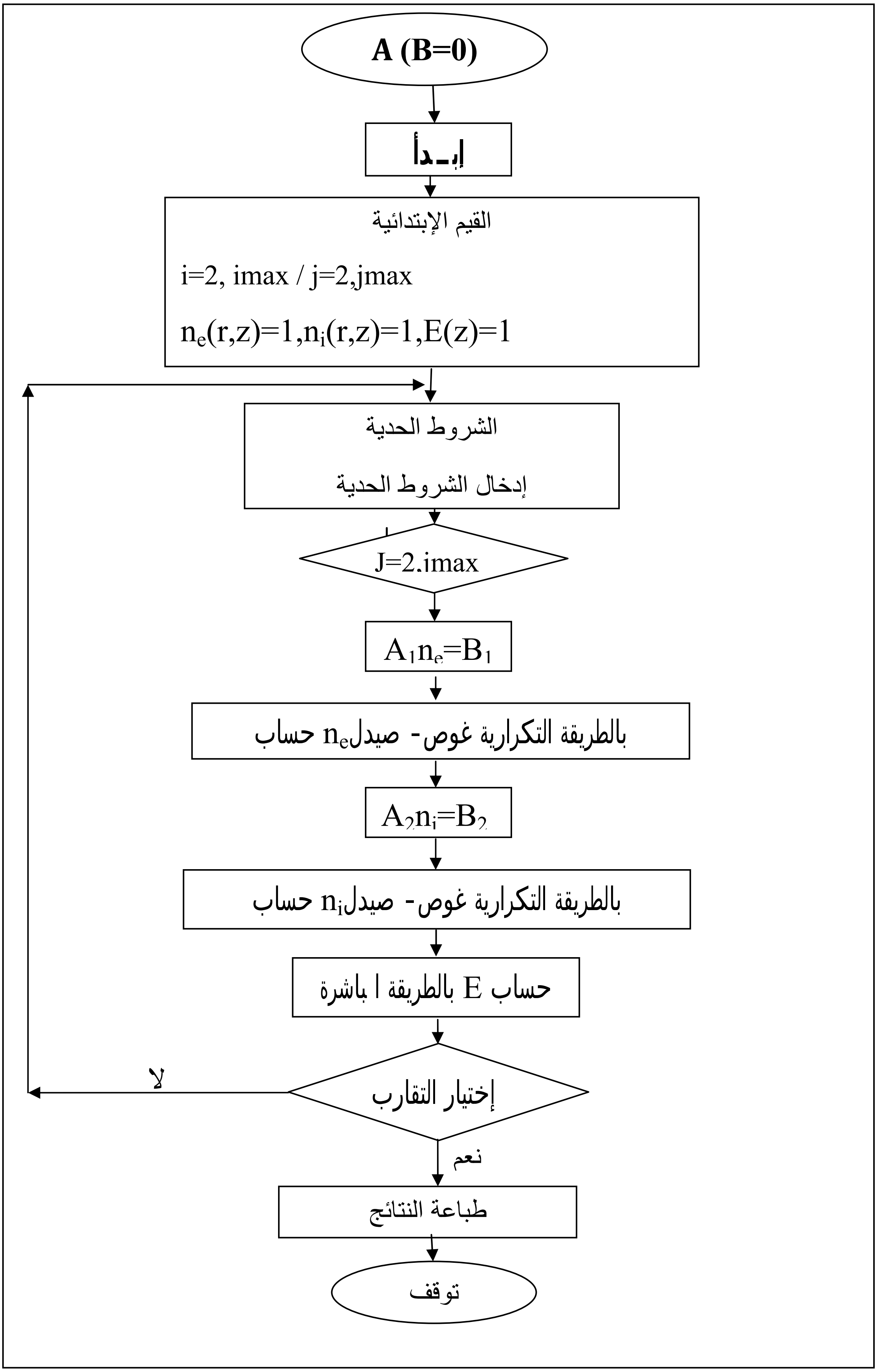
- ✓ إختيار ا ل الإبتدائي X^0
- ✓ إ اد ا ل X^{P+1} من أجل التكرار (P+1)

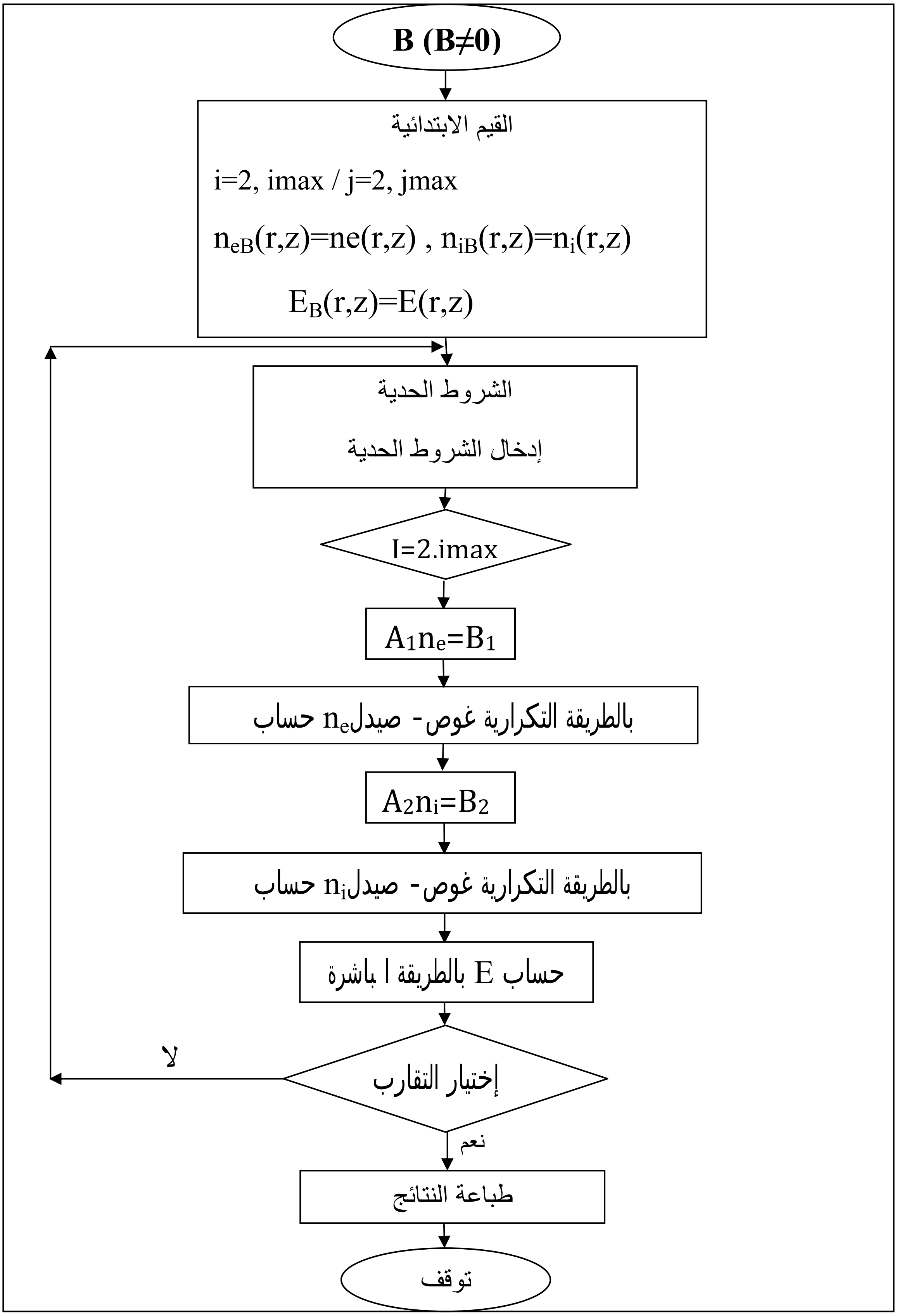
III-3.برنامج ا سـاب:

إن الإعتماد على ا ل اليدوي للمعادلات التفاضلية السابقة غ كاف لإعطاء نتائج دقيقة صائص البلازما ا غنطرونية ا دروسة، لذلك سندعم العمل السابق بال ة الآلية بالطرق العددية (غوص–صيدل) ذه ا عادلات التفاضلية وذلك بإنشاء برنامج بلغة الفورترون، حيث تتم معا ة ال ا اكاة بتثبيت السطر j ومعا ة كل الأعمدة i وذلك وفقا للخطوات التالية:

- إدخال ا عطيات
- ا ساب العددي:كثافة ا سيمات (إلكترونات أيونات) بالطريقة التكرارية، أما ا قل و الكمون الكهربائيان فبا ساب ا باشر.
- طباعة النتائج.

ثل الشكل (III. 4) طط س ا ساب العددي للا نامج ا قترح ذا العمل


A (B=0)
إبـدأ
القيم الإبتدائية
i=2, imax / j=2,jmax
ne(r,z)=1,ni(r,z)=1,E(z)=1
الشروط الحدية
إدخال الشروط الحدية
J=2.imax
A1ne=B1
بالطريقة التكرارية غوص- صيدل ne حساب
A2ni=B2
بالطريقة التكرارية غوص- صيدل ni حساب
حساب E بالطريقة ا باشرة
إختيار التقارب
لا
نعم
طباعة النتائج
توقف



الشكل(2.III) : طط س ا ساب العددي لا نامج ا قترح ذا العمل

مراجع الفصل الثالث:

[1] H. Kumar et S. Roy; *"Two dimensional fluid model of DC and RF plasma in magnetic field"*; 36th AIAA. Plasma Dynamics and Laser Conference, 06-09 Juin 2005, Toronto, Canada.

[2] W. Schmitt. W. E. Kohler and H. Ruder, *"A one dimensional mode of DC glow discharges* ", J. Appl. Phys. **71**(9). 5783-5791. (1992).

[3] S. Michael. Barnes. Tina. J. Colter. And Michael. E. Alta. J. Appl. Phys. **61**(1). (1987).

[4] C. Costin, L. Marques, G. Popa et G. Gousset ; "*2D Fluid Approaches of DC Magnétron Discharge*" ; Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, Université Paris Sud XI, Orsay.

[5] A. Palmero, E .D. van Hattum, W.M. Arnoldbik et F.H.P.M. Habraken; "*Argon plasma modelling in a RF magnetron sputtering system*"; Surface & Coatings Technology; Vol. **188–189**. (2004), pp 392–398.

[6] M. Moisan et J. Pelletier ; *"Physique des plasmas collisionnels*"; Edition sciences, France (2006) ; pp 166-168.

[7] Z. Ballah, F. Khelfaoui et M.T. Meftah; *" Modélisation numérique des propriétés électriques dans un pulvérisateur cathodique magnétron*"; Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, **Vol. 1** n°3. (2009); pp 24-31.

[8] Z. Ballah et F Khelfaoui ; ''*Etude de la modélisation à deux dimensions d'un plasma dans un pulvérisateur cathodique magnétron* " ; SIPP'2011 / UKM Ouargla / 13 - 15 Février (2011).

[9] M. Wilcoxson and V. Manousiouthakis ; "Simulation of a three –moment fluid model of a two-dimentional radio frequency discharge";Chemicnl *Engineering* Science, **Vol**. **51**, No. 7, pp. 1089-1106, 1996

[10] C. Vanhille; A. Lavie et C. Campos-Pozuelo ; *"Modélisation numérique en mécanique*" ; Lavoisier. (2007).

