

رقم الترتيب:.....
رقم التسلسلي:.....

جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص : فيزياء الإشعاعات، كاشف وبصريات إلكترونية

من إعداد : قويدري زينب

بعنوان:

مفعول درجة الحرارة الإلكترونية على الخصائص الكهربائية في بلازما التفريغ الكهربائي

نوقشت يوم: 2015/05/28

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عال	إسماعيل شيحي
ممتحنا	جامعة ورقلة	أستاذة محاضرة(ب)	أم الخير باباحني
مشرفا	جامعة ورقلة	أستاذ تعليم عال	فتحي خلفاوي
مشرفا مساعدا	جامعة ورقلة	أستاذة مساعدة(أ)	زكية بلة

الموسم الجامعي: 2015/2014

شكر وعرفان

باسم الله ابدأ... وبالحمد والشكران

نعم منك جليلة... أعظمها الصبر والإيمان

منحتني القوة لإنجاز... هذا البحث يا خالق الأكون

شكرا والشكر شكران...

ومن باب الاعتراف بالجميل لا يسعنا إلا أن نتقدم ببالح عبارات الشكر والتقدير للبروفسور

القدير "فتحي خلفاني" لمنحني أفضل فرصة علمية بأن يكون مؤطرا لي وتعلمه من ذلك

عينا كبيرا وصبرا طويلا في مختلف مراحل إعداد هذه المذكرة، والأستاذة الفاضلة

"زكية بلق" على كل توجيهاتها ومجهوداتها وصبرها.

و أشكر أيضا للبروفسور الكريم "إسماعيل شبيبي" لقبوله ترؤس لجنة المناقشة، كما

أشكر الدكتورة المحترمة "أم الخير باباخي" لقبولها مناقشة هذه المذكرة وأتمنى أن

يفيدوني بأرائهم القيمة والبناءة.

كما أشكر كل أعضاء فريق البحث بمنبر الإشعاع والبلازما وفيزياء السطوح بقسم

الفيزياء جامعة قاصدي مرباح ورقلة.

فلا يغيب عن خاطرنا إلا أن نتقدم بالشكر الجزيل إلى الزميلات " نور، راضية، فايزة،

سعيدة، حليلة، يمينة، بسمينة، سليمة، كمنزة"

و كل من ساهم ومدّ لنا يد العون في إنجاز هذا العمل المتواضع.

وشكرا.

فهرس المحتويات

أ	فهرس المحتويات
هـ	فهرس الجداول
و	فهرس الأشكال
02	المقدمة العامة
04	مراجع المقدمة

الفصل الأول: عموميات حول البلازما والرش المهبطي

06	I-1 تعريف البلازما
06	I-1-1 درجة التأين
07	I-1-2 درجة الحرارة الإلكترونية
07	I-1-3 كمون البلازما والكمون العائم
08	I-2 الرش المهبطي
08	I-2-1 الطرق العامة لتوضع الطبقات الرقيقة
08	أ- التوضع الكيميائي للطور البخاري
08	ب- التوضع الفيزيائي للطور البخاري
09	I-2-2 التوضع بطريقة الرش المهبطي
09	I-2-3 المبدأ العام للرش المهبطي
11	مراجع الفصل الأول

الفصل الثاني: تطبيق نموذج الموائع على بلازما التفريغ الكهربائي

13	1-II مفهوم نموذج الموائع
13	1-1-II المعادلات الأساسية لنموذج الموائع
14	2-II الحركية والانتشار للجسيمات المشحونة
14	أ- ظاهرة الانتقال
15	ب- ظاهرة الانتشار
16	3-II تطبيق نموذج الموائع
16	1-3-II الجهاز المستعمل
16	2-3-II النموذج الرياضي
17	4-3-II النموذج العددي
18	أ- تجزئة مجال المحاكاة
18	ب- الشروط الحدية
19	5-3-II تطبيق الصيغة الآسية لعملنا
20	أ- حساب الكثافة الإلكترونية
21	ب- حساب الكثافة الأيونية
21	ج- حساب درجة الحرارة الإلكترونية
22	د- حساب الحقل الكهربائي والكمون الكهربائي
23	4-II برنامج الحساب
24	مراجع الفصل الثاني

الفصل الثالث: نتائج وتحليل

26	1-III مقدمة
27	2-III التغير الموضعي للخصائص الكهربائية للبلازما
30	3-III حساب الخصائص الكهربائية في ظروف معينة
38	4- III تأثير العوامل الماكروسكوبية على الخصائص الكهربائية للبلازما
38	1-4-III تأثير درجة الحرارة الالكترونية
41	2-4-III تأثير الجهد المطبق
44	3-4-III تأثير الضغط
48	مراجع الفصل الثالث
49	الخلاصة العامة
52	ملحق : الصيغة الاسية
54	ملخص

فهرس الجداول

الفصل الثاني : تطبيق نموذج الموائع على بلازما التفريغ الكهربائي

- 15 جدول (1-II): معاملات الحركية ومعاملات الانتشار
- 17 جدول (2-II): المعاملات والثوابت الفيزيائية المستعملة
- 18 جدول (3-II): الشروط الحدية

فهرس الاشكال

الفصل الأول : عموميات حول البلازما والرش المهبطي

- 09 الشكل (1-I): رسم تخطيطي لمبدأ الرش المهبطي

الفصل الثاني : تطبيق نموذج الموائع على بلازما التفريغ الكهربائي

- 18 الشكل (1-II): رسم تخطيطي لتقسيم المجال
- 23 الشكل (2-II): رسم تخطيطي لتقسيم مجال الدراسة

الفصل الثالث: نتائج وتحليل

- 28 الشكل (III-1-أ): التغير الموضعي للكثافات
- 28 الشكل (III-1-ب): التغير الموضعي للكثافات لـ A. Bouchikhi
- 28 الشكل (III-2-ج): التغير الموضعي للكمون الكهربائي لـ A. Bouchikhi
- 28 الشكل (III-2-د): التغير الموضعي للكمون الكهربائي
- 29 الشكل (III-3-هـ): التغير الموضعي للحقل الكهربائي
- 29 الشكل (III-3-و): التغير الموضعي للحقل الكهربائي لـ A. Bouchikhi

- 29 الشكل(III-4): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 30 الشكل(III-5): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 31 الشكل(III-6): التغير للكمون الكهربائي بدلالة البعد Z
- 31 الشكل(III-7): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعد Z
- 32 الشكل(III-8): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة البعد Z
- 32 الشكل(III-9): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 33 الشكل(III-10): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة البعد Z
- 33 الشكل(III-11): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعد Z
- 34 الشكل(III-12): التغير الموضعي للكثافة الايونية بدلالة البعد Z
- 34 الشكل(III-13): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 35 الشكل(III-14): التغير الموضعي لدرجة حرارة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 35 الشكل(III-15): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعد Z
- 36 الشكل(III-16): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة البعد Z
- 36 الشكل(III-17): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة البعد Z
- 37 الشكل(III-18): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 37 الشكل(III-19): التغير الموضعي للدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة البعد Z
- 38 الشكل(III-20): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة درجة الحرارة الالكترونية
- 39 الشكل(III-21): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة درجة الحرارة الالكترونية
- 39 الشكل(III-22): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة درجة الحرارة الالكترونية
- 40 الشكل(III-23): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة درجة الحرارة الالكترونية
- 40 الشكل(III-24): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة درجة الحرارة الالكترونية
- 41 الشكل(III-25): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة الجهد المطبق
- 42 الشكل(III-26): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة الجهد المطبق
- 42 الشكل(III-27): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة الجهد المطبق

- 43 الشكل (III-28): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة الجهد المطبق
- 43 الشكل (III-29): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة الجهد المطبق
- 44 الشكل (III-30): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة الضغط
- 44 الشكل (III-31): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة الضغط
- 45 الشكل (III-32): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة الضغط
- 45 الشكل (III-33): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة الضغط
- 46 الشكل (III-34): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة الضغط

المقدمة العلمية

المقدمة العامة

تعددت استخدامات الطبقات الرقيقة في مختلف المجالات الصناعية، حيث تستخدم في صنع الخلايا الشمسية والشاشات المسطحة و غير ذلك. واتضح أن لها عدة طرق لتوضعها نذكر منها: التوضع الكيميائي للطور البخاري والتوضع الفيزيائي للطور البخاري [1] .

إن أكثر الطرق شيوعا لتوضع الطبقات الرقيقة هي طريقة الرش المهبطي وهذا لسرعة توضعها ومردودها الكبير، وتعتمد أساسا على عملية التفريغ الكهربائي للغاز [2]. لذلك تحتاج الطبقات الرقيقة إلى اختيار الغاز المناسب والشروط التحريية المناسبة [3] .

تتم دراسة البلازما تجريبا باستخدام طرق التشخيص بمطياف الكتلة، التحليل الطيفي ومسبار لانجمير، أما بالنسبة للدراسة النظرية فقد أقترحت عدة نماذج منها النموذج المجهري، النموذج الكهربائي، النموذج المحجن والنموذج الموائع [4] .

سنقوم في عملنا هذا بتطبيق نموذج الموائع لنظام مستقر، ولبعد واحد لحساب الخصائص الكهربائية (الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، درجة الحرارة الإلكترونية، الحقل الكهربائي، الكمون الكهربائي) لبلازما الأروغون لتوضع طبقات السيلسيوم، بالإعتماد على طريقة الرش المهبطي، يغدى بمصدر جهد مستمر. حيث سنتطرق في عملنا هذا ثلاثة فصول كما يلي:

الفصل الأول: هو دراسة موجزة عن البلازما، تعريفها و خصائصها الكهربائية كدرجة التأين ودرجة الحرارة الإلكترونية، والكمون. ثم نتطرق لشرح طرق توضع الطبقات الرقيقة وستعرض بشكل واسع للرش المهبطي.

الفصل الثاني: نقدم فيه نموذج الموائع بالتفصيل، إذ نتطرق لمعادلاته الأساسية (معادلة الاستمرارية، معادلة الطاقة، معادلة كمية الحركة) ومعاملات الحركة والانتشار، والى تطبيق الصيغة الآسية وطريقة الهجوم المنتهية المستعملة للحل العددي، وطريقة غوص صيدال للحل البرمجي، وفي الأخير نوضح مخطط سير الحساب العددي لبرنامجنا.

في الفصل الثالث: سنقدم لمحة عن الدراسات المنجزة في حساب خصائص الكهربائية للبلازما. وفيه نعرض النتائج المتحصل عليها للمنحنيات الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية ، درجة الحرارة الإلكترونية الحقل الكهربائي والكمون الكهربائي. بالإضافة لذلك نتطرق لتأثير العوامل الماكروسكوبية.

و بعدها نقدم حوصلة لما قمنا به في خلاصة عامة و نقدم ملحقا نشرح فيه الصيغة الآسية.

مراجع المقدمة العامة

[1] خ.بن واعر، "الخصائص الكهربائية لبلازما متعدد المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر RF"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرياح ورقلة (2014).

[2] 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).

[3] 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 (AFSSI); Vol. 1 N° 3, 24-31 (2009).

[4] س. عبّيد، "دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في الجهاز الرش المهبطي المغنطوني باستعمال طريقة الحجم المنتهية"، مذكرة ماجستير، جامعة قاصدي مرياح ورقلة (2012).

الفصل الأول:

عموميات حول البلازما والرش المهبطي

الفصل الأول: عموميات حول البلازما والرش المهبطي

1-1 عموميات حول البلازما

كلمة بلازما لدى معظم الناس تعني فقط أنها الحالة الرابعة للمادة وهي توجد في التفاعلات النووية التي تحدث في أعماق النجوم و على أسطحها أو تلك التي تحدث في تفاعلات النووية حيث درجات الحرارة العالية والضغط المرتفع ولكن هناك العديد من الصناعات التكنولوجية المعقدة جدا تعتمد اعتمادا كليا على استخدام البلازما المصنعة في المخبر، من هذه الصناعات صناعة الدوائر الالكترونية وتحويل الغازات السامة إلى غازات نافعة. كما تستخدم فيزياء البلازما لفهم أسرار الكون الفسيح [1].

2-1 تعريف البلازما :

ظهرت المادة بثلاث حالات، وهي الحالة الصلبة، السائلة والغازية [2]، فبتسخين الحالة الصلبة تصبح سائلة ومع زيادة التسخين تتحول إلى حالة غازية وتتحول إلى بلازما (الحالة الرابعة) عند درجة حرارة مرتفعة جدا أكثر من 5000 كيلفن [3]. البلازما عبارة عن غاز مؤين، تحتوي شحنات سالبة (الالكترونات، ايونات سالبة) الشحنات موجبة (ايونات موجبة) و جسيمات محايدة. تعتبر البلازما وسطا متعادلا كهربائيا له عدة خصائص ماكروسكوبية. ويرجع الفضل في تسمية البلازما إلى العالم إرفينغ لانغموير (Dr. Irving Langmuir) عام 1928 [4].

تتميز بعدة خصائص كهربائية تسمح لنا بتفسير الظواهر الفيزيائية على مستوى البلازما كدرجة التأين، درجة الحرارة الالكترونية، الكمون والحقل الكهربائي [5].

1-2-I درجة التأين :

درجة التأين هي إحدى المعايير لتصنيف البلازما، وهي حاصل قسمة بين كثافة الجسيمات المشحونة والكثافة الكلية للبلازما تكتب رياضيا بالمعادلة التالية [6].

$$\alpha = \frac{n_{e,i}}{n_{e,i} + n_0} \dots \dots \dots (1-I)$$

$n_{e,i}$ كثافة العددية للجسيمات المشحونة (الالكترونات وايونات)، n_0 كثافة العددية للجسيمات المحايدة.

يمكن التمييز بين الغازات حسب درجة التأين: الغازات ضعيفة التأين، والغازات قوية التأين.

✓ الغازات ضعيفة التأين: (البلازما الباردة) تتراوح درجة التأين بين 10^{-6} و 10^{-4} وتحقق $\alpha < \alpha_0$.

α_0 : القيمة الحدية لدرجة التأين

في هذا النوع من الغازات عدد قليل من الالكترونات والايونات يتحرك داخل بحر من الجسيمات الحيدانية الشحنة. [7]

✓ الغازات قوية التأين : تكون عكس الغازات الأولى وتحقق $\alpha > \alpha_0$

1-2-2 درجة الحرارة الإلكترونية: T_e

تعتبر درجة الحرارة الالكترونية الأكثر أهمية مقارنة بدرجة حرارة الجسيمات الأخرى (ايونات و جسيمات محايدة)

في نظام متوازن ترموديناميكيا درجة الحرارة الالكترونية تحقق المعادلة التالية. [8]

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

E_c : الطاقة الحركية.

K_B : ثابت بولتزمان.

V : سرعة الالكترونات.

تعتبر هذه المعادلة عن تساوي الطاقة الحركية المتوسطة للجسيمات مع الطاقة التحريض الحراري. [6]

1-2-3 كمون البلازما والكمون العائم:

إن حيدانية البلازما تؤدي إلى انعدام الحقل الكهربائي، مما يجعل الكمون الكهروستاتيكي لحوامل الشحنة ثابتا في قلب البلازما

ويسمى هذا الكمون بكمون البلازما [7].

داخل غرفة معزولة تحت الفراغ، تكون لدينا بلازما متعادلة كهربائيا وبناء على الفرق الكبير بين حركية الالكترونات والايونات

يكون عدد الالكترونات الواردة إلى جدار الغرفة أكبر من عدد الايونات فيشحن جدار الغرفة بكمون سالب بالنسبة لكمون

البلازما يسمى هذا الكمون بالكمون العائم. [7]

2-1 الرش المهبطي:

1-2-1 الطرق العامة لتوضع الطبقات الرقيقة:

يطلق مصطلح الطبقة الرقيقة على مادة ذات أبعاد صغيرة جدا مقارنة مع الأبعاد الأخرى لذلك لقت الطبقات الرقيقة اهتماما كبيرا. لهذا السبب تلعب الطبقات الرقيقة دورا مهما في التكنولوجيا؛ لأنها تقنية بسيطة التنفيذ لانخفاض التكاليف. لتوضع الطبقات الرقيقة عدة طرق حيث تصنف حسب تقنيتين رئيسيتين. [6]

أ- التوضع الكيميائي للطور البخاري (CVD) (Chemical Vapor Deposition):

تتكون الطبقات الرقيقة بطريقة التوضع الكيميائي نتيجة تفاعلات كيميائية بين مكونات الغاز والركيزة تحت درجة حرارة كافية للتفاعل، باستخدام مواد ترسيب البخار و هي تكمن في ترسيب الأشكال محددة وهذا ما يميز تصنيفها إلى عدة أصناف حسب تأثير الضغط يعطي. [6]

LPCVD وهذا في الضغط المنخفض.

HPCVD إذا كان الضغط مرتفعا.

إذا كان الوسيط المستعمل بلازما تتحول PECVD إلى CVD للحصول على الترسيب وذلك في درجة حرارة منخفضة. [6]

ب- التوضع الفيزيائي للطور البخاري (PVD) (Physical Vapor Deposition) :

تعتمد هذه التقنية على الترسيب بواسطة قذف المادة في الفراغ عن طريق عملية التبخر الحراري للمواد تحت الضغوط المنخفضة [7] ثم تتكاثف على سطح الدعامة لنحصل على فيلم رقيق أو طبقات رقيقة جدا [9]، ولها عدة مميزات، طريقة غير ملوثة، طبقات متوضعة من خلالها تكون كثيفة و سهلة المراقبة. [10] ولكن يعاب عليها الاستهلاك الكبير للطاقة و من بين طرق الترسيب الفيزيائي الأكثر استعمالا نجد طريقة الرش المهبطي؛ و هي الطريقة المعتمدة في عملنا هذا.

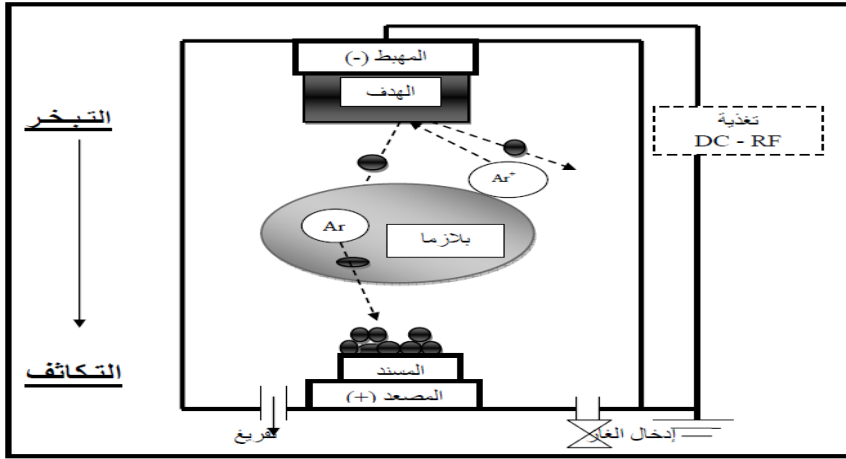
2-2-I التوضع بطريقة الرش المهبطي :

اكتشفت ظاهرة الرش المهبطي في سنة 1858 م من طرف العالم **Grove**، حيث رأى نشوء طبقة من المعدن المكون للقطين الكهربائين على جدران الأنبوب المفرغ و لأسباب تكنولوجية لم تستعمل لإنتاج الطبقات الرقيقة إلى سنة 1950م، بعدما جاء العالم **PLUKER**.

3-2-I المبدأ العام للرش المهبطي

يعتمد مبدأها على اقتلاع ذرات مادة الهدف عن طريق تحويل كمية الحركة، تتم هذه الظاهرة بواسطة أيونات طاقة ناتجة عن التفريغ متوجه للغاز أو خليط غازي داخل غرفة تحت فراغ يتراوح بين $10^{-3} - 10^{-5} Pa$ عملية التفريغ تتم بواسطة لبوسين متوازيين أحدهما يرتبط بالهدف ويسمى المهبط و الثاني بالمسند ويسمى المصعد على بعد من بعضهما يتراوح بين 2-5cm.

الأيونات الطاقية والتي تكون عموما أيونات غاز حامل تتسارع بواسطة مجال الحقل الكهربائي ليجعلها دائما متجهة نحو الهدف، فيما الذرات المتعلقة والتي تكون عموما محايدة كهربائيا تتكاثف وتتوضع فوق المسند مشكلة شريحة تسمى الطبقة الرقيقة. [9]



الشكل (1-I): رسم تخطيطي لمبدأ الرش المهبطي

يعتبر مردود الرش من أهم الخصائص المميزة لظاهرة الرش المهبطي يكتب بالعلاقة التالية.

$$S = \frac{N_p}{N_i} \dots \dots \dots (3-I)$$

N_i عدد الذرات الواردة، N_p عدد الذرات المقتلعة.

يتعلق هذا المردود بالمعاملات الآتية :

- طبيعة الهدف.
- طبيعة الايونات الواردة.
- طاقة الايونات الواردة.
- زاوية الورود.

مراجع الفصل الأول:

- [1] د. حازم فلاح؛ "مقالات في الفيزياء"؛ مقالات علمية؛ قسم الفيزياء؛ سكيك جامعة الأزهر.
- [2] و. أحمد عبد العزيز؛ "فيزياء البلازما"؛ دار الصفاء للنشر والتوزيع عمان؛ الطبعة الأولى 2004م/1424هـ.
- [3] A. Benamar; " Application de la méthode de Monte Carlo dans le calcul de coefficient de transport d'un gaz faiblement ionisé"; Mémoire de magister; Université Aboubakar Belkaid de Tlemcen (2006).
- [4] أ.د.ب. هيلد؛ "فيزياء البلازما الباردة"؛ منشورات دار علاء الدين؛ سورية دمشق؛ الطبعة الأولى (2010).
- [5] J. L. Delcroix et A. Bers; "*Physique des plasmas*"; Ed. CNRS; Paris (1994).
- [6] س. عبيد؛ "دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في الجهاز الرش المهبطي المغنطوني في إستعمال طريقة الحجم المنتهية"؛ مذكرة ماجستير؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2012).
- [7] خ. بن واعر؛ "الخصائص الكهربائية لبلازما متعدد المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر RF"؛ مذكرة ماستر؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2014).
- [8] J. M. Rax ; '*Physique des plasmas cour et applications*' ; Dunod; Paris (2005).
- [9] ز. بلة؛ "الدراسة التشخيصية بالحكاة العددية لمسبار كهربائي ساكن في رش مهبطي"؛ مذكرة ماجستير؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2007).
- [10] P. M. Bellan; "*Fundamentals of Plasma Physics* "; Pasadena; California (2004).

الفصل الثاني:

تطبيق نموذج الموائع على بلازما التفريغ الكهربائي

الفصل الثاني: تطبيق نموذج الموائع على بلازما التفريغ الكهربائي

تم دراسة بلازما التفريغ الكهربائي إما تجريبيا ويكون هذا بتشخيصها بالطرق التالية: مطيافية الإنبعث الضوئي، مطيافية الإمتصاص الضوئي، المطيافية الكتلية ومسبار لانجمير. أو نظريا ويكون بنمذجتها بإحدى الطرق التالية : النموذج الحركي، النموذج الجزئي، النموذج الهجين ونموذج الموائع. في هذا الفصل سنقدم شرحا وافيا لنموذج الموائع المطبق في عملنا هذا.

1-II نموذج الموائع

يهتم نموذج الموائع بتحديد القيم المتوسطة للمقادير الخاصة بالجسيمات المشحونة كالكتافة، السرعة المتوسطة، الطاقة المتوسطة. هذه القيم تحدد بالعزوم الثلاثة لمعادلة بولتزمان حيث تمثل الكتافة بمعادلة الاستمرارية، السرعة المتوسطة بمعادلة حفظ كمية الحركة، بينما الطاقة المتوسطة للإلكترون بمعادلة حفظ الطاقة. [1] يعتمد هذا النموذج على تقريبين أساسين هما تقريب الحقل المحلي وتقريب الطاقة المحلية. [2]

1-1-II المعادلات الأساسية لنموذج الموائع

أ- معادلة الاستمرارية:

هي تعبير رياضي عن قانون انخفاض الشحنة ، ويمكن كتابتها بالشكل التالي. [3]

$$\frac{\partial n_{e,i}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_{e,i} = S_e \dots \dots \dots (1-II)$$

$$\vec{J}_{e,i} = s \mu_{e,i} n_{e,i} \vec{\nabla} V - D_{e,i} \nabla (n_{e,i}) \dots \dots \dots (II-2)$$

حيث تمثل $n_{e,i}$ كثافة الجسيمات المشحونة (الكاترونات، ايونات) و $D_{e,i}$ هو معامل انتشار بالنسبة للكاترونات والايونات و $\mu_{e,i}$ معامل حركية بالنسبة للكاترونات، ايونات و V هو الكمون الكهربائي و $J_{e,i}$ كثافة التدفق الكاترونات والايونات و S_e الطرف الثاني لمعادلة الاستمرارية. حيث ان :

$$\begin{cases} s = -1 ; & \text{للكاترونات} \\ s = 1 & ; \text{للايونات} \end{cases}$$

علما أن

$$S_e = k_i n_e \exp\left(\frac{E_i}{kT_e}\right) \dots \dots \dots (II-3)$$

حيث أن k_i ثابت الكمومية، E_i طاقة التنشيط، T_e درجة الحرارة الالكترونية.