الفصـل الـرابـع

نتـائـج و تـحليـل

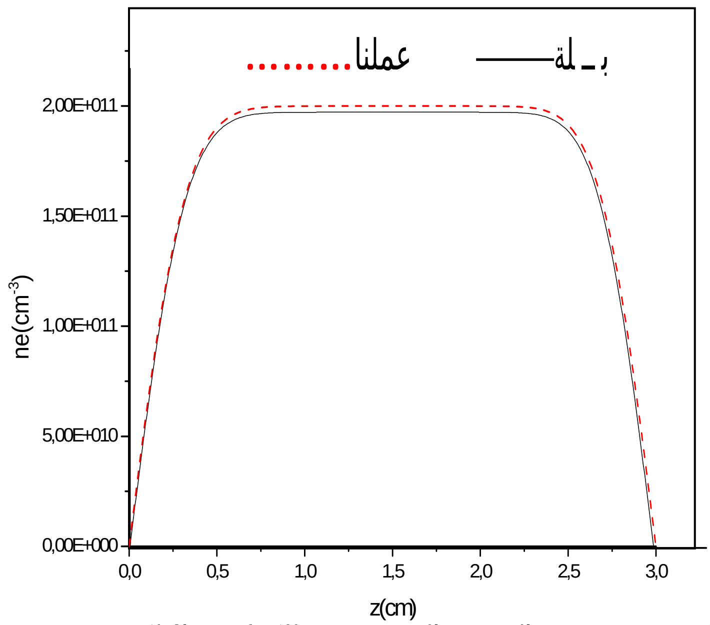
الفصـل الـرابـع

نتـائـج و تـحليـل

IV-3.اختبار صحة المعادلات و البرنامج:

يعتبر هذا العمل تكملة للعمل الذي قامت به (ز. بـلة) [1] [2]، الذي قدمته في بعد واحد xبإستعمال الطريقة العددية الفروق المنتهية بينما نقدمه نحن الآن في البعدين (r و Z) بإستعمال طريقة الحجوم المنتهية.

يمثل الشكل (IV-1) مقارنة بين الكثافة الإلكترونية التي تحصلنا عليها و الكثافة الإلكترونية المقدمة في المرجع[1].



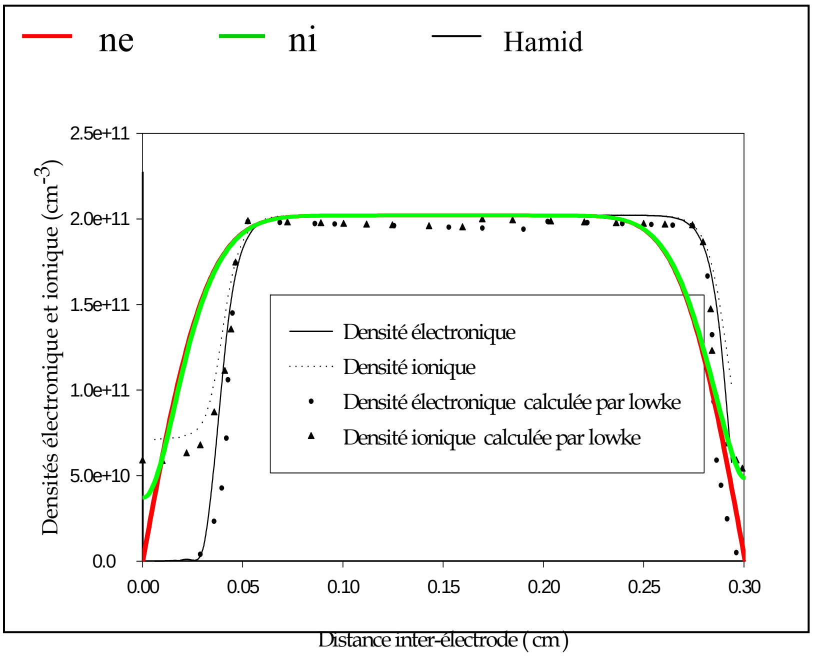
الشكل (IV–1) : التغيـر المـوضعي للكثافـة الإلكترونية

لكي يثبت مصداقية برنامجنا توافق النتائج التي تحصلنا عليها مع النتائج المتحصل عليها في المرجع [1]. حيث في الحساب استعملنا نفس الشروط من ضغط و درجة حرارة. من خلال الشكل نلاحظ التطابق التام بين نتائجنا على المحور Z (البعد بين المهبط و المصعد) ونتائج المرجع[1] على البعد المدروس x(البعد بين المهبط و المصعد).

لإثبات صحة الطريقة العددية و البرنامج الذي اعتمدناه لحل المعادلات التفاضلية نقوم أيضا بدراسة الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية في نفس شروط المرجع [3].و الذي أعطى الخصائص الكهربائية لبلازما الأرغون بين لبوسين متوازيين البعد بينهما(0.3 cm) و جهد مطبق (100V) و درجة حرارة (300 K).

الشكل (2-IV) يمثل مقارنة بين الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية التي تحصلنا عليها و تلك الواردة في المرجع [2]. من خلال الشكل نلاحظ أن المنحنيين لهما نفس النسق العام تقريبا من ناحية الشكل، أما من ناحية التصرف فيكون هناك اختلاف في قيم الكثافة في منطقة الغمد المهبطي و الغمد المصعدي. بالنسبة للكثافة الإلكترونية مثلا عند منطقة الغمد المهبطي نلاحظ خلوها من الكثافة الإلكترونية على مسافة (0.025cm) في المنحنى الوارد في المرجع [3]، بخلاف المنحنى الذي تحصلنا عليه و الذي يظهر وجود الكثافة الإلكترونية في هذه المنطقة.

هذا الإختلاف في تصرف الكثافة يعود للعامل الزمني، حيث استخدمنا نظاما مستقلا عن الزمن فيما عمل A. HAMID[3] بنظام متعلق بالزمن.



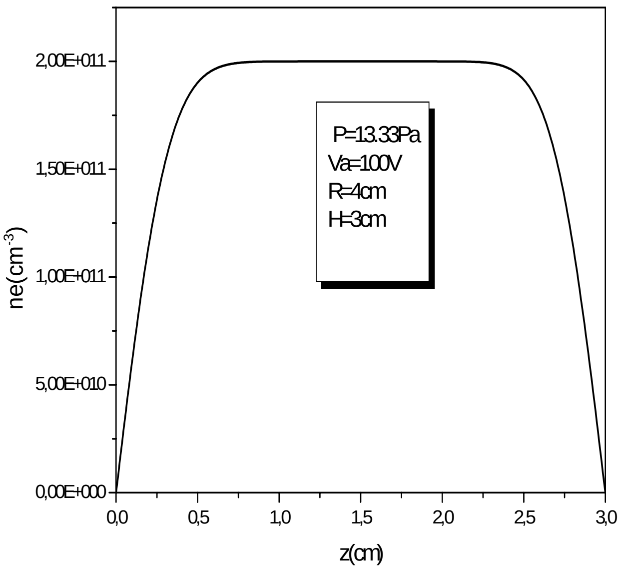
الشكل(2-IV) : التغير الموضعي للكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية

IV - 1.التـغ ا وضعـي صـائص البـلازما غيـاب ا ـقل ا غناطيسـي:

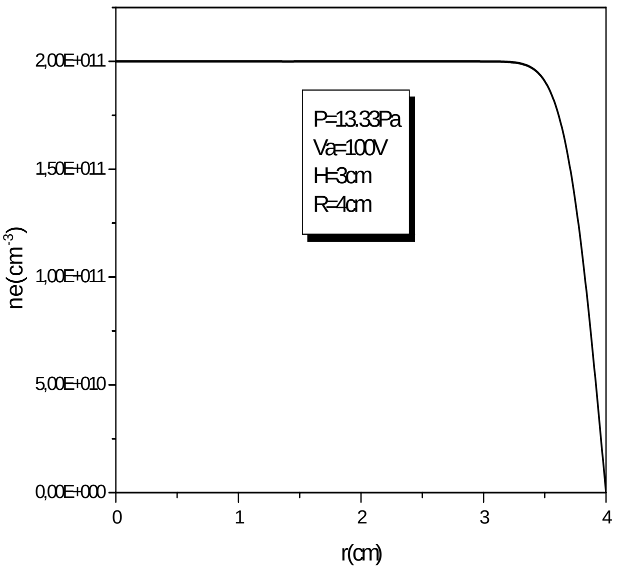
IV- 1- 1.التغ ا وضعي للكثافة الإلكترونية:

ثل الشكل (3-IV) التغ ا وضعي للكثافة الإلكترونية بدلالة البعد ب ا هبط و ا صعد (z).النتائج أخذناها عند النقطة (r=2cm) كن تقسيم هذا ا نحـ إ ثلاثة أجـزاء. ا ـزء الأول من(z=0 cm إ z=0.723cm) الكثافة الإلكترونية تنطلق من قيـمة معدومة و تتزايد شيئا فشيئا كلما ابتعدنا عن ا هبط إ أن تصـل إ أقصـى قيمة ا حيث ($ne=1.987.10^{11}cm^{-3}$). تسمى هذه ا نطقة بالغـمد ا هبطي. أمـا ا زء الثا من هذا ا نح فيمتد من (z= 0.723 cm إ z=2.33cm) حيث تستقر الكثافة الإلكترونية عند نفس القيمة السابقة على طول هذا ا ـال. يعود هذا الثبوت ل عة التعادل الكهربائي الذي تتميز به البلازما، و تسمى هذه ا نطقة بقلب البلازما. ا زء الأخ (z= 2.33cm إ z=3cm) يدعى بالغمد ا هبطي، حيث تتناقص الكثافة الإلكترونية من أقصى قيمة ا شيئا فشيئا كلما اقتربنا من ا صعد إ أن تنعدم على سطحه.

القيم ا عدومة ال يأخذها التوزيع الإلكترو عند سطحي ا هبط و ا صعد تترجم الشروط ا دية ا عطاة الفصل السابق.



الشكل(IV-3) : التغيـر الـموضعي للكثافة الإلكترونية بدلالة البعـد

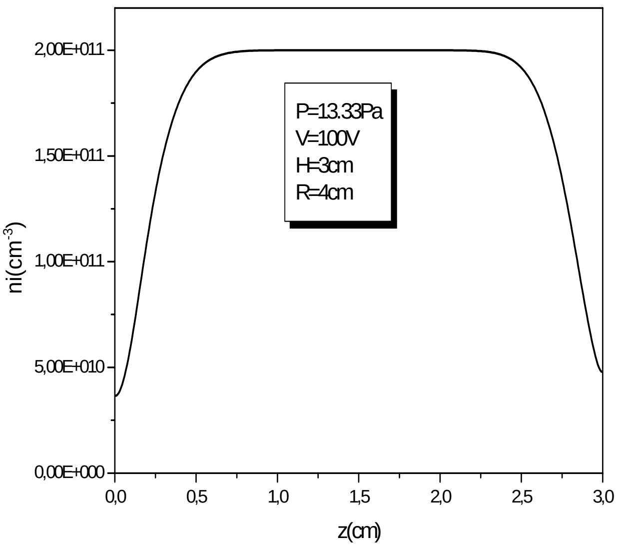


الشكل(IV-4) : التغيـر الـموضعي للكثافة الإلكترونية بدلالة البعـد r

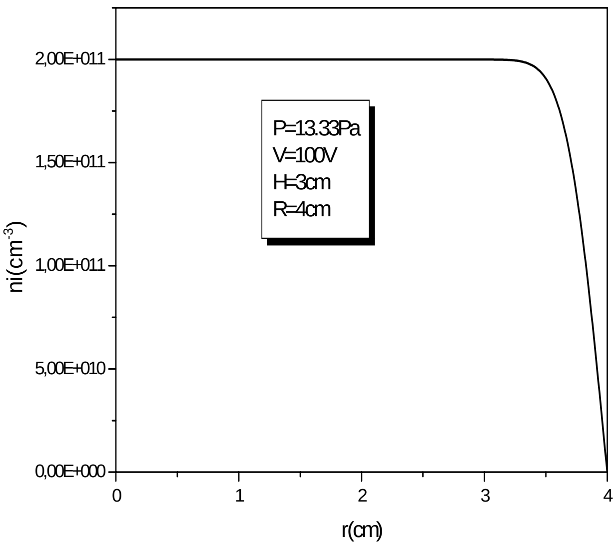
فيما ص توزيع الكثافة الإلكترونية على ا ور r فهي تتصرف بنفس تصرفها على ا ور z.
يوضح الشكل (4-IV) التوزيع الإلكترو فقط على نصف القطر وذلك بسبب التناظر،النتائج مأخوذة عند نقطة قريبة جدا من سطح ا هبط.
عند ور الأسطوانة تأخذ الكثافة الإلكترونية أقصى قيمة ا ($ne=2.10^{11}cm^{-3}$) و تستقر عندها على طول (3.26cm) هذا ما يناه قلب البلازما تتناقص شيئا فشيئا إ أن تنعدم اما عند ا افة.

IV- 1- 2.التغ ا وضعي للكثافة الأيونيـة:

ـثل الشكلان (5-IV) و (6-IV) التغ ا وضعـي للكثافة الأيونية على ا ورين r و z على التوا . حيث نلاحظ أن الكثافة الأيونية تأخذ نفس تصرف الكثافة الإلكترونية على ا ورين، إلا أنه بدل القيم ا عدومة للكثافة الإلكترونية عند نقاط البداية و النهاية تأخذ قيم دنيا.
($ni=4.7.10^{10}cm^{-3}$) وذلك لاختلاف الشروط ا دية ا طبقة على مستوى اللبوس وحافة الاسطوانة.



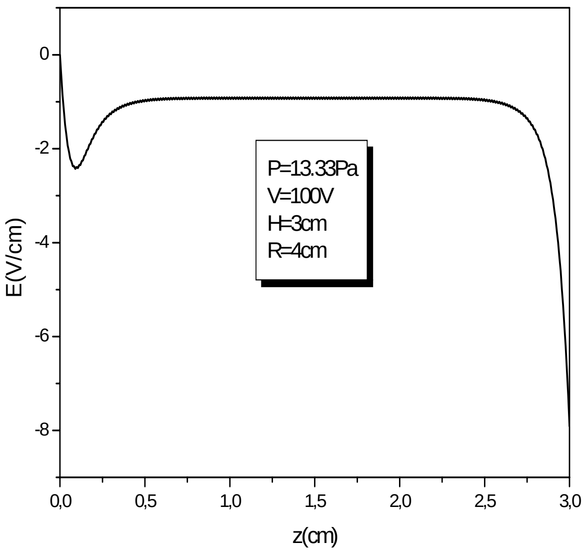
الشكل(5-IV) : التغيـر الـموضعي للكثافة الأيونية بدلالة البعـد z



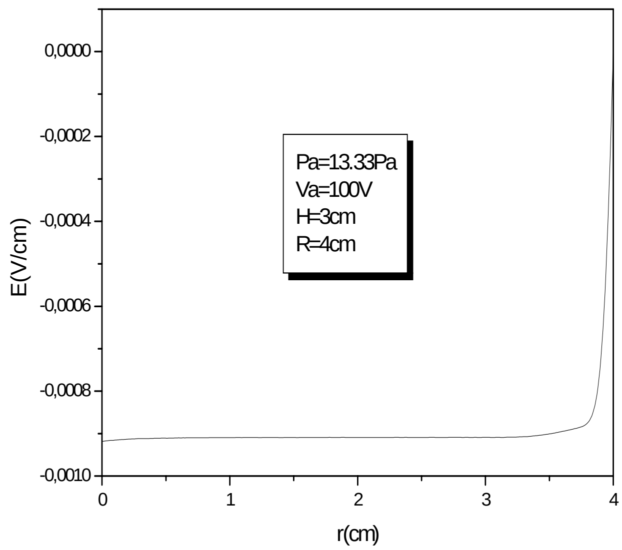
الشكل(6-IV) : التغيـر الـموضعي للكثافة الأيونية بدلالة البعـد r

IV- 1- 3.التغ ا وضعي للحقل الكهربائي:

ثل الشكل (7-IV) التغ ا وضعي للحقل الكهربائي على ا ور z. بالنسبة نطقة الغمد ا هبطي تنطلق قيمة ا قل الكهربائي بقيمة معدومة وتتزايد ال صغ جدا بالقرب من ا هبط، تعود لتتناقص كلما ابتعدنا عنه إ أن تأخذ أقصى قيمة ا عند (z=0.538 cm)، قيمتها ا طلقة(E=0.919719 Volt/cm). تعت هذه النقطة بداية ال ثبوت ا قل الكهربائي على طول (2.52 cm), حيث نلاحظ أن هذا ا ال يوافق نفس ال ثبوت و تساوي الكثافة الإلكترونية و الأيونية. ثل هذه ا نطقة قلب البلازما. تتناقص قيمة ا قل الكهربائي شيئا فشيئا كلما اقتربنا من ا صعد على طول منطقة الغمد ا صعدي إ أن تصل لأد قيمة هذا ما يفسره تناقص قيم الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية هذه ا نطقة.



الشكل(IV-7) : التغيـر الـموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعـد **z**



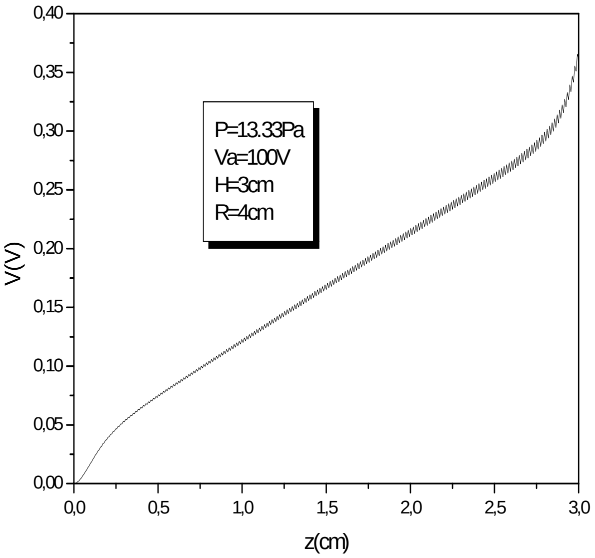
الشكل(IV-8) : التغيـر الـموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعـد r

ثل الشكل (8-IV) التغ ا وضعي للحقل الكهربائي على ا ورr، حيث نلاحظ ثبوت قيمة ا قل على طول قلب البلازما، يكون هناك تزايد سريع ابتداء من (z=3.5cm) كلما اقتربت من حافة الأسطوانة. نش هنا أيضا لتناظر ا سألة حيث يأخذ تصرف ا قل الكهربائي نفس الشكل ا زء الثا من الأسطوانة.

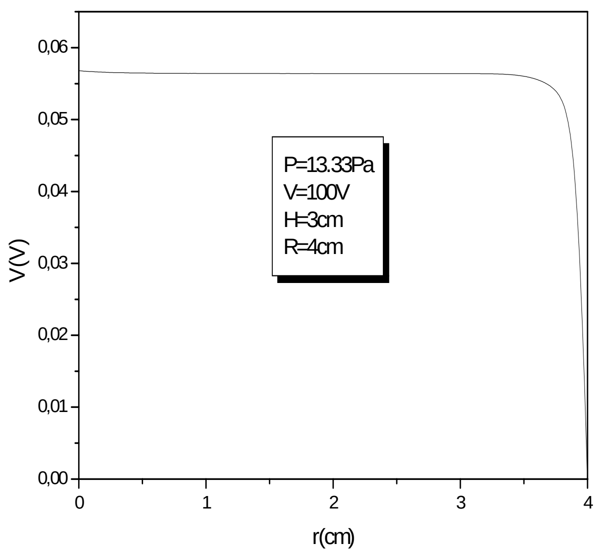
IV- 1- 4.التغ / وضعي للكمون الكهربائي:

ثل الشكل (9-IV) التغ ا وضعي للكمون الكهربائي على ا ور z حيث تكون قيمة الكمون تزايد مستمر كامل ا ال ب ا هبط و ا صعد تقريبا، و خاصة على طول قلب البلازما. هذه النتيجة منتظرة لاستقرار ا قل الكهربائي هذا ا ال و علاقته بالكمون الكهربائي.

أما بالنسبة لتصرفه على ا ور rفهو مدون الشكل (10-IV) حيث نلاحظ استقرار الكمون عند القيمة (0.056 Volt) قلب البلازما و ثل هذه القيمة كمون البلازما.