ب- معادلة تحويل كمية الحركة:

وتكتب معادلة من الشكل التالي. [2]

$$\frac{\partial nm \langle \vec{c} \rangle}{\partial t} + \vec{\nabla} (nm \langle \vec{c} \vec{c} \rangle) + \vec{\nabla} P - n \vec{F} = R_m \dots \dots \dots (4-II)$$

حيث :

$$R_m = -mn \langle cv_m \rangle \dots \dots \dots (5-II)$$

\vec{F} القوة الخارجية الناشئة عن الحقل الكهربائي والمغناطيسي، v_m تردد تحويل كمية الحركة، R_m كمية الحركة الضائعة

بفعل التصادمات، P الضغط و $\langle \vec{c} \rangle$ سرعة.

ج- معادلة الطاقة :

تكتب معادلة من الشكل التالي. [4]

$$\frac{\partial n_e \varepsilon_e}{\partial t} + \frac{5}{3} \nabla J_\varepsilon = S_\varepsilon \dots \dots \dots (6-II)$$

$$\varepsilon_e = \frac{3kT_e}{2} \dots \dots \dots (7-II)$$

$$S_\varepsilon = -eJ_e E - Nk_i n_e \exp\left(-\frac{E_i}{kT_e}\right) H_i \dots \dots \dots (8-II)$$

$$J_\varepsilon = -\mu_{e,i} E n_e - \frac{\partial (D_e n_e)}{\partial z} \dots \dots \dots (9-II)$$

k ثابت بولتزمان، E الحقل الكهربائي، N كثافة التيار، J_e تدفق الالكترونات

II-2 الحركية والانتشار للجسيمات المشحونة :

أ- ظاهرة الانتقال :

تغير سرعة الجسيمات المشحونة والحيادية بسبب الحركة العشوائية والصدمات التي تحدث بين الجسيمات المشحونة والحيادية أما في حالة عدم تجانس توزيع الكثافة في حجم البلازما أو عدم تجانس في سرعة الحركة الانسحابية تنشأ عنها ما يسمى بظواهر الانتقال في البلازما ونعني بيها هو ظهور انتقال منتظم وموجه للكتلة أو السرعة [1] وتتميز هذه الظاهرة بمعامل حركية الكترونية ومعامل حركية أيونية.

ب- ظاهرة الانتشار:

ظاهرة الانتشار تطلق على عملية تسوية التوزيع الأتراني للتركيز داخل البلازما، تتميز هذه الظاهرة بمعامل يسمى معامل الانتشار الإلكتروني ومعامل انتشار أيوني. [1].

الجدول التالي يوضح هذه المعاملات (معامل حركية الالكترونية، معامل الحركية الأيونية، معامل الانتشار الأيوني ومعامل الانتشار الالكتروني).

جدول (II-1): معاملات الحركية ومعاملات الانتشار.

المقدار	الصيغة الرياضية	المرجع
معامل الحركية الالكترونية	$\mu_e = \frac{e}{m_e v_m}$	[5]
معامل الحركية الأيونية	$\mu_i = \frac{e}{M_i v_m}$ تردد تصادم الجسيمات : v_m	[2]
معامل انتشار الالكتروني	$D_e = \frac{K_B T_e}{m_e v_m}$	[4]
معامل الانتشار الأيوني	$D_i = \frac{K_B T_i}{M_i v_m}$	[6]

ج- علاقة أنشتاين :

العلاقة بين معامل الانتشار والحركية تسمى بعلاقة أنشتاين وهي نسبة بين معامل الانتشار ومعامل الحركية

وتكتب بالصيغة التالية. [7]

$$\frac{D_{e,i}}{\mu_{e,i}} = \frac{K_B T_{e,i}}{e} \dots\dots\dots (II - 10)$$

3-II تطبيق نموذج الموائع

1-3-II الجهاز المستعمل:

الطريقة المستخدمة في توضع الطبقات الرقيقة في عملنا هذا هي طريقة الرش المهبطي المغذى بمصدر جهد مستمر يتكون الجهاز من لبوسين متوازيين، مهبط ومصعد كتلي، قطراهما حوالي 6 cm و على بعد من بعضهما يقدر ب 3 cm . نثبت على المهبط مادة الهدف، ولتكن سيليسيوم Si فيما نثبت على المصعد مسندا، الكل موجود داخل غرفة رش مربوطة إلى مجموعة ضخ تتكون من مضخة أولية ومضخة ثانوية تستخدمان لإخلاء الغرفة من الهواء وتثبيت الضغط أثناء عملية التوضع الذي يتراوح عموما بين (1 to 10) الغاز المستعمل لعملية الترسيب هو غاز الأرجون لكبير حجمه وتعادله الكهربائي.

2-3-II النموذج الرياضي:

من أجل التحديد الرياضي للخصائص الكهربائية (الكثافة الإلكترونية، الكثافة الأيونية، الحقل الكهربائي، الكمون الكهربائي ودرجة الحرارة الإلكترونية) لبلازما الأرجون المستعملة لتوضع رقائق السيليسيوم Si بطريقة الرش المهبطي اخترنا نموذج الموائع لنظام مستقر ولبعد واحد الذي يعتمد على المعادلات الأساسية.

✓ معادلات الأساسية: تتمثل في معادلة الاستمرارية ومعادلة الطاقة ومعادلة بواسون.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial J_{e,i}}{\partial z} = S_e = k_i n_e \exp\left(-\frac{E_i}{kT_e}\right) \\ J_e = -\mu_e n_e \nabla V - D_e \frac{\partial(n_e)}{\partial z} \\ J_i = \mu_i n_i \nabla V - D_i \frac{\partial(n_i)}{\partial z} \\ \frac{5}{3} \frac{\partial J_\varepsilon}{\partial z} = S_\varepsilon = S_e H_i \\ J_\varepsilon = -\mu_e n_e \varepsilon_e - D_e \frac{\partial(n_e \varepsilon_e)}{\partial z} \\ \frac{\partial E}{\partial z} = -\nabla V = -\frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{e}{\varepsilon_0} (n_i - n_e) \end{array} \right. \dots \dots (11 - II)$$

مراجع الفصل الثاني

قبل التطرق لهذه المعادلات نعرف أهم المعاملات التالية :

جدول (II-2): المعاملات والثوابت الفيزيائية المستعملة.

المقدار	القيمة أو الصيغة	المرجع
معامل الحركة الإلكترونية	$\mu_e = 2 \times 10^5 cm^2 V^{-1} s^{-1}$	[8]
معامل الانتشار الإلكتروني.	$D_e = 10^6 cm^2 s^{-1}$	[8]
درجة الحرارة الإلكترونية الابتدائية	$K_B T_{e0} = 1eV$	
معامل الحركة الأيونية للأرغون.	$\mu_i = 2 \times 10^3 cm^2 V^{-1} s^{-1}$	[8]
معامل الانتشار الأيوني للأرغون.	$D_i = 10^2 / P cm^2 s^{-1}$	[8]
طاقة التنشيط	$H_i = 15.578eV$	[8]
معامل الانبعاث الثانوي	$\gamma=0.046$	[1]
معامل السماحية	$\epsilon = 8.85 \times 10^{-14}$	
تدفق الإلكترونات	$E_i=24 eV$	[3]
ثابت الكمومية	$k_i = 2.075 \times 10^{10} S^{-1}$	[3]

II-3-3 النموذج العددي :

إن الحل التحليلي لجملة معادلات تفاضلية بغرض إيجاد الصيغة الرياضية للمقادير الفيزيائية يكون عمليا

صعبا لهذا نلجأ إلى الطرق العددية التي تهدف إلى إيجاد قيمة المقادير الفيزيائية عند كل نقطة من الفضاء و عند كل

لحظة زمنية كطريقة الفروق المنتهية، الحجم المنتهية والعناصر المنتهية [7] .

و نظرا لما تمتاز به الحجم المنتهية من سهولة وسرعة الحل اخترناها طريقة حل معادلاتنا والتي تعتمد كما هو متفق عليه

على الخطوات الرياضية التالية [8] .

1. تجزئة مجال المحاكاة.

2. تحديد الشروط الحدية.

3. تقريب المشتقات الجزئية بالحجوم المنتهية.

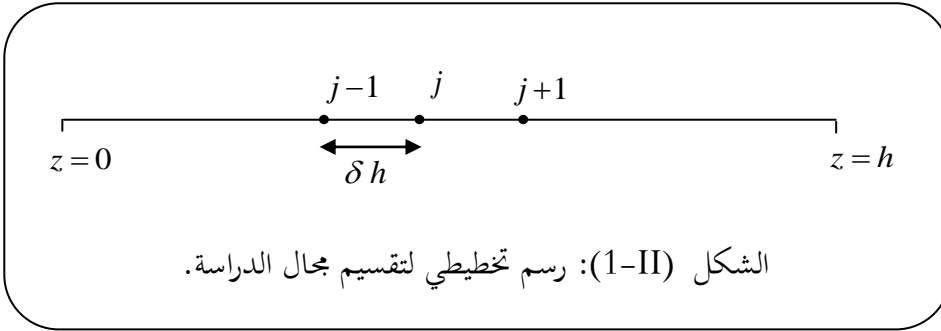
أ- تجزئة مجال الدراسة:

نقسم مجال المحاكاة ما بين لبوسين إلى J_{\max} نقطة حيث نعرف خطوة الانتقال من نقطة إلى أخرى بالمقدار

$$\delta h = \frac{h}{j_{\max} - 1} \text{ حيث } \delta h$$

$$Z(j) = (j - 1) * \delta h$$

تشير J للتقسيمات وفق المحور z الذي يجرى إلى J_{\max} نقطة الشكل (1-II) يوضح تقسيم مجال الدراسة.



ب- الشروط الحدية :

المهبط	المصعد	
$J_e _H = -\gamma J_i _H$	$n_e _0 = 0$	الكثافة الالكترونية
$\frac{\partial n_i}{\partial z} _H = 0$	$\frac{\partial n_i}{\partial z} _0 = 0$	الكثافة الأيونية
$V _H = Va$ قيمة الكمون المطبق: Va	$V _0 = 0$	الكمون الكهربائي
$\frac{\partial T_e}{\partial z} _H = 0$	$\nabla T_e(z) - \frac{e}{k} \nabla V(z) = 0$	درجة الحرارة الالكترونية

جدول (3-II): الشروط الحدية.