الشكل(9-IV) : التغيـر الـموضعي للكمون الكهربـائي بدلالة البعـد z

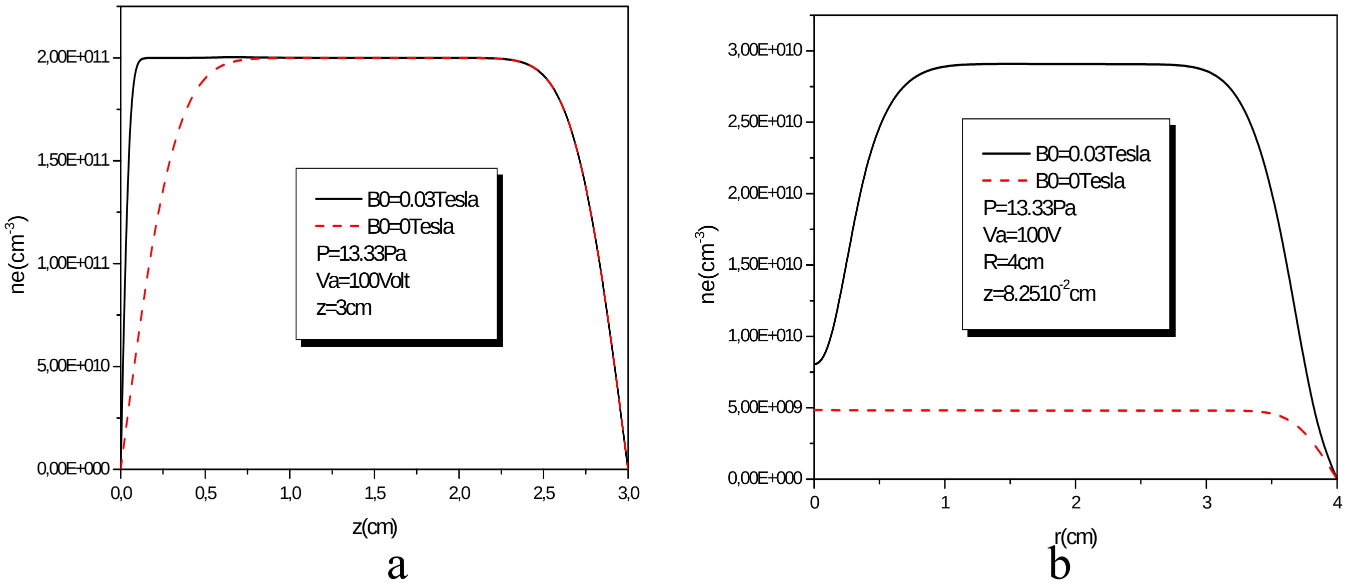


الشكل(10-IV) : التغيـر الـموضعي للكمون الكهربائي بدلالة البعـد r

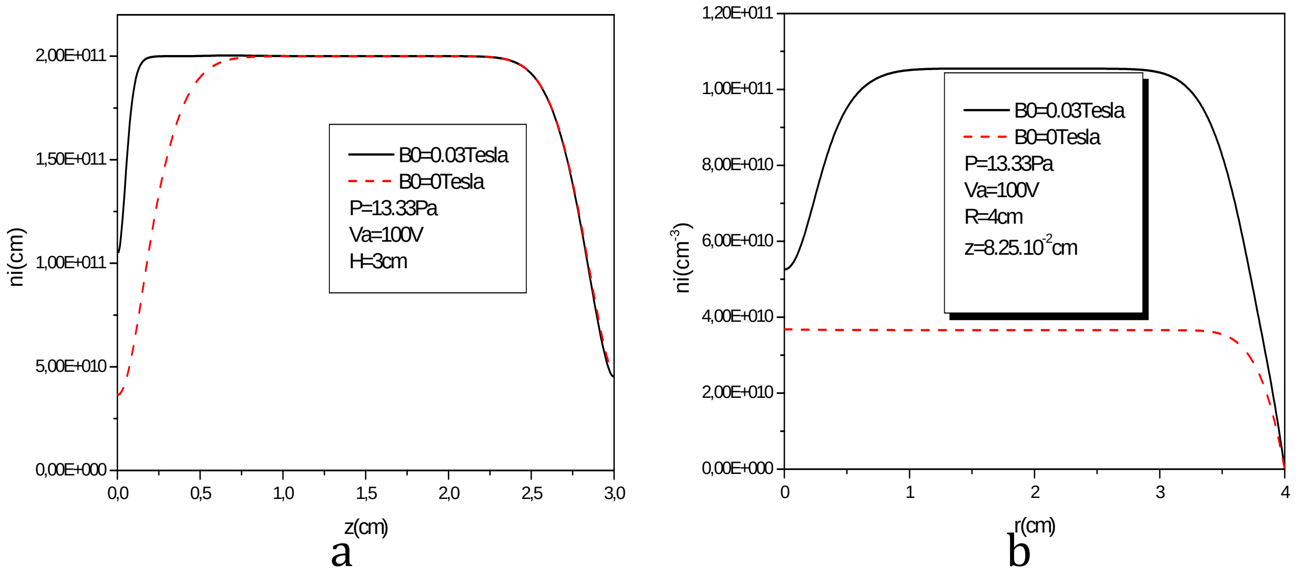
IV - 2.تأث ا قل ا غناطيسي على ا صائص الكهربائية للبلازما:

لاحظنا الفصل السابق شكل تغ ا قل ا غناطيسي على ا وربن r و z وفقا للمعادلة (15.III) و (16.III)، حيث ينحصر هذا التغ على ا ور z ال صغ جدا بالقرب من هبط ا حوا (0.6cm). أما بالنسبة للمحور r فيكون ظهور ا قل ا غناطيسي على كامل القطر و يأخذ القيمة $B_0(z)$ معظم هذا ا ال حوا (3.2cm) منه.

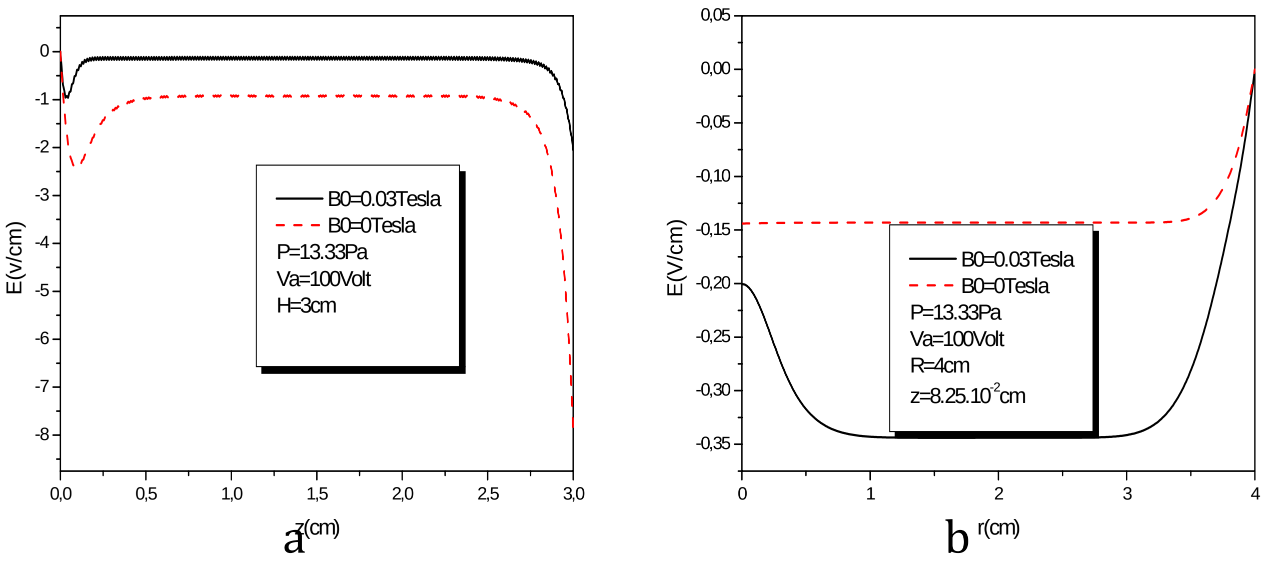
على أساس هذا التغ للحقل ا غناطيسي يكون تغ كل من الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية، ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي على النحو التا :



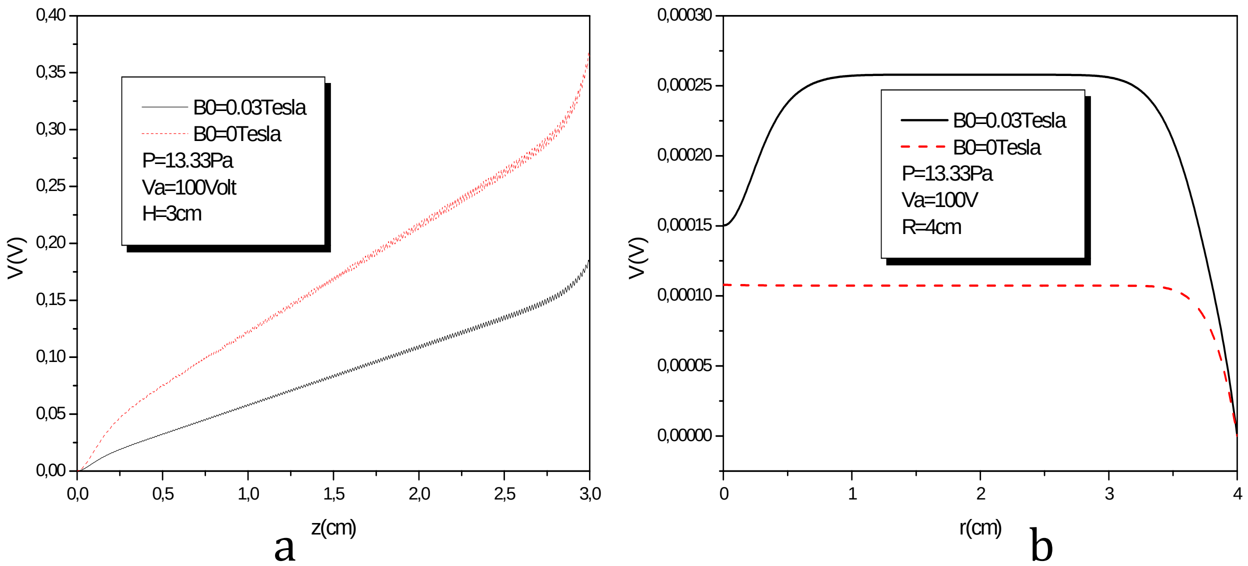
الشكل(11-IV) : التغيـر ا ـموضعي للكثـافة الإلكترونيـة بدلالـة الـحقل ا ـمغناطيسي



الشكل(12-IV) : التغيـر الـموضعي للكثـافة الأيـونيـة بدلالـة الـحقل الـمغناطيسي



الشكل(13-IV) : التغيـر ا وضعـي للحقـل الكهربـائـي بدلالـة الـحقل الـمغناطيسي



الشكل(14-IV) : التغيـر الـموضعي للكمـون الكهربـائي بدلالـة الـحقل الـمغناطيسي

ثل الأشكال من (11-IV) إ (14-IV) التغ ا وضعي للكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي بدلالة ا قل ا غناطيسي على ا ورين z و r على التوا .

نلاحظ من خلال الشكل (a.11-IV) و (a.12-IV) ارتفاع الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية وجود ا قل ا غناطيسي انطلاقا من ا هبط و على طول ا سافة (0.057cm). يوافق هذا ا ال تقريبا ال تطبيق ا قل ا غناطيسي ب ا صعد و ا هبط و تكون الزيادة بنسبة (1.33%) يبدأ ا نحنيان (B=0, B=0.03Tesla) التطابق كلما ابتعدنا عن ا هبط، إ أن دث التطابق التام بينهما، ويوافق هذا التصرف ال انعدام ا قل ا غناطيسي.

الشكلان (b.11-IV) و (b.12-IV) ثلان تغ الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية على ا ورr، و ذلك عند نقطة z قريبة جدا من ا هبط. من خلال هذين الشكل تظهر زيادة الكثافة الإلكترونية و الأيونية على كامل نصف القطر بنسبة كب ة، لاف ما رأيناه على ا ورz. حيث تقدر نسبة زيادة الكثافة الإلكترونية ا 23.6% أما الكثافة الأيونية فتزيد بنسبة 6.8%، يعود ا نحنيان للتطابق عند ا افة حيث تتساوى قيمة الكثافة (الإلكترونية أو الأيونية) غياب ا قل

ا غناطيسي و وجوده، و هذا راجع لانعدام ا قل ا غناطيسي هذه النقطة و الشروط ا دية ا طبقة عندها. كن الإشارة أيضا لاحظة مهمة إذ أنه كلما ابتعدنا عن ا هبط (زادت إحداثية النقطة z) كلما قل الفرق ب القيمة القصوى إ أن ينعدم هذا الفرق، و يتطابق ا نحنيان اما بالنسبة للكثافة الإلكترونية أو الكثافة الأيونية، وهي نتيجة منتظرة وفقا لشكل تغ ا قل ا غناطيسي.

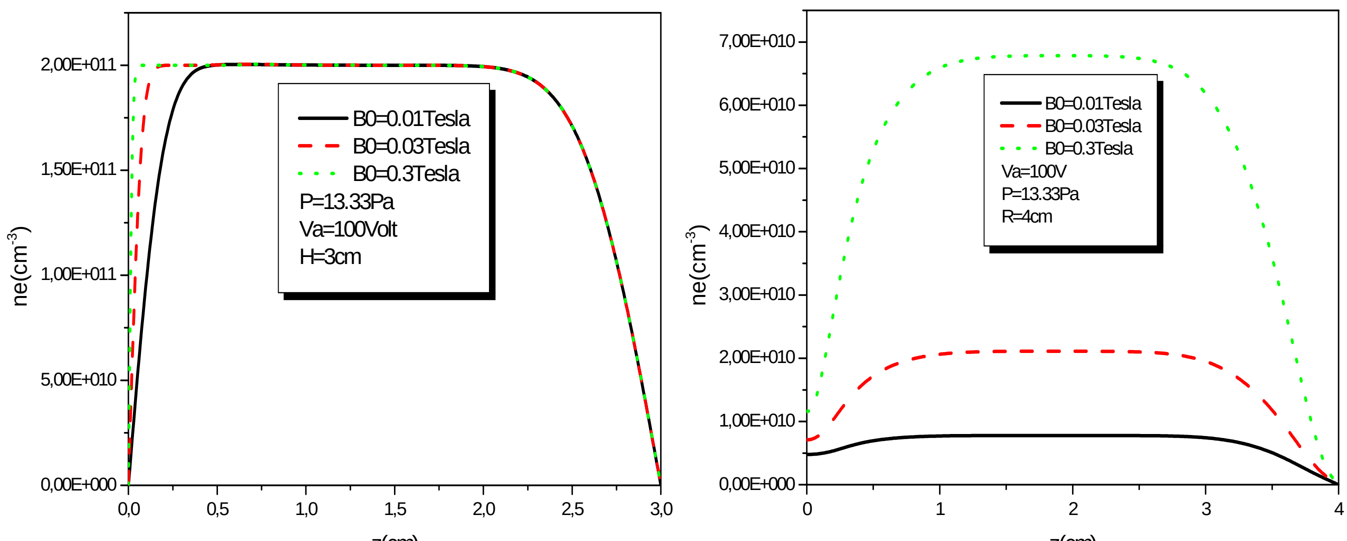
هذه الزيادة الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية تتولد عنها زيادة قيمة ا قل الكهربائي بنسبة0.76% على ا ور z و2.2% على ا ور.r زيادة الكمون الكهربائي على ا ور بنسبة1.49%.

نفسر هذا التأث للحقل ا غناطيسي على ا صائص الكهربائية للبلازما بتأث ه الكب على حركية الإلكترونات حيث يعمل على تغي مسارا ا إ مسارات دائرية حول خطوطه، بالتا ارتفاع كثافتها و قدر ا على تأين ذرات الغاز، و ال ينتج عنها ارتفاع الكثافة الأيونية.

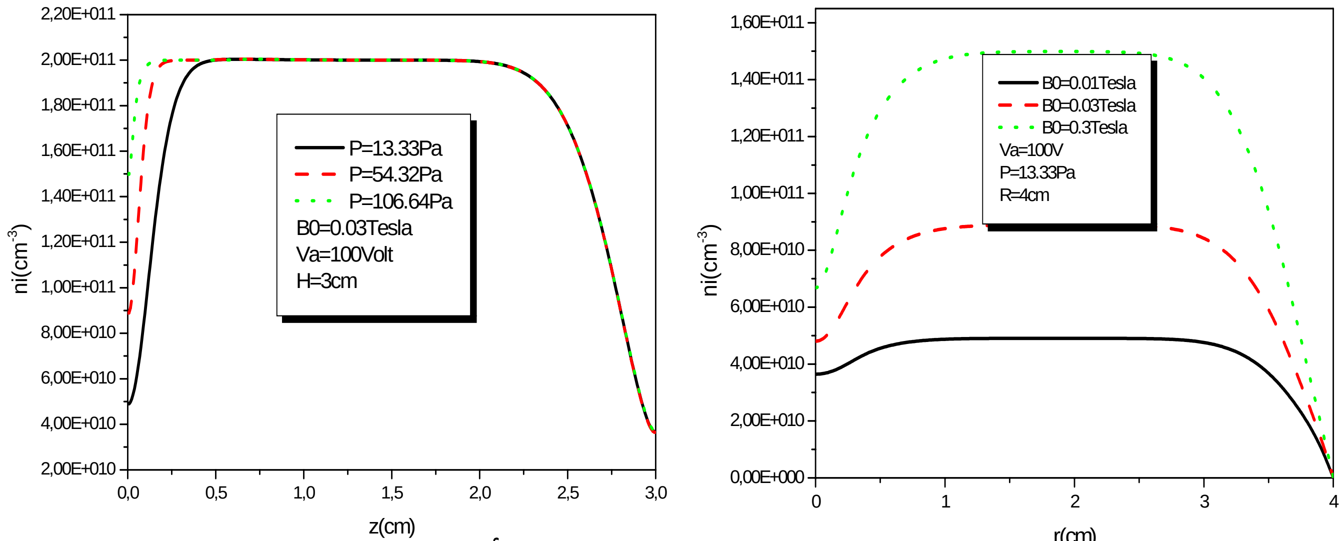
IV - 2.تأثـ العوامـل ا ـاكـروسكوبية على الـخصائص الكهربـائية للبلازمـا:

IV - 1.2.تأثـ شدة الـحقل الـمغناطيسي:

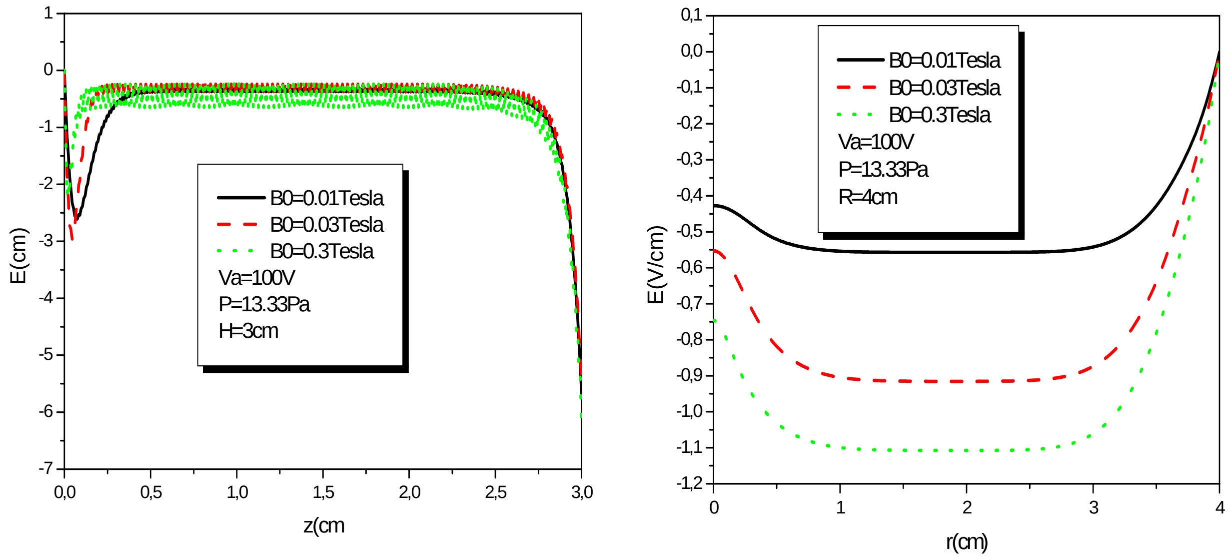
ما يلي سنثبت كلا من الضغط والكمون ا طبق و شكل تغ ا قل ا غناطيسي و نغ سعته B_0 ب القيم (0.3-0.03-0.01 Tesla). وفقا ذه الشروط تتغ الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية و ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي على النحو الآ :



الشكل(IV- 15) : التغيـر الـموضعي للكثافـة الإلكترونيـة بدلالـة شـدة الـحقل الـمغناطيسي

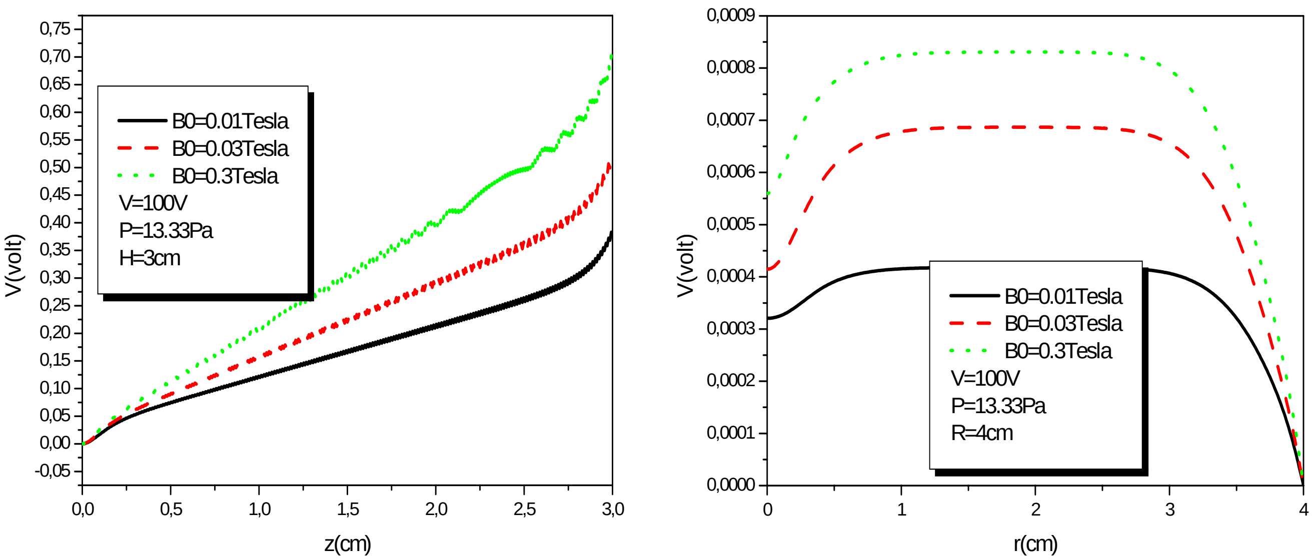


الشكل(IV-16) : التغيـر الـموضعي للكثافـة الأيونيـة بدلالـة شـدة الـحقل الـمغناطيسي



الشكل(17-IV) : التغيـر الـموضعي للحقـل الكهربـائي

بدلالـة شـدة الـحقل الـمغناطيسي



الشكل(18-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكمـون الكهربـائي

بدلالـة شدة الـحقل الـمغناطيسي

من خلال الأشكال (15-IV) إ (18-IV) نلاحظ زيادة كل من الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية و ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي كلما زادت شدة ا قل ا غناطيسي، و تلف نسبة الزيادة باختلاف التغ السعة B_0.