وقبل التطرق إلى مراحل الحجوم المنتهية سنتطرق إلى صيغة آخر لتبسيط المعادلات وهي الصيغة الآسية

II-3-4 تطبيق الصيغة الآسية في عملنا:

يمكن صياغة معادلة الاستمرارية ومعادلة الطاقة بالشكل العام الأتي [4]:

$$\Gamma \frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} = \vartheta(z) \dots \dots \dots (11 - II)$$

حيث أن:

$$\Phi(z) = s\theta(z)\mu(z) E(z) - \Gamma \frac{\partial \theta(z)D(z)}{\partial z} \dots \dots \dots (12 - II)$$

بتطبيق طريقة الحجوم المنتهية نجد:

$$\int_{j-1/2}^{j+1/2} \Gamma \left(\frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \right) dz = \Gamma [\Phi]_{j-1/2}^{j+1/2} \dots \dots \dots (13 - II)$$

$$\Gamma [\Phi_{j+1/2} - \Phi_{j-1/2}] = \Delta z \vartheta_j \dots \dots \dots (14 - II)$$

بتطبيق الصيغة الآسية على عبارة الكثافة في موضعين $\Phi_{j+1/2}$ و $\Phi_{j-1/2}$ نجد:

$$\Phi_{j+1/2} = \frac{\theta_{j+1} D_{j+1} - \theta_j D_j \exp(Z_1) Z_1}{\Delta z [1 - \exp(Z_1)]} \dots \dots \dots (15 - II)$$

$$\Phi_{j-1/2} = \frac{\theta_j D_j - \theta_{j-1} D_{j-1} \exp(Z_2) Z_2}{\Delta z [1 - \exp(Z_2)]} \dots \dots \dots (16 - II)$$

ومنه

$$\Gamma \left\{ \left[\frac{\theta_{j+1} D_{j+1} - \theta_j D_j \exp(Z_1) Z_1}{\Delta z [1 - \exp(Z_1)]} \right] - \left[\frac{\theta_j D_j - \theta_{j-1} D_{j-1} \exp(Z_2) Z_2}{\Delta z [1 - \exp(Z_2)]} \right] \right\} \\ = \Delta z \vartheta_j \dots \dots \dots (17 - II)$$

مع العلم أن:

$$Z_1 = -s \frac{\mu_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} [V_{j+1} - V_j] \dots \dots \dots (18 - II)$$

$$Z_2 = -s \frac{\mu_{j-1/2}}{D_{j-1/2}} [V_j - V_{j-1}] \dots \dots \dots (19 - II)$$

✓ بالنسبة للايونات $s=1$

✓ بالنسبة للالكترونات $s=-1$

ومنه نتحصل على المصفوفة التالية:

$$A(j-1)\vartheta_{j-1} + A(j)\vartheta_j + A(j+1)\vartheta_{j+1} = B(j) \dots \dots \dots (20 - II)$$

$$A(j+1) = \Gamma \frac{Z_1 \vartheta_{j+1} D_{j+1}}{\Delta z [1 - \exp(Z_1)]} \dots \dots \dots (21 - II)$$

$$A(j-1) = \Gamma \frac{Z_2 \vartheta_{j-1} D_{j-1} \exp(Z_2)}{\Delta z [1 - \exp(Z_2)]} \dots \dots \dots (22 - II)$$

$$A(j) = -\Gamma \frac{Z_2 \vartheta_j D_j}{\Delta z [1 - \exp(Z_2)]} - \Gamma \frac{Z_1 \vartheta_j D_j \exp(Z_1)}{\Delta z [1 - \exp(Z_1)]} \dots \dots \dots (23 - II)$$

$$B(j) = \Delta z \vartheta_j$$

$$\begin{cases} \vartheta = n_{e,i} ; \Gamma = 1 ; \vartheta_j = S_e & \text{معادلة الاستمرارية} \\ \vartheta = n_e K T_e ; \Gamma = \frac{5}{2} ; \vartheta_j = S_\varepsilon & \text{معادلة الطاقة} \end{cases}$$

أ- حساب الكثافة الالكترونية :

بعد اختيار لخطوة مجال الدراسة وتطبيق تعريف المشتقات الجزئية حسب طريقة الحجوم المنتهية نصوص معادلة الكثافة

الالكترونية تكتب من الشكل التالي.

$$A_{j-1}n_{e,j-1} + A_j n_{e,j} + A_{j+1}n_{e,j+1} = B_j \dots \dots \dots (24 - II)$$

$$A_{j-1} = \frac{Z_4 D_i \exp(Z_4)}{\Delta z (1 - \exp(Z_4))} \dots \dots \dots (25 - II)$$

$$A_j = -\left(\frac{Z_3 D_i \exp(Z_3)}{\Delta z (1 - \exp(Z_3))} \right) - \left(\frac{Z_4 D_i}{\Delta z (1 - \exp(Z_4))} \right) \dots \dots \dots (26 - II)$$

$$A_{j+1} = \frac{Z_1 D_e \exp(Z_1)}{\Delta z (1 - \exp(Z_1))} \dots \dots \dots (27 - II)$$

بالنسبة ل B_j :

$$B_j = \Delta z k_i N_e(j) \exp\left(-\frac{E_i}{T_e(j)}\right) \dots \dots \dots (28 - II)$$

ب- حساب الكثافة الأيونية :

نصوغ المعادلة التفاضلية للكثافة الأيونية كما يلي :

$$A_{j-1}n_{i,j-1} + A_jn_{i,j} + A_{j+1}n_{i,j+1} = B_j \dots \dots \dots (29 - II)$$

$$A_{j-1} = \frac{Z_4 D_i \exp(Z_4)}{\Delta z (1 - \exp(Z_4))} \dots \dots \dots (30 - II)$$

$$A_j = - \left(\frac{Z_3 D_i \exp(Z_3)}{\Delta z (1 - \exp(Z_3))} \right) - \left(\frac{Z_4 D_i}{\Delta z (1 - \exp(Z_4))} \right) \dots \dots \dots (31 - II)$$

$$A_{j+1} = \frac{Z_3 D_i}{\Delta z (1 - \exp(Z_3))} \dots \dots \dots (32 - II)$$

بالنسبة ل B_j

$$B_j = \Delta z k_i N_e(j) \exp\left(-\frac{E_i}{T_e(j)}\right) \dots \dots \dots (33 - II)$$

ج- حساب درجة الحرارة الالكترونية:

$$A_{j-1}T_{e,j-1} + A_jT_{e,j} + A_{j+1}T_{e,j+1} = B_j \dots \dots \dots (34 - II)$$

$$A_{j-1} = \frac{(2.5 Z_2 N_e(j-1) D_e \exp(Z_2))}{(\Delta z (1 - \exp(Z_2)))} \dots \dots \dots (35 - II)$$

$$A_j = \frac{(-2.5 Z_1 N_e(j) D_e \exp(Z_1))}{(\Delta z (1 - \exp(Z_1)))} - \left(\frac{(2.5 Z_2 N_e(j) D_e \exp(Z_2))}{(\Delta z (1 - \exp(Z_2)))} \right) \dots \dots (36 - II)$$

$$A_{j+1} = \frac{(2.5 Z_1 N_e(j+1) D_e \exp(Z_1))}{(\Delta z (1 - \exp(Z_1)))} \dots \dots \dots (36 - II)$$

بالنسبة ل B_j

$$B_j = (0.5 e (J_1 + J_2) (V(j+1) - V(j)) - \left(k_i N_e(j) \exp\left(-\frac{E_i}{T_e(j)}\right) kx \right) \Delta z \dots \dots (37 - II)$$

لحساب الكثافة الالكترونية، الكثافة الأيونية، درجة الحرارة الالكترونية، الكمون الكهربائي للأرغون نستخدم الطرق

التكرارية والمتمثلة في إنشاء متتالية لحلول تقريبية وتتوقف عند الوصول إلى الدقة المطلوبة (دقة المبرمج أو الكمبيوتر)،

ومن أبسط وأكثر الطرق استعمالا هي الطريقة التكرارية غوص-صيدل.

هـ - حساب الكمون الكهربائي:

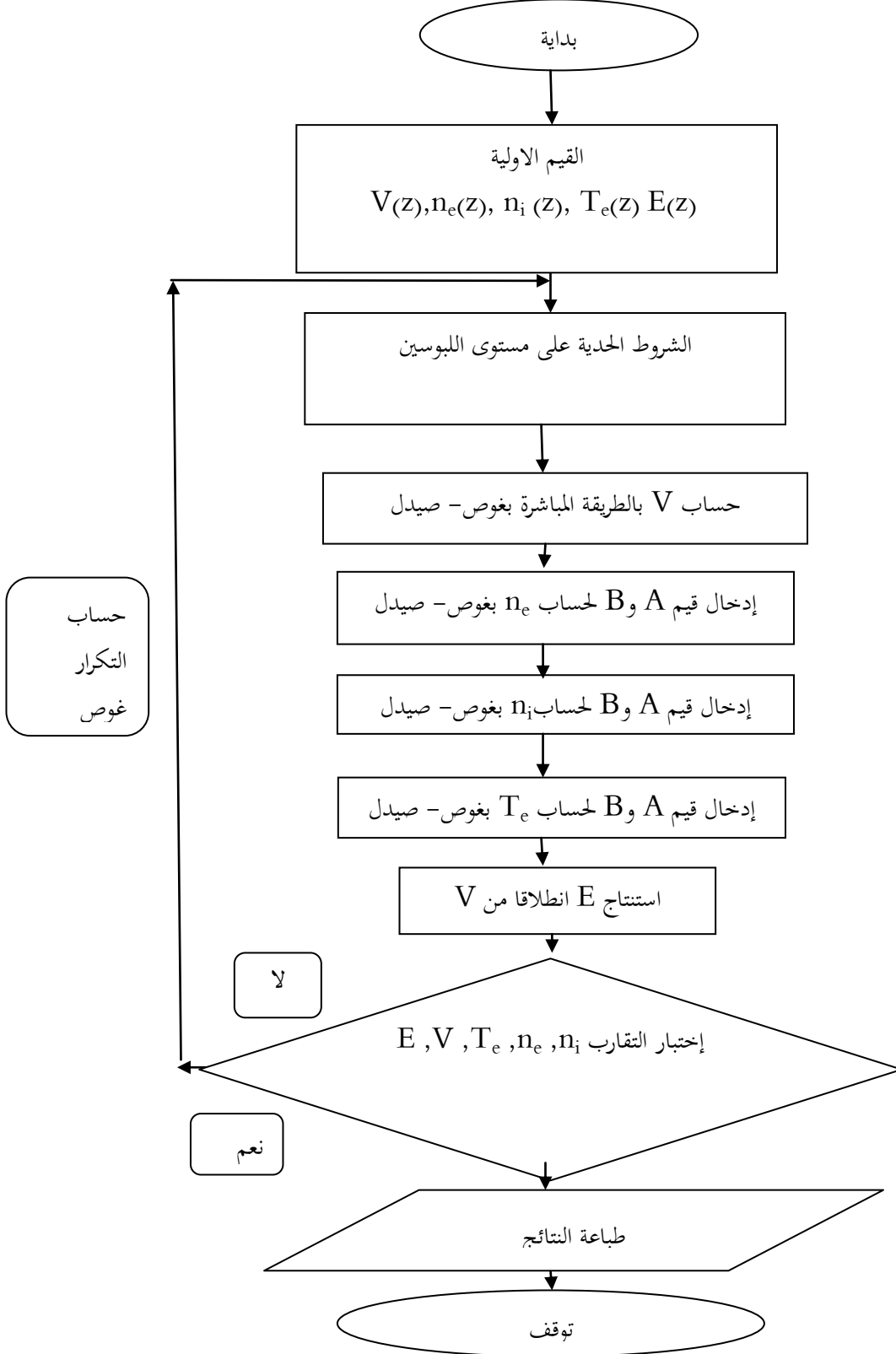
$$V(j) = \frac{(V(j+1) + V(j-1)) - (\Delta^2 z \left(\frac{e}{\epsilon}\right) (N_e(j) - N_i(j)))}{2} \dots\dots (38 - II)$$

د - حساب الحقل الكهربائي:

$$E(j) = \frac{(V(j+1) - V(j))}{\Delta z} \dots\dots\dots (39 - II)$$

4-II برنامج الحساب:

استعملنا حل البرنامج لغة الفورترن. الشكل (3-II) يوضح مخطط لحساب العددي للبرنامج:



الشكل (3-II): مخطط سير الحساب العددي للبرنامج المقترح لهذا العمل

مراجع الفصل الثاني:

- [1] ز. بلة؛ " الدراسة التشخيصية بالمحاكاة العددية لمسبار كهربائي ساكن في رش مهبطي؛؛ مذكرة ماجستير ؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2007).
- [2] خ. بن واعر؛ "الخصائص الكهربائية لبلازما متعدد المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر RF"؛ مذكرة ماستر؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة.(2014) .
- [3] M. Dalvie, M. Surendra, and G. S. Selwyn; "*Self-consistent model of a direct-curent glow discharge in tow dimension*"; J. Appl. Lett. **62** (24), pp 3207-3209 (1993).
- [4] A. Bouchikhi; "*Modèle fluide d'ordre deux en 1D et 2D d'une décharge lumineuse*"; Presses Académiques Francophones (2012).
- [5] س. عبيد؛ "دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في الجهاز الرش المهبطي المغنطوني باستعمال طريقة الحجم المنتهية"؛ مذكرة ماجستير؛ جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2012).
- [6] D. Benyoucef ; "*Modélisation particulière et multidimensionnelle des décharges hors équilibre a basse pression excitées par champs électromagnétiques*"; Thèse de doctorat ; Université de Toulouse (2011).
- [7] M. Sibony, et J. Cl. Mardon; "*Analyse numérique II, Approximations et équations différentielles* " Hermann; Editeurs des Sciences et des Arts, Pairs (1984).
- [8] A. Bouchikhi, A. Hami, A. Flitti and A. Tilmatine; "Application of the 2 order fluid model for the townsend's discharge study "; Acta electrotehnica; Vol. **49** ; N(4), 404-411 (2008).

الفصل الثالث:

نتائج وتحليل

الفصل الثالث: نتائج وتحليل

III-1 مقدمة

اختلفت الدراسات المنجزة في حساب خصائص الكهربية البلازما (كثافة الالكترونات والايونات، درجة الحرارة الالكترونات..) لبلازما الأرجون بطريقة الرش المهبطي نذكر منها:

في عام 1993 درس M. Dalvie ورفقائه M. Surendra و G. S. Selwyn. الخصائص الكهربية للبلازما بتطبيق نموذج المواع لنظام غير مستقر ولبعدين [1].

في عام 2001 درس P. Scheubert ورفقائه P. Awakowicz و R. Schwefel و G. Wachutka الخصائص الكهربية للبلازما بتطبيق نموذج المواع لبعدين في نظام غير مستقر. [2]

في عام 2008 درس A. Bouchikhi الخصائص الكهربية لبلازما الأرجون بتطبيق نموذج المواع لنظام مستقر وبعده واحد معتمد في ذلك صيغة الآسية. [3]

في عام 2013 درس A. Hennad ورفيقه H. Tebani الخصائص الكهربية لبلازما الأرجون بتطبيق نموذج المواع لنظام غير مستقر لثلاثة ابعاد معتمد على علاقة انشتاين لمعامل الانتشار الالكتروني واستعمل الصيغة الآسية وطريقة الفروق المنتهية لحل معادلاته. [4]

في الأعمال السابقة لمخبرنا LRPPS، تم دراسة من طرف ز. بلة ورفقائها في 2007 [4] وفي 2009 [6]، الخصائص الكهربية لبلازما الأرجون وذلك بتطبيق نموذج المواع لبعده واحد ولنظام مستقر وللحل العددي استعملت طريقة الفروق المنتهية، ثم قامت بتطبيق النتائج المتحصلة عليها لإيجاد المميز تيار جهد لمسبار لانبجيم، وقامت بعد ذلك س. عبيد في 2012 بتطبيق نموذج المواع لبعدين ولنظام مستقر على بلازما الأرجون واعتمدت للحل العددي طريقة الحجوم المنتهية [7] ثم قامت خ. بن واعر في 2014 بحساب خصائص الكهربية لبلازما متعددة المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر RF بتطبيق نموذج المواع لبعده واحد ولنظام مستقر على بلازما الأرجون والأوكسجين [8] أخذت عين الاعتبار هذه الأعمال في درجة الحرارة الالكترونية ثابتة .

قمنا في هذا العمل بحساب الخصائص الكهربائية لبلازما الأرغون بتطبيق نموذج المواع لبعدها ونظام مستقر الذي يعتمد على معادلة الاستمرارية للإلكترونات والأيونات مكتملة بمعادلة بواسون حيث اعتبرنا الطرف الثاني لمعادلة الاستمرارية متعلق بدرجة الحرارة الإلكترونية مما يستوجب علينا إضافة معادلة الطاقة إذ تمكننا هذه الأخيرة من حساب تغير الموضعي لدرجة الحرارة الإلكترونية باعتبارها كأحد الخصائص الكهربائية.

تعتبر دراسة تأثير العوامل ماكروسكوبية والشروط الحدية وكذلك علاقة انشطارين لمعامل الانتشار الإلكتروني أهم الوسائط التي تتحكم في إنتاج الطبقات الرقيقة لهذا السبب ارتأينا في هذا الفصل أن نقدم الحالات الثلاثة.

- أولا قمنا بمقارنة بين نتائج A. Bouchikhi والنتائج منحصلة عليها.

- ثانيا حساب الخصائص الكهربائية لبلازما لثلاثة حالات:

✓ درجة الحرارة ومعامل الانتشار الإلكتروني متغيرين.

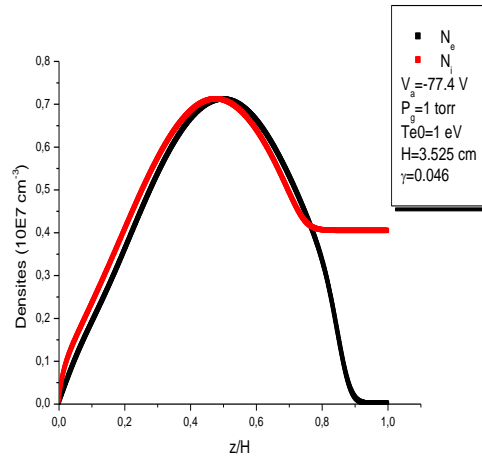
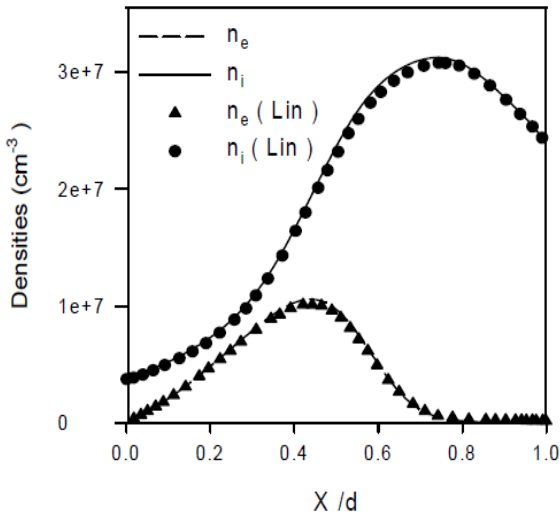
✓ درجة الحرارة الإلكترونية ومعامل الانتشار الإلكتروني ثابتين.

✓ درجة الحرارة الإلكترونية متغيرة ومعامل الانتشار الإلكتروني ثابت.

- ثالثا قمنا بدراسة تأثير عوامل ماكروسكوبية (فرق الجهد، درجة الحرارة الإلكترونية الابتدائية وضغط)

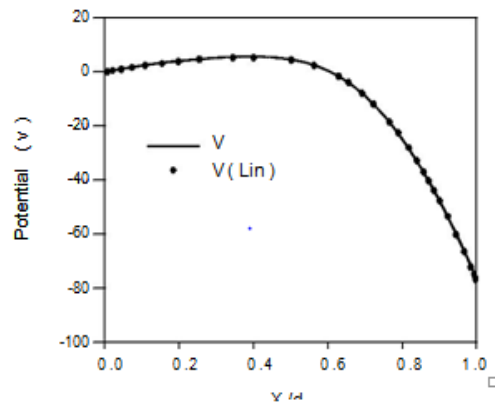
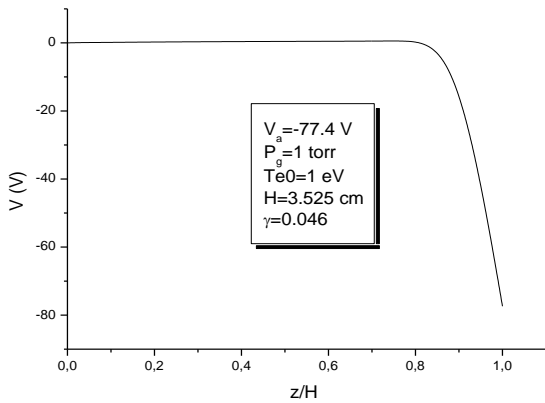
III-2- التغير الموضعي للخصائص الكهربائية للبلازما

قمنا بمقارنة بين منحنيات الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية، الكمون الكهربائي، الحقل الكهربائي و درجة الحرارة الإلكترونية للأرغون. مع نتائج المقدمة من طرف A. Bouchikhi شكل (III-1-ب) : حيث أبدت هذه المقارنة توافق في سلوك المنحنيات. إلا أن وجدنا هناك اختلاف في منطقة قلب البلازما بين كثافة الأيونات وكثافة الإلكترونات كما في الشكل (III-1-أ) وهذا راجع إلى طريقة المعالجة المعتمدة من طرف A. Bouchikhi، حيث اعتبر التفريغ الكهربائي متكون من منطقتين (مصعد ومهبط) فيما اعتبرنا في عملنا الوسط متكون من ثلاثة مناطق (مصعد، بلازما ومهبط).



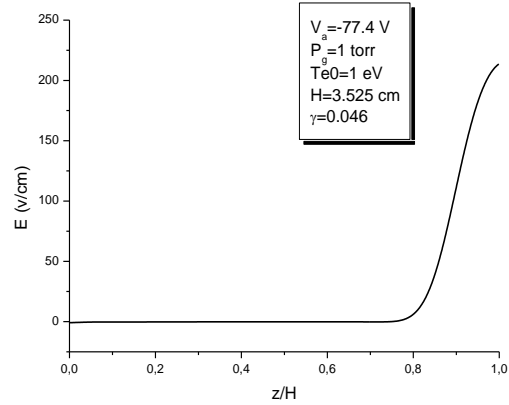
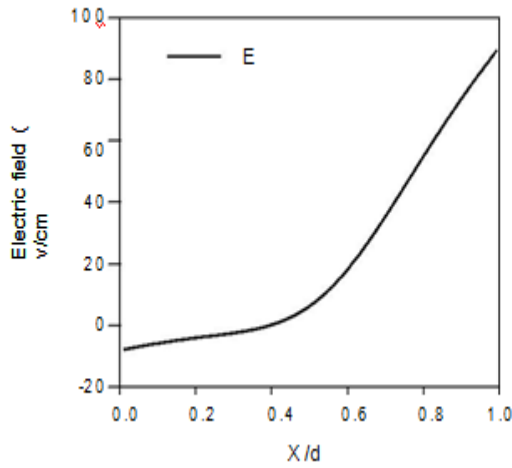
الشكل (III-1-أ): التغير الموضعي للكثافات A. Bouchikhi الشكل (III-1-ب): التغير الموضعي للكثافات لـ A. Bouchikhi

يمثل الشكل (III-1-أ) التغير الموضعي للكثافات بدلالة البعد Z بين المهبط والمصدر حيث نلاحظ أن الكثافة الإلكترونية والأيونية للأرغون في المجال [0-2.75cm] لهما نفس السلوك إذ تتزايد إلى أن تصل للذروة ثم تتناقصان وفي المجال [2.75-3.525cm]. تأخذ قيمة ثابتة وتقدر $4 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ويرجع هذا إلى تأثير درجة الحرارة الإلكترونية والشروط الحدية على مستوي الحواف.



الشكل (III-2-ج): التغير الموضعي للكمون الكهربائي لـ A. Bouchikhi الشكل (III-2-د): التغير الموضعي للكمون الكهربائي

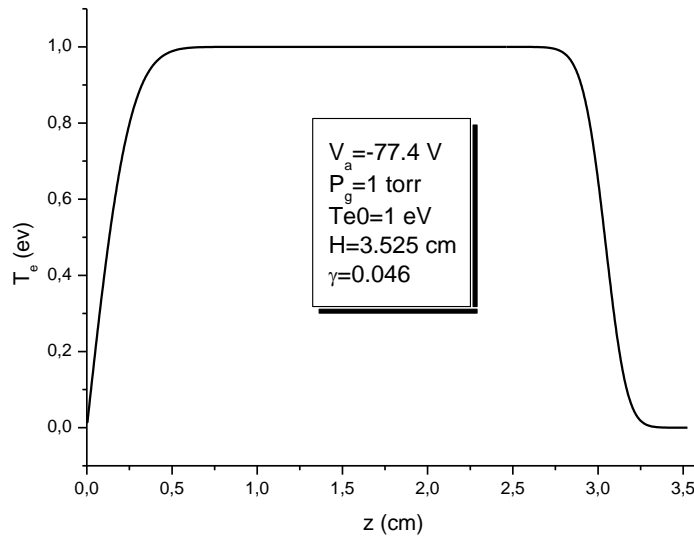
الشكل (III-3-ج) يمثل منحنى تغير الموضعي للكمون الكهربائي، حيث الملاحظة العامة التي يمكن أن نقدمها لهذا المنحنى هو الثبوت المستمر و هذا راجع إلى أن الكثافات في قلب البلازما لهم نفس المقدار يصبح المشتق الثاني معدوم. و بعدها يتناقص في الموضع 2.7cm إلى أن يأخذ قيمة (-77.4V) (الجهد المطبق على البوسين).



الشكل (III-3-هـ): التغير الموضعي للحقل الكهربائي الشكل (III-3-و): التغير الموضعي للحقل الكهربائي ل. A. Bouchikhi

أما بالنسبة لشكل (III-3-هـ) منحى الحقل الكهربائي، يأخذ قيمة معدومة في معظم الوسط (مصعد والبالازما) في

المجال [0-0.75] ثم يتزايد كلما اقتربنا من المهبط إلى أن يصل إلى قيمة عظمي تساوي (252V/cm).