بزيادة B_0 بثلاثة أضعاف (0.03~0.01 Tesla) تكون نسبة الزيادة على ا ور Z للكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية مرتفعة نوعا ما، و تقدر وا (4.46%)، أما ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي فتكون نسبة الزيادة فيهما ضعيفة (0.8% بالنسبة للحقل الكهربائي و 0.11% بالنسبة للكمون الكهربائي). و بارتفاع هذه السعة بعشرة أضعاف (0.03~0.3Tesla) تتناقص نسبة الزيادة للإلكترونات و الأيونات إ 2.27%، كما تتناقص نسبة الزيادة ا قل الكهربائي إ 0.23%.

أما على ا ور r فنسبة زيادة ا قادير الكهربائية تتناسب طردا مع زيادة شدة ا قل ا غناطيسي، حيث أنه كلما زدنا من شدة ا قل ا غناطيسي كلما زادت قيمة ا قادير الكهربائية.

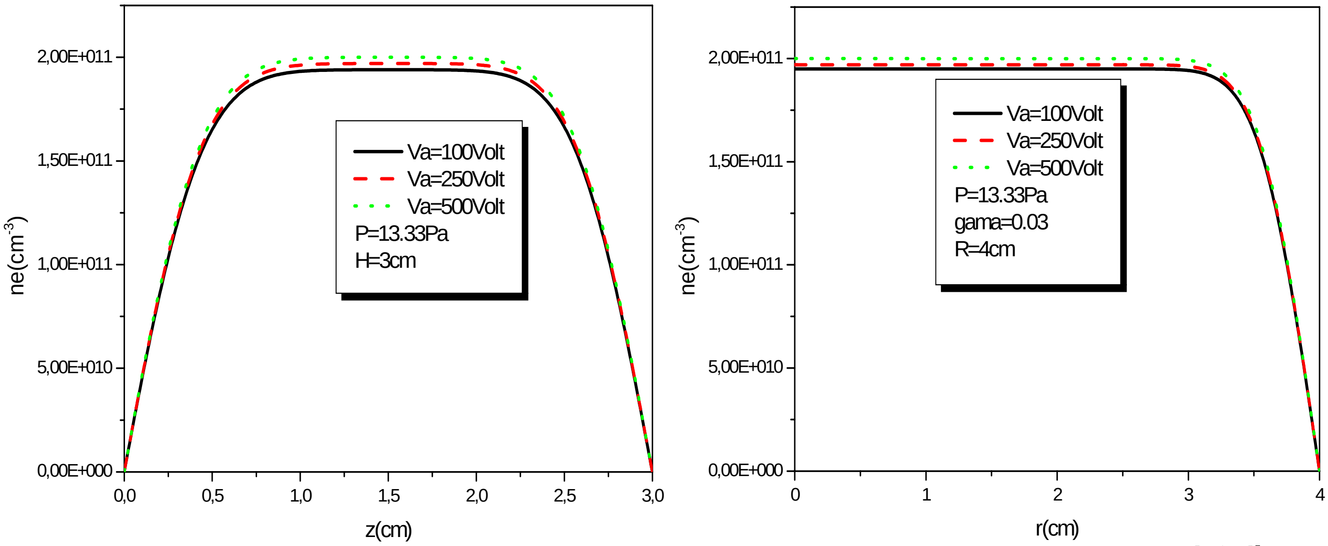
ا دول (1-IV) ثل تغ نسبة زيادة ا صائص الكهربائية على ا ور r بتغ سعة ا قل B_0.

نسبة الزيادة% / زيادة B_0 Tesla	كثافة الإلكترونات	كثافة الأيونات	ا قل الكهربائي	الكمون الكهربائي
0.03~0.01	13.68	4.46	3	2.73
0.3~0.03	46.57	7.14	1.29	1.86

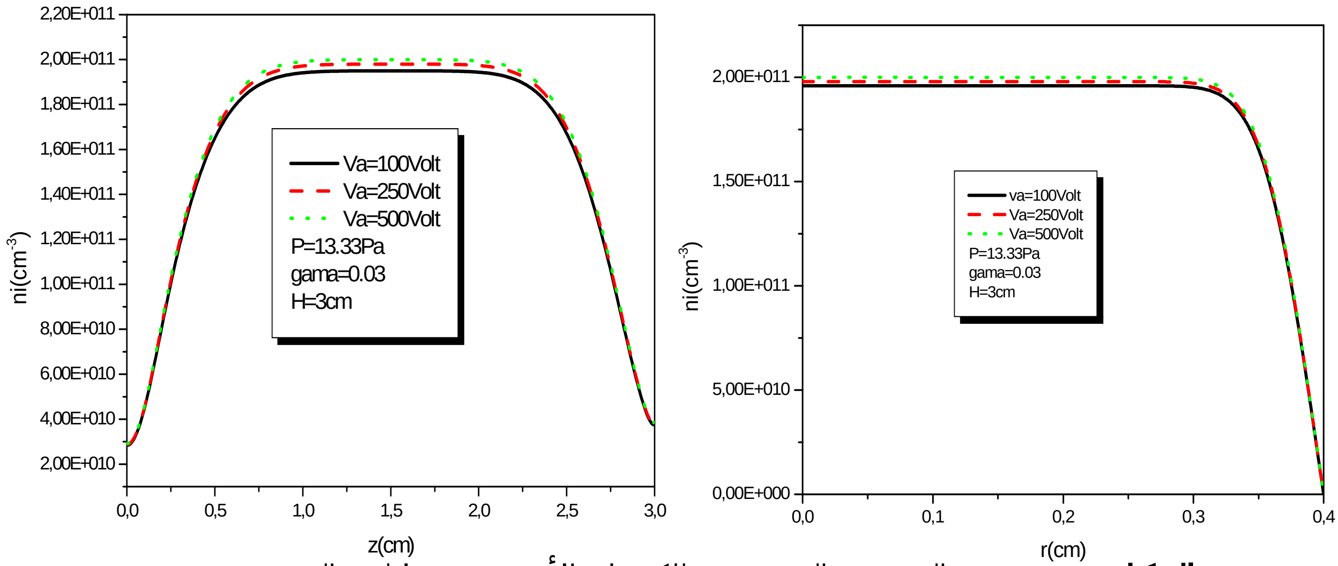
ا دول(1-IV) : تغيـر نسبـة زيـادة الـخصائص الكهربـائية بتغيـر سعـة الـحقل الـمغناطيسي على ا ـحور r

IV-2.2.تـأثـ الكمون الـمطبق:

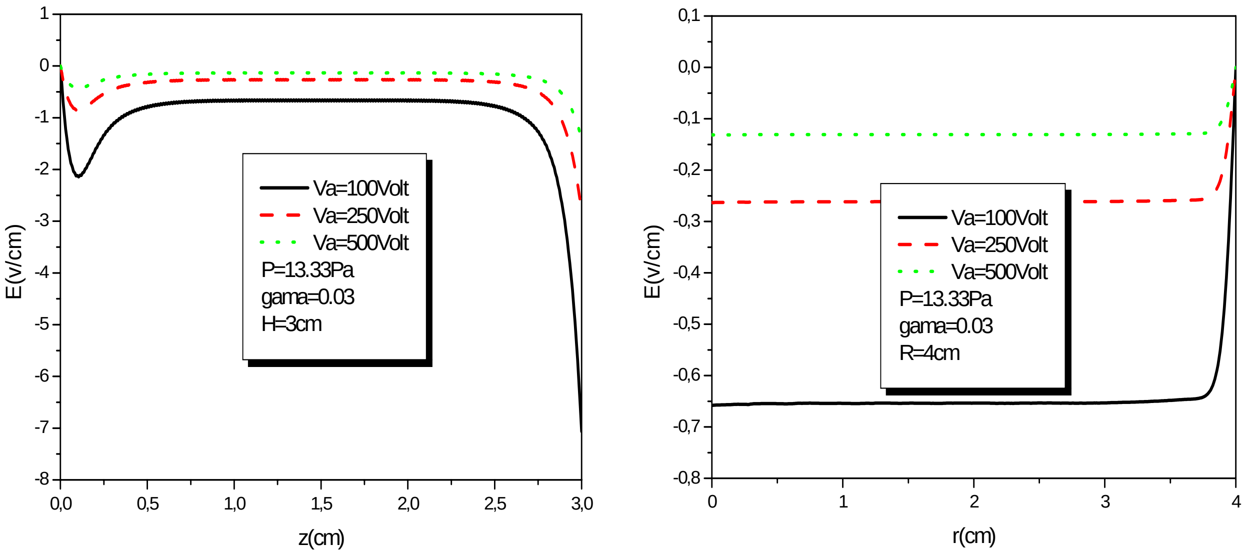
لدراسة تأث الكمون ا طبق على خصائص البلازما نقوم ساب هذه الأخ ة بتطبيق حقل مغناطيسي شدته (B$_0$= 0.03Tesla) وضغط (P=13.33Pa) مع تغي قيمة الكمون ا طبق القيم (100 ,250 ,500Volt) فيكون تغ منحنيات تغ هذه ا صائص كما يلي.



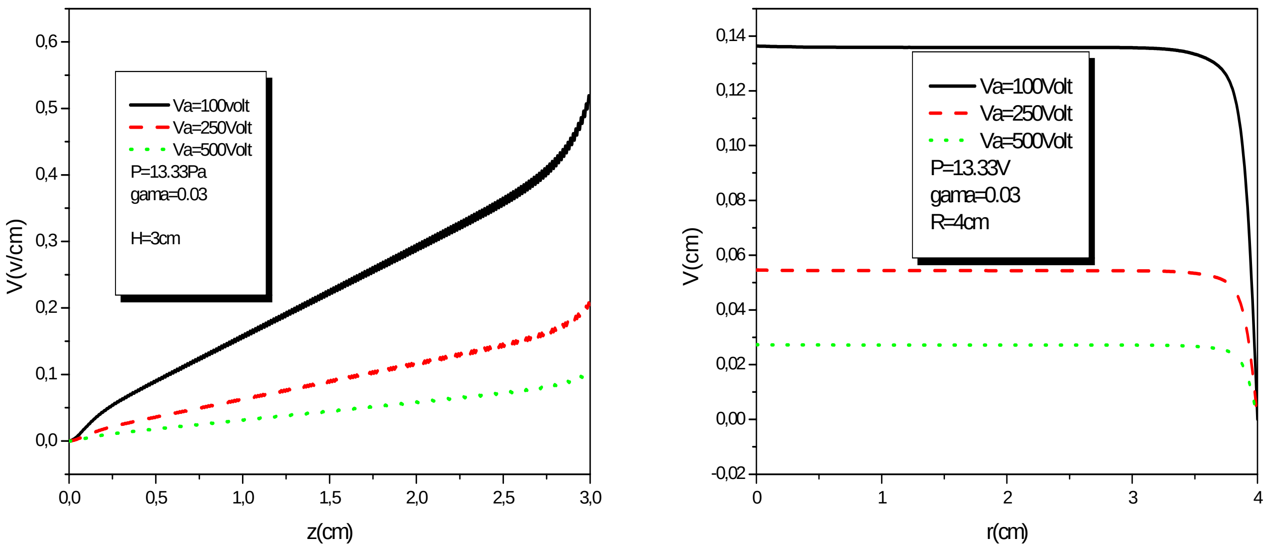
الشكل(19-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكثـافة الإلكترونيـة بدلالـة الـجهد الـمطبـق



الشكل(20-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكثـافة الأيـونيـة بدلالـة الـجهد الـمطبـق



الشكل(21-IV) : الـتغيـر الـموضعي للحقل الكـهربـائي بدلالـة الـجهد الـمطبـق



الشكل(22-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكمـون الكـهربـائي بدلالـة الـجهد الـمطبـق

ثل الأشكال من (19-IV) إ (22-IV) التغ ا وضعي للكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية وا قل الكهربائي والكمون الكهربائي بدلالة ا هد ا طبق.