الشكل (III-4): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة البعد Z

الشكل (III-4) يمثل منحى تغير موضعي لدرجة الحرارة الالكترونية، حيث الملاحظة العامة التي يمكن أن نقدمها لهذا المنحى

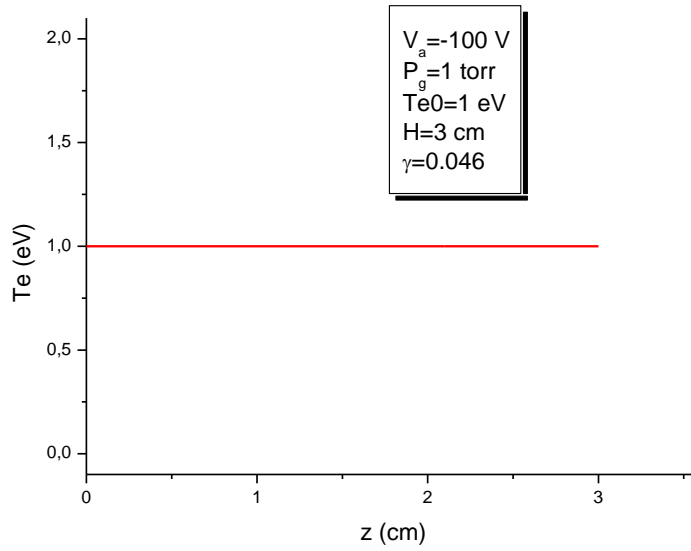
هو التزايد المستمر إلى أن يثبت في القيمة 1eV في المجال [0.5-2.7cm] وبعدها يتناقص.

II- 3 حساب الخصائص الكهربائية في ظروف معينة

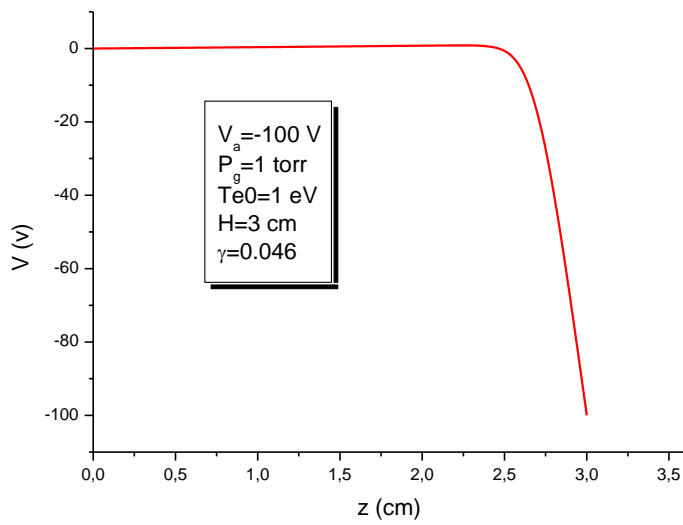
في هذه فقرة سنقوم بحساب الخصائص الكهربائية لبلازما الأرجون ومعرفة مدى تأثير درجة الحرارة الإلكترونية وهذا بتطبيق نموذج

الموائع لبعده واحد ونظام مستقر وفق ثلاثة حالات وهي:

✓ حالة الاولى : سنقوم في هذه الحالة بتثبيت درجة الحرارة ومعامل الانتشار الإلكتروني.

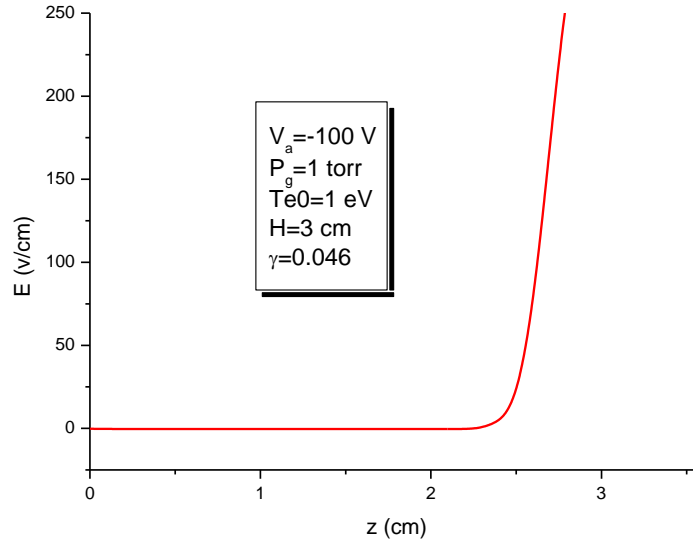


الشكل (III-5): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الإلكترونية بدلالة البعد z



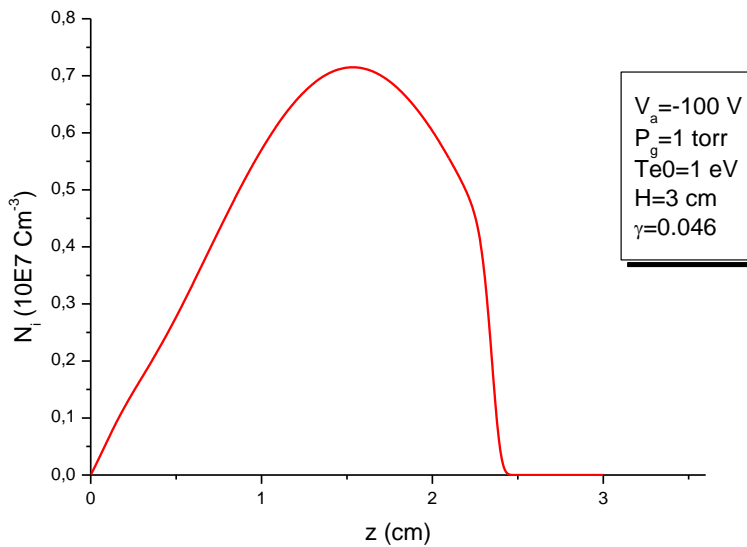
الشكل (III-6): التغير للكمون الكهربائي بدلالة البعد z

الشكل (III-6) منحني الكمون الكهربائي ينخفض على مستوى احد القطبين وهذا الانخفاض هو واحد من خصائص الكمون في منطقة كاثودين وإمكانية أن تختلف قليلا وهذا سلوك عادي وذلك بسبب قيمة كثافة الشحنة .



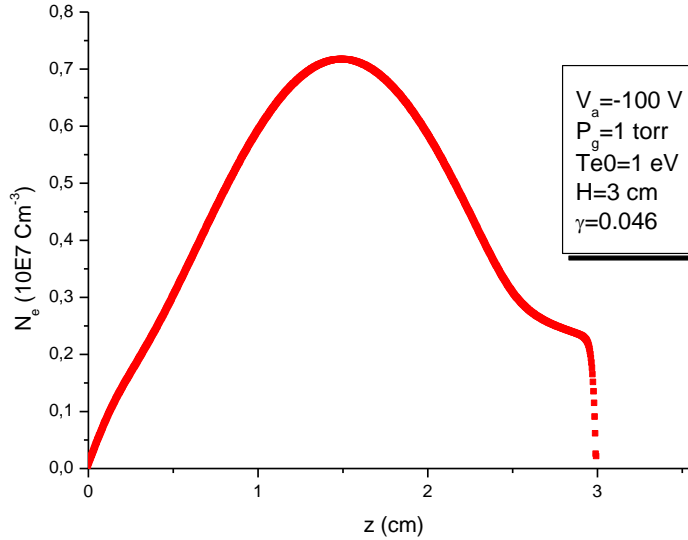
الشكل (III-7): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعد Z

الشكل (III-7) يمثل منحني التغير الموضعي للحقل الكهربائي نلاحظ انه يبدأ من قيمة معدومة في المجال $[0-2.3\text{cm}]$ إلى أن يتزايد كلما اقتربنا من المهبط.



الشكل (III-8): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة البعد Z .

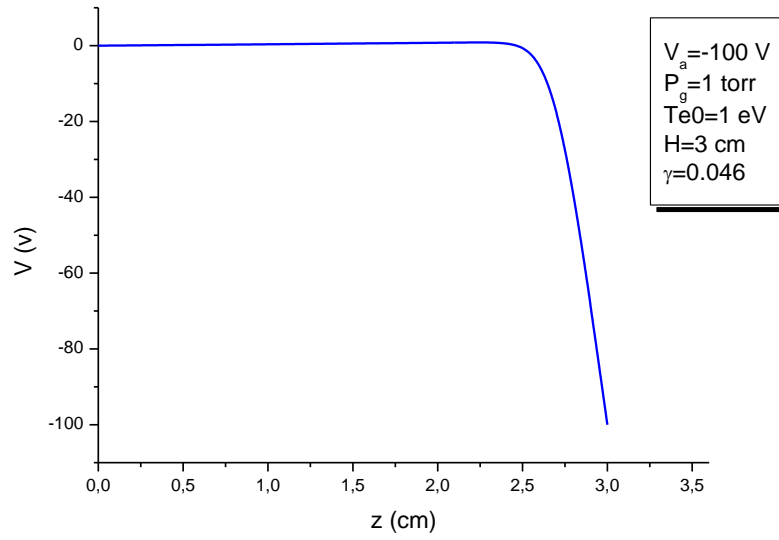
الشكل (III-8) يمثل التغير الموضعي لكثافة الأيونية نلاحظ أن توزيع المكاني في حالة مستقرة أي أن سلوكها طبيعي بتزايد إلى أن تصل لذروة ثم تتناقص وهذا راجع إلى أن درجة الحرارة ثابتة وقيمة معامل الانتشار الالكتروني ثابتة.



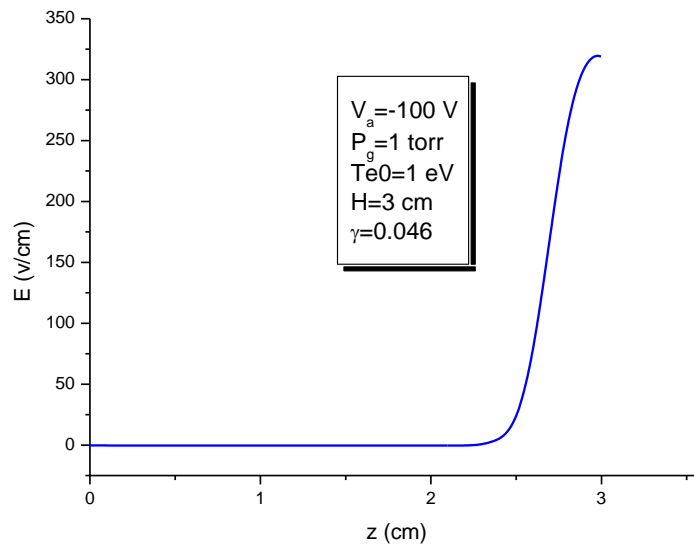
الشكل (III-9): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة البعد Z .

الشكل (III-9) يمثل منحنى الكثافة الالكترونية حيث نلاحظ أن سلوكها في البداية طبيعي إلى أن تصل لذروة (وسط البلازما) تتناقص تدريجياً ولكن عندما تأخذ القيمة $(2.5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3})$ تغير مسارها قليلاً ثم تواصل استمرارها ويفسر هذا التغير على مستوى المهبط بتبريد الالكترونات.

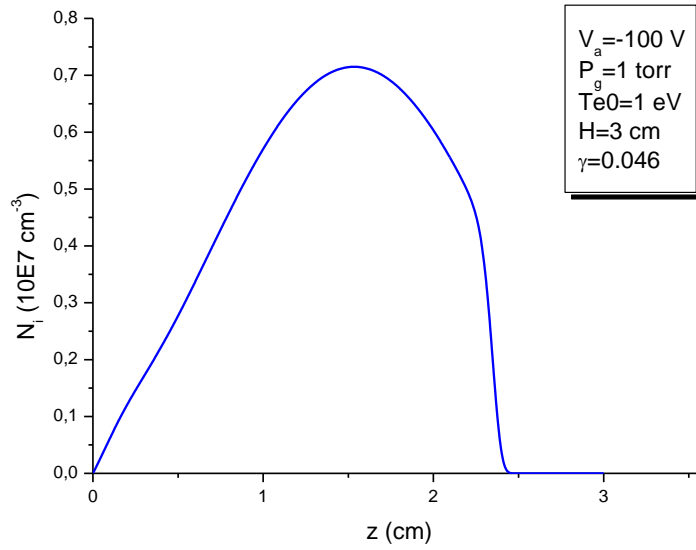
✓ **حالة الثانية :** سنقوم في هذه الحالة بتغير درجة الحرارة ومعامل الانتشار الالكتروني (علاقة اينشتاين) .



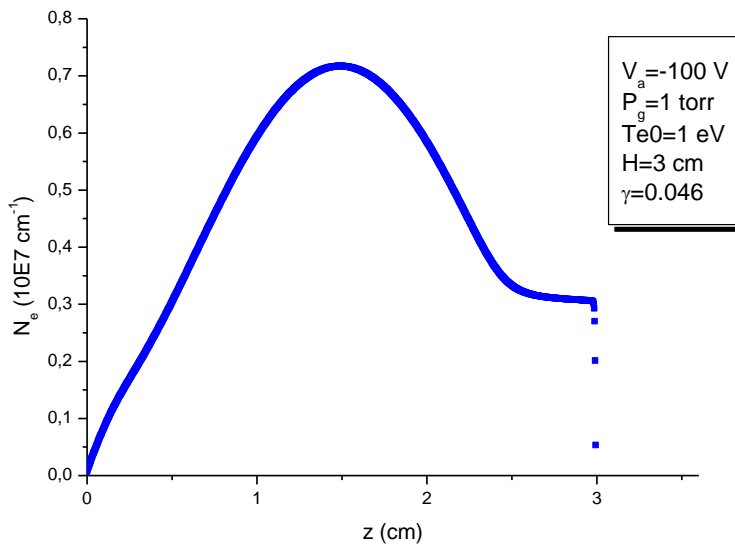
الشكل (III-10): التغير الموضعي للكُمون الكهربائي بدلالة البعد z .



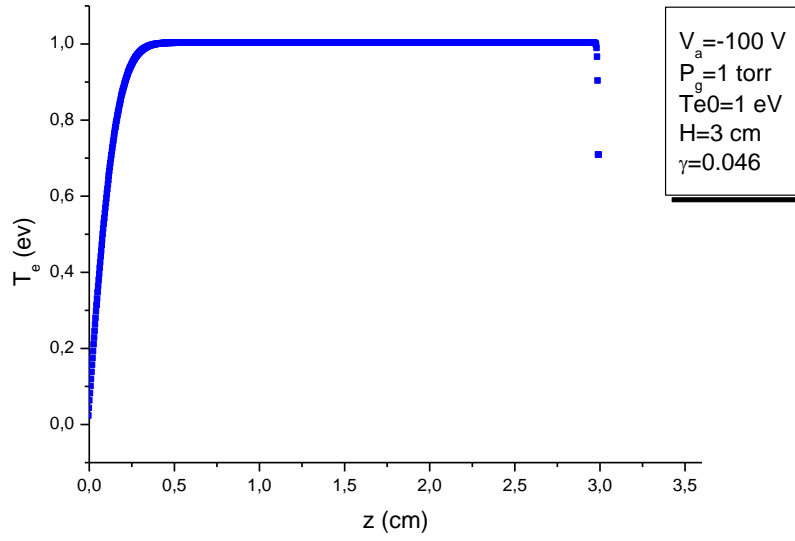
الشكل (III-11): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعد z .



الشكل (III-12): التغير الموضعي للكثافة الايونية بدلالة البعد z .

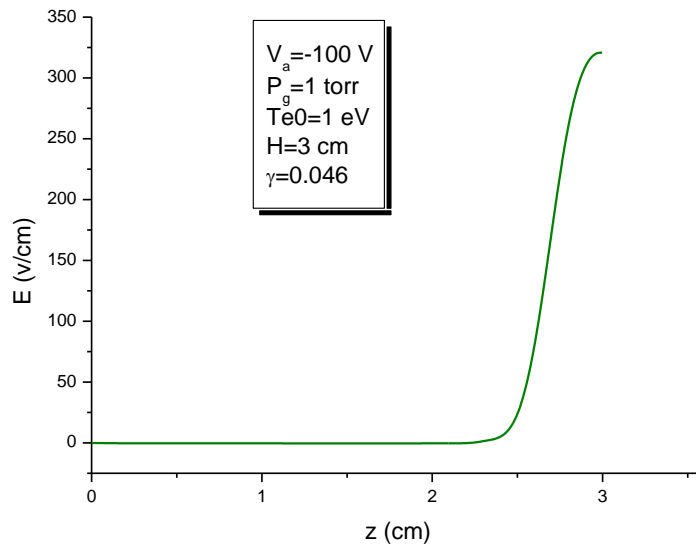


الشكل (III-13): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة البعد z .

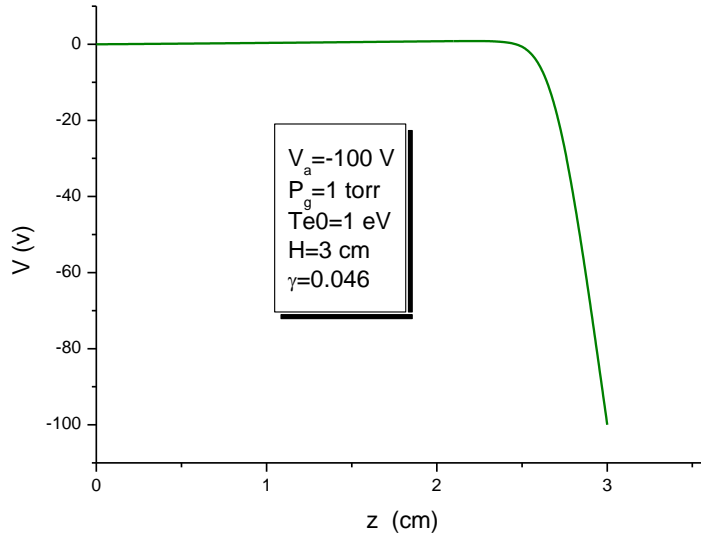


الشكل (III-14): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة البعد z .

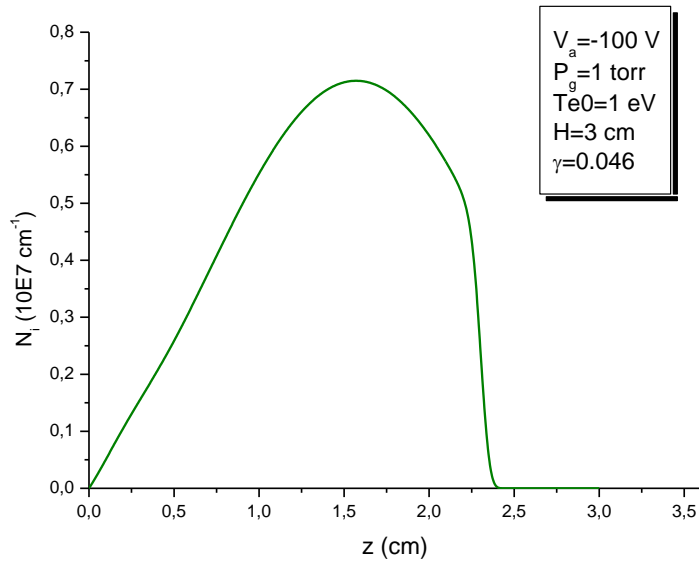
✓ حالة الثالثة : سنقوم في هذه الحالة بتثبيت معامل الانتشار وتغير درجة الحرارة الالكترونية.



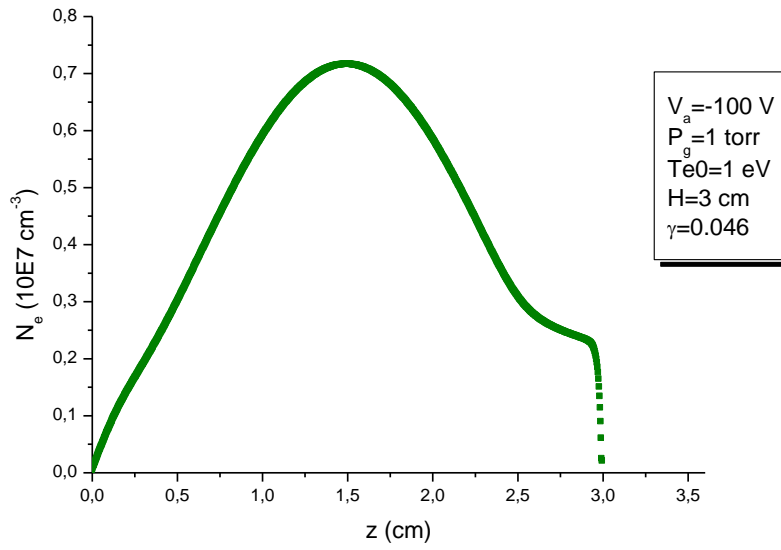
الشكل (III-15): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة البعد z .



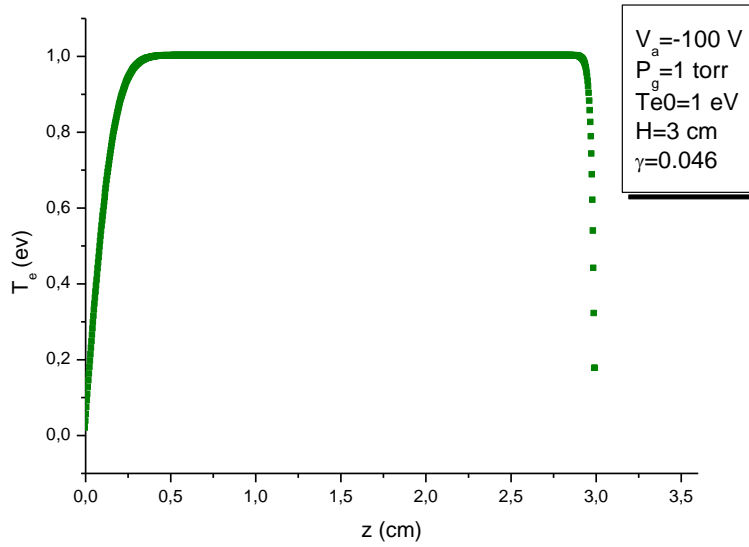
الشكل (III-16): التغير الموضعي للكُمون الكهربائي بدلالة البعد z .



الشكل (III-17): التغير الموضعي للكثافة الايونية بدلالة البعد z .



الشكل (III-18): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة البعد z .



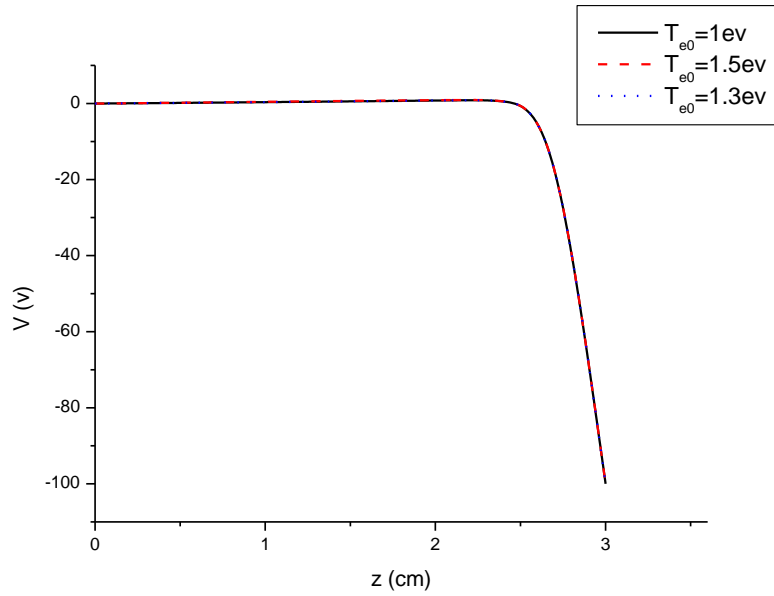
الشكل (III-19): التغير الموضعي للدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة البعد z .