من خلال هذه الأشكال نلاحظ أن الكمون ا طبق يكون له تأث هو الآخر عل خصائص البلازما, حيث تزيد كل من الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية كلما زاد الكمون ا طبق، مثلا ب (100و250)تكون نسبة الزيادة بالنسبة للكثافت الإلكترونية و الأيونية حوا 1.01% أما ب (250و500)فتكون نسبة الزيادة حدود 1.06%، فيما يزيد ا قل الكهربائي بنسبة ضئيلة تقدر بـ 0.2%، أما الكمون الكهربائي فيتناسب عكسيا مع الكمون ا طبق

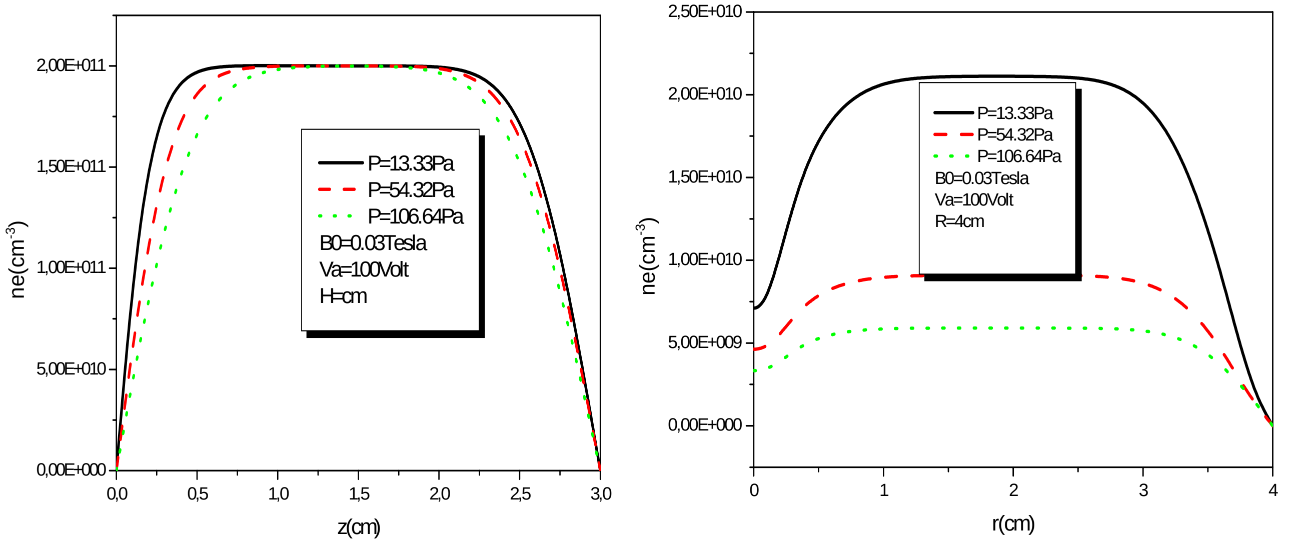
ا دول (2-IV) ثل نسبة الزيادة للحقل الكهربائي و الكمون الكهربائي بدلالة ا هد ا طبق.

الزيادة ا هد ا طبق (Volt)	250-100	500-250
نسبة الزيادة للحقل الكهربائي	0.4%	0.15%
نسبة زيادة الكمون الكهربائي	0.03%	0.14%

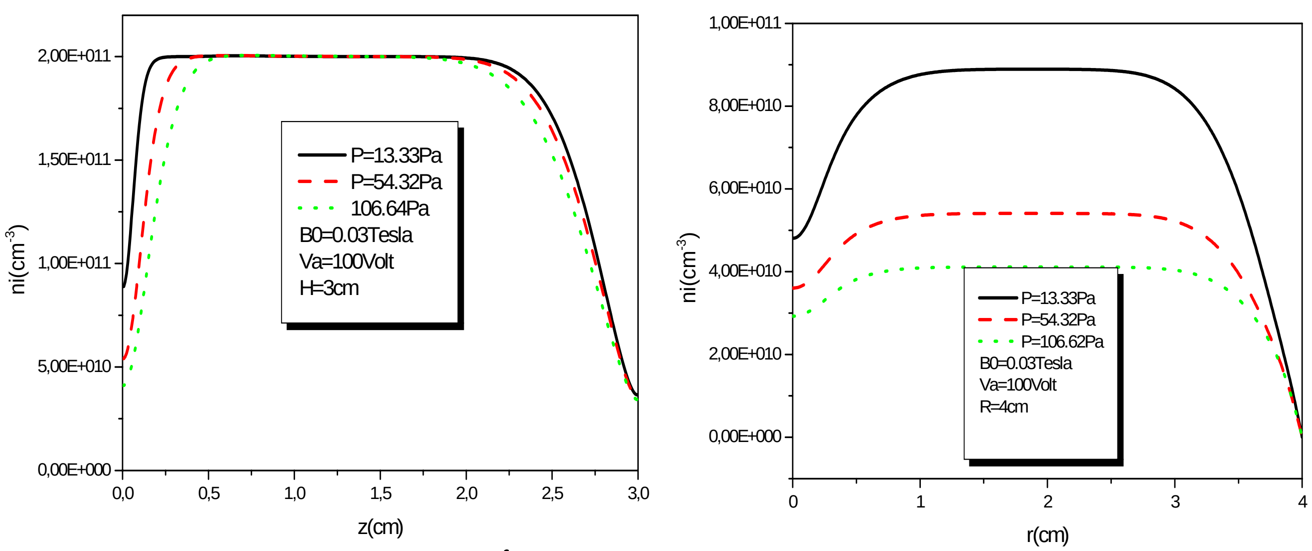
ا دول(2-IV) : تغيـر نسبـة زيـادة ا قل و الكمون الكهربائيان بتغ ا هد ا طبق

IV-3.2.تـأثـ الضغـط:

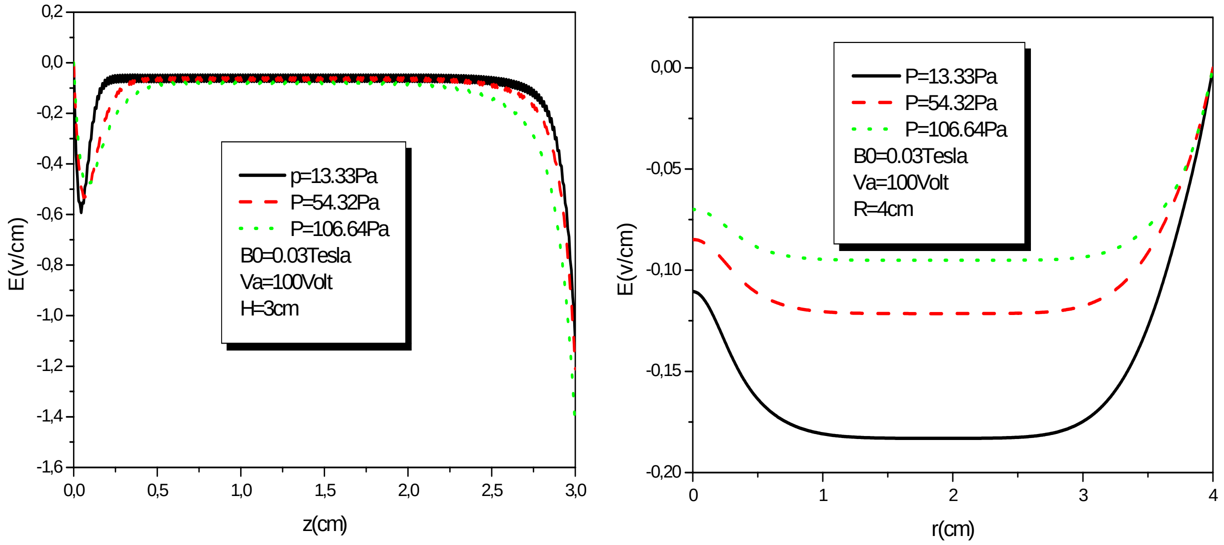
من أجل دراسة تأث الضغط على ا صائص الكهربائية ا سوية سابقا نقوم بتثبيت كل من سعة ا قل ا غناطيسي و الكمون ا طبق و معامل الإصدار الثانوي $(\gamma = 3\%)$، بينما نغ قيمة الضغط ب القيم(106.64Pa ,54.32Pa ,13.33Pa).الأشكال من (23-IV) إ (26-IV) ثل التغ ا وضعي لكل من الكثافة الإلكترونية و الأيونية، ا قل و الكمون الكهربائي على التوا هذه الظروف.



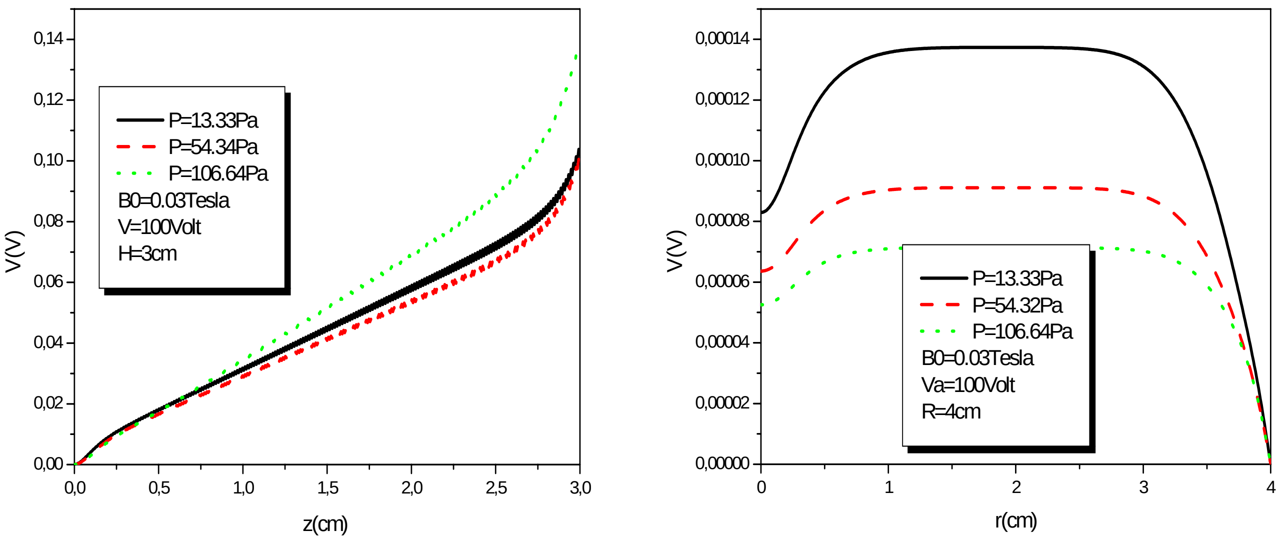
الشكل(23-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكثافة الإلكترونية بدلالة الضغط



الشكل(24-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكثافة الأيونية بدلالة الضغط



الشكل(26-IV) : الـتغيـر الـموضعي للحقل الكهربائي بدلالة الضغط



الشكل(26-IV) : الـتغيـر الـموضعي للكمون الكهربائي بدلالة الضغط

من خلال الشكل (23-IV), (24-IV) نلاحظ أن هناك تناسب عكسي ب الضغط و قيم الكثافة الإلكترونية و الأيونية إذ أنه كلما رفعنا قيمة الضغط كلما نقصت قيمة الكثافة خاصة وار الإلكترودين (ا هبط و ا صعد) و يكون التناقص بنسبة صغ ة 0.22%، هذه النتيجة تترجم العلاقة العكسية ب الضغط و حركية و انتشار ا سيمات ا شحونة حيث كلما زاد الضغط نقصت معاملات ا ركية و الانتشار ا ذه سيمات.

هذا التناقص الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية ينتج عنه تناقص ا قل الكهربائي كما هو موضح الشكل (25-IV) (26-IV) .

مـراجـع الفـصل الرابــع :

[1] Z. Ballah, F. Khelfaoui et M.T. Meftah; *''Modélisation numérique des propriétés électriques dans un pulvérisateur cathodique magnétron''*; Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Vol. **1** n°3; pp 24-31 (2009).

[2]ز.بـلة، "الدراسة التشخيصية با اكاة العددية سبار كهربائي ساكن رش مهبطي"، ماجست ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة(2007)

[3] A. Hamid ; A. Hennad et A. Flitti ; *''Modélisation Bidimensionnelle d'une décharge luminescente dans l'argon avec en terme source d'ionisation constant''* ; Romania Report in Physics ; Vol. **61** no 3 ; P. 709-720 (2009).

الـخـلاصة العـامـة

الـخـلاصة العـامة

هذه ا ذكرة عملنا على دراسة إمكانية الزيادة من سرعة ترسب الطبقات الرقيقة ا توضعة بطريقة الرش ا هبطي و س مردوده، لذلك رأينا أنه من الضروري دراسة خصائص البلازما ا ستعملة كوسيط هذه الطريقة و س خصائصها (بإضافة حقول مغناطيسية). تتم هذه العملية إما ريبيا باستعمال طرق التشخيص، كمسبار لا م و ا طياف الضوئي و مطياف الكتلة، أو نظريا بطريقة النمذجة حيث أقترحت عدة اذج ذا الغرض (النموذج ا ركي، النموذج ا هري، وذج ا وائع و النموذج ا ج).

قمنا هذا العمل بالدراسة النظرية لبلازما الأرغون لتوضع طبقات السيلسيوم(Si) بطريقة الرش ا هبطي ا غنطرو مهبط أسطوا ، نصف قطر لبوسيه يتراوح ب (4~6cm)، أما البعد بينهما فيتراوح ب (3~4cm)، و مغذى صدر جهد متناوب ذو تردد مذياعي RF تواتره (13.56MHz)، ضغط النظام يتراوح ب (0.1~1Tor)، أما درجة حرارة الإلكترونات فاعت ناها ثابتة و تساوي (4eV)، و درجة حرارة الأيونات مقاربة لدرجة حرارة الغرفة (300K)، ذا الغرض إقترحنا وذج ا وائع لنظام مستقل عن الزمن و متناظر أسطوانيا، يرتكز على لة معادلات تفاضلية، تتمثل معادلة الإستمرارية للجسيمات ا شحونة، معادلة كمية ا ركة لنفس ا سيمات و معادلة غوص (بصيغتها التفاضلية). إستعملنا ل هذه ا ملة من ا عادلات التفاضلية الطريقة العددية ا جوم ا نتهية و الطريقة التكرارية غوص-صيدل. قمنا ساب تلف ا قادير الكهربائية للبلازما (الكثافة الالكترونية و الكثافة الأيونية و ا قل الكهربائي و الكمون الكهربائي) من خلال ا نامج الذي أ زناه بلغة الفورترون على مرحلت ، غياب ا قل ا غناطيسي و وجوده.

النتائج ا صلنا عليها كانت نتائج جيدة. قمنا قارنتها بنتائج أعمال أخرى لإثبات صحتها، استعملنا النتائج ا تحصل عليها عمل ز. بلة و رفقائها (2009) و الذي قدم العمل بعد واحد x (ب ا هبط و ا صعد) ت ا قارنة مع النتائج ا صلنا عليها على ا ور(z) (البعد ب ا هبط وا صعد) فكانت ا قارنة إ ابية و النتائج متطابقة اما هذا ما أكد مصداقية برنا نا.

وللتأكيد أكثر دعمناها با قارنة مع عمل أ. يد و رفقائه (2009) فكان هناك إختلاف بسيط و الذي لى الفارق الزه حيث الدراسة ت نظام متغ مع الزمن على عكس ما أخذناه.

كما قمنا بتقد النتائج غياب ا قل ا غناطيسي و وجوده لإظهار تأث ه على خصائص البلازما. تب لنا أن له تأث كب خاصة على الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية حيث كانت نسبة زياد ما كب ة نوعا ما و تتناسب طردا مع زيادة شدة ا قل ا غناطيسي ا طبق قدرت هذه النسبة بـ (23.6%) للكثافة الإلكترونية و (6.8%) للكثافة الأيونية. أما بالنسبة للحقل الكهربائي فالزيادة تكون بنسبة (0.11%) و الكمون الكهربائي فنسبة الزيادة (0.11%). رجحنا هذه الزيادة صائص البلازما لتأث ا قل ا غناطيسي على مسارات الإلكترونات. و هو ما سعي له من أجل الزيادة سرعة توضع الطبقات الرقيقة و سـ خصائصها.

و الأخ تطرقنا لتأث بعض العوامل ا اكروسكوبية الأخرى على هذه ا صائص كالكمون ا طبق .....ا . فتب لنا أ ما متناسبان طردا ا يؤدي كذلك لزيادة نسبة التأين و بالتا سـ مردود الرش ا هبطي.

بالرغم من كل ما تطرقنا له هذا العمل لدراسة بلازما التفريغ الكهربائي و سـ خصائص الطبقات ا توضعة إلا أن الإقتراحات تبقى مفتوحة ال البحث حيث كن:

- إستغلال النتائج النظرية الدراسة التجريبية لتشخيص بلازما التفريغ الكهربائي. إ اد ا ميز تيار-جهد سبار لا م ا ستعمل بكثرة عملية التشخيص.
- دراسة تأث ا قل ا غناطيسي إ اه مغاير و ركبات تلفة.
- دراسة تأث العامل الزمن على خصائص البلازما و توضع الطبقات الرقيقة (دراسة بلازما التفريغ الكهربائي بتطبيق وذج ا وائع لنظام متغ مع الزمن).
- تطبيق وذج ا وائع مع اعتبار درجة حرارة الإلكترونات متغ ةمع ا وضع أوالزمن أو مع العامل معا.

الملخص:

يهتم عملنا هذا بتحديد خصائص بلازما الأرغون Ar (الكثافة الإلكترونية–الكثافة الأيونية–الحقل الكهربائي–الكمون الكهربائي) المستعملة لتوضع طبقات السيليسيوم Si في مهبط أسطواني. بالإعتماد على طريقة الرش المهبطي المغنطروني المغذى بمصدر جهد متناوب RF ذو تردد مذياعي تواتره13.56 MHz. استعملنا لحل هذه المسألة نموذج الموائع لنظام مستقر و في تناظر أسطواني.

يعتمد نموذج الموائع على معادلة الاستمرارية (للإلكترونات و الأيونات) و معادلة بواسن. للحل العددي لهذه المعادلات التفاضلية إعتمدنا على طريقة الحجوم المنتهية و الطريقة التكرارية غوص–صيدل لحساب الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية. أما لحساب الحقل الكهربائي فاستعملنا الحساب المباشر.

النتائج التي تحصلنا عليها للكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية أبدت توافقا مع نتائج أعمال أخرى. أما عن تأثير الحقل المغناطيسي و بعض الخصائص الماكروسكوبية فتبين لنا أن لهم دور كبير في الزيادة من خصائص البلازما خاصة الكثافة الإلكترونية و الكثافة الأيونية (بنسبة 23.63%) وبالتالي زيادة مردود الرش المهبطي.

الكلمات المفتاحية:

البلازما، الرش المهبطي، الخصائص الإحصائية ، الخصائص الكهربائية، طريقة الحجوم المنتهية.

RESUME:

Notre travail s’intéresse à la détermination des caractéristiques d’un plasma d’argon utilisé pour la déposition des couches minces de silicium dans un pulvérisateur cathodique magnétron. Le pulvérisateur est alimenté par une source de tension radiofréquence RF de fréquence 13.5MHz. Nous appliquons le modèle fluide pour un système stationnaire à géométrie cylindrique.

Le Modèle fluide est basé sur l'équation de continuité de la charge électrique et l'équation de Poisson. Pour la résolution numérique des équations différentielles, nous avons adopté la méthode des volumes finies. Les densités électronique et ioniques sont calculées par la méthode itérative de Gauss-Seidel ; le champ électrique est déduit par une méthode directe.

Les résultats de la densité électronique et la densité ionique sont en bon accord avec les résultats d'autres travaux. Nous présentons une étude paramétrée de l'effet du champ magnétique et de quelques propriétés macroscopiques. Le champ magnétique permet d’accroitre le rendement de pulvérisation cathodique ; en effet les densités électronique et ionique près de la surface s’accroissent de 10 à 23.63%.

MOTS CLEFS: Plasma, pulvérisation cathodique, propriétés statistique, propriétés électriques, la méthode de volumes finis.

Abstract:

In this work, we are interested on characterization of argon plasma used in deposition of thin silicon films. The deposition will be on a magnetron sputtering process with a radiofrequency of 13.5MHz. We use a model fluid for a stationary system of cylindrical geometry.

The fluid model is based on the electrical charge continuity equation and Poisson equation. For numerical resolution of differential equations, where we have adopted Finite Volumes Method. To calculate the electron density and ion density we use Gauss-Seidel iterative method; the electric field is deduced with direct method.

The results of the electronic density of ion density are in good agreement with results of other studies. We present also a calculation for several values of magnetic field and some macroscopic properties. The magnetic field can increase the yield of sputtering; indeed the electron and ion densities near the surface to increase 10 to 23.63%.

KEYWORD: Plasma, magnetron sputtering, statistical properties, electrical properties, finite volumes method.