III-4 تأثير العوامل ماكروسكوبية على خصائص الكهربائية للبلازما

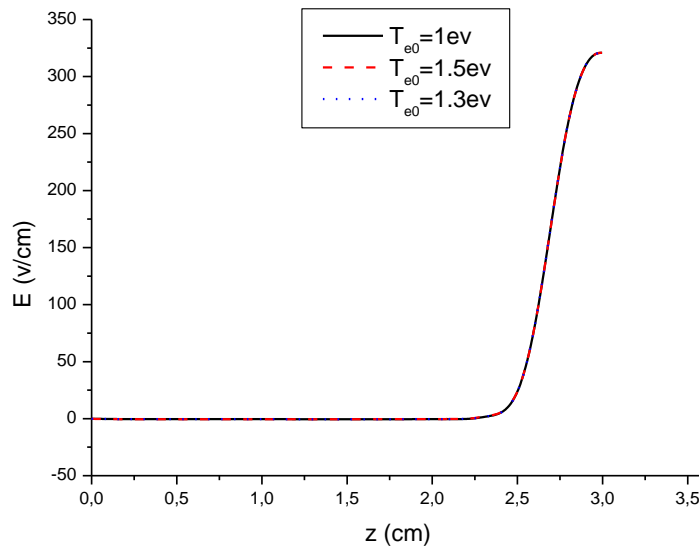
III-4-1 تأثير درجة الحرارة الإلكترونية:

نثبت كل من قيمة فرق الجهد (100V) والضغط (1torr) ومعامل الانتشار ونغير درجة الحرارة الإلكترونية ما بين (1.5eV -

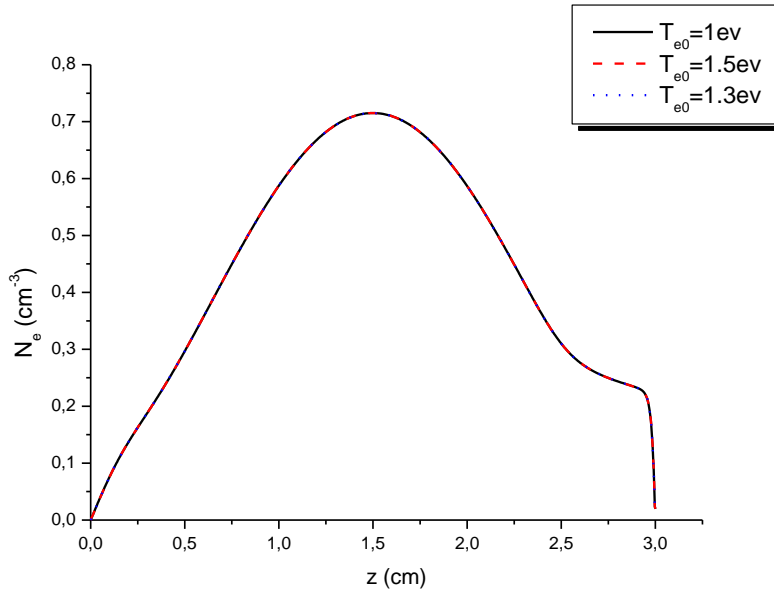
1-1.3) وفقا لهذه العوامل تكون المنحنىات على الشكل الآتي:



الشكل (III-20): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة درجة الحرارة الإلكترونية الابتدائية



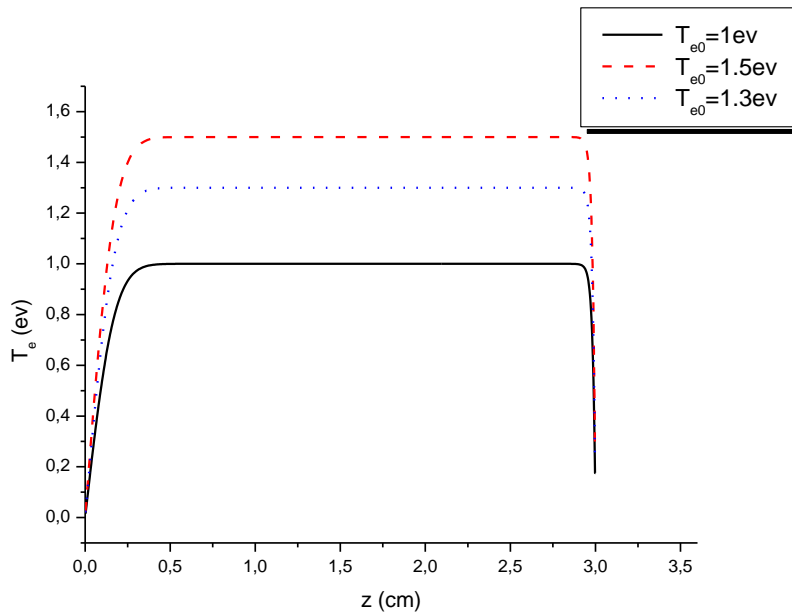
الشكل (III-21): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة درجة الحرارة الإلكترونية الابتدائية



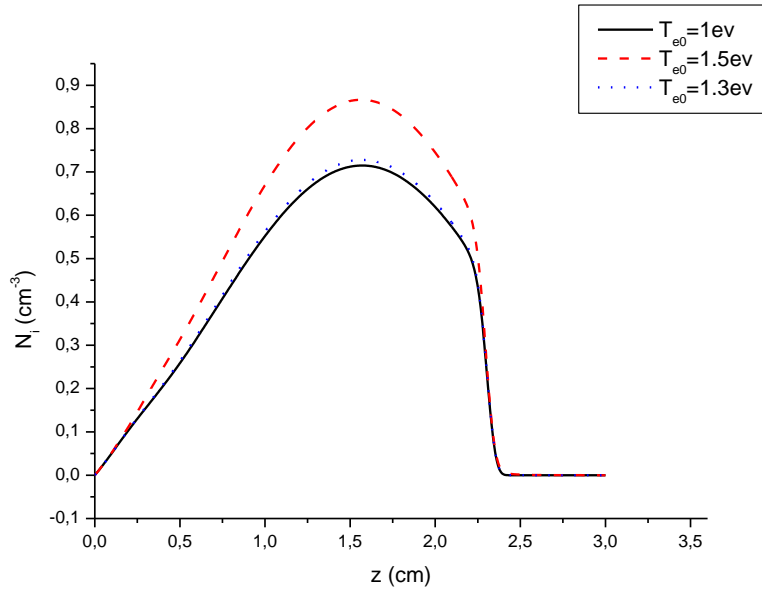
الشكل (III-22): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة درجة الحرارة الالكترونية الابتدائية

بالنسبة لشكلين (III-21) و (III-22) يمثلان التغير الموضعي للحقل الكهربائي والكثافة الالكترونية الموضعي لا يتأثر بتغير

درجة الحرارة الالكترونية الابتدائية.



الشكل (III-23): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة درجة الحرارة الالكترونية الابتدائية

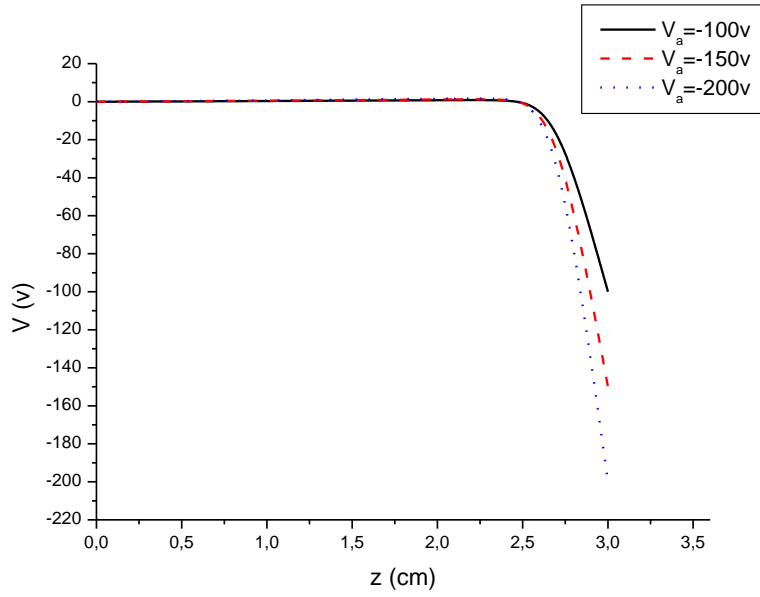


الشكل (III-24): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة درجة الحرارة الالكترونية الابتدائية

الشكل (III-23) والشكل (III-24) يكون التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية وكثافة الايونات متزايد كلما زدنا في قيمة درجة الحرارة أي و جود علاقة طردية بينهم.

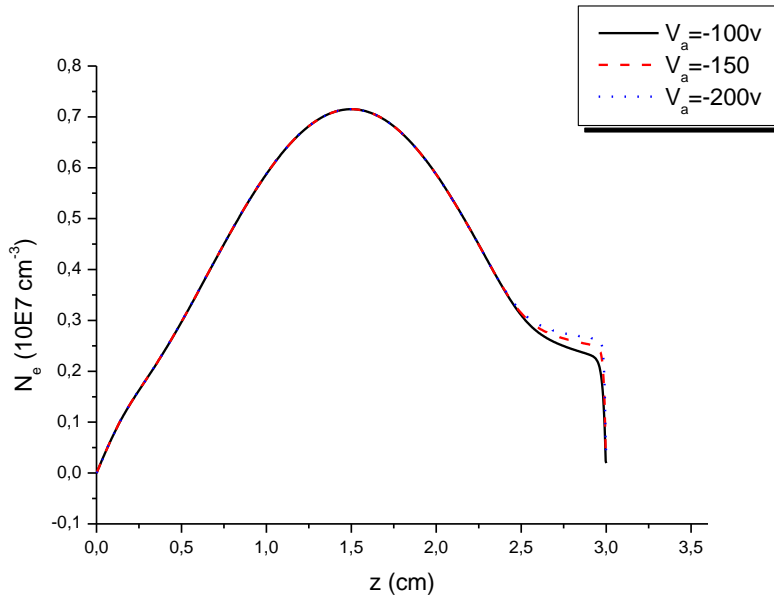
III-4-2 تأثير فرق الجهد الكهربائي المطبق:

نثبت الضغط (1 torr) ومعامل الانتشار ونغير درجة الحرارة الالكترونية مع تغير قيمة فرق الجهد عند المهبط (150-200V-100) وفقا لهذه العوامل تكون المنحنيات على الشكل الاتي.



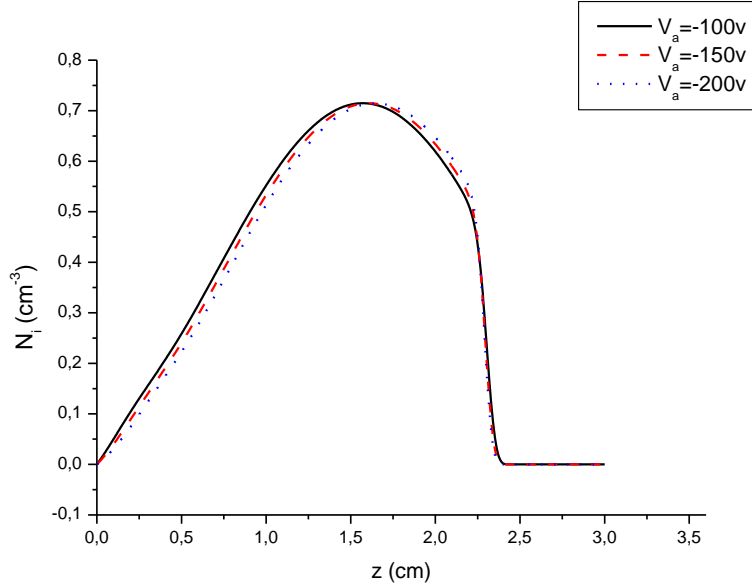
الشكل (III-25): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة الجهد المطبق.

الشكل (III-25) منحنى تغير الموضعي للكمون الكهربائي يكون متناقص كلما زدنا في قيمة فرق الجهد أي ان هناك علاقة عكسية بينهم.



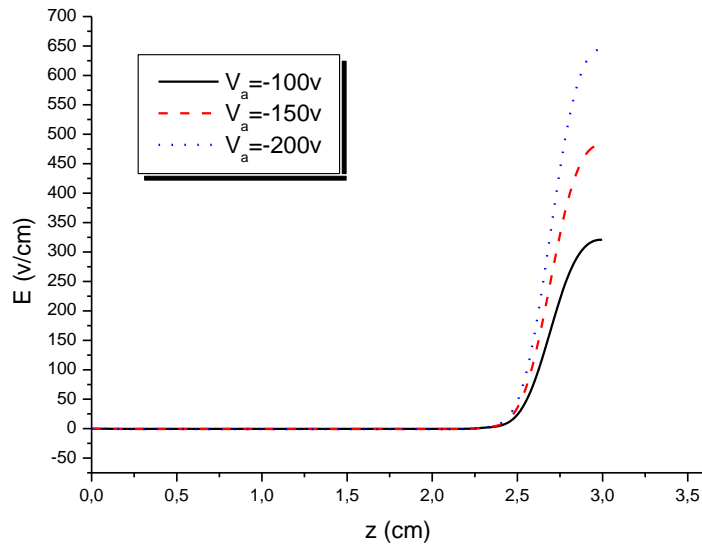
الشكل (III-26): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة الجهد المطبق.

الشكل (III-26) نلاحظ أن تغير الموضعي للكثافة الالكترونية مستقر في الأول إلى أن يصل إلى الذروي يتناقص تدريجيا وبقرها من القطب تتأثر بتغير فرق الجهد كلما زدنا في فرق الجهد تزيد الكثافة الالكترونية.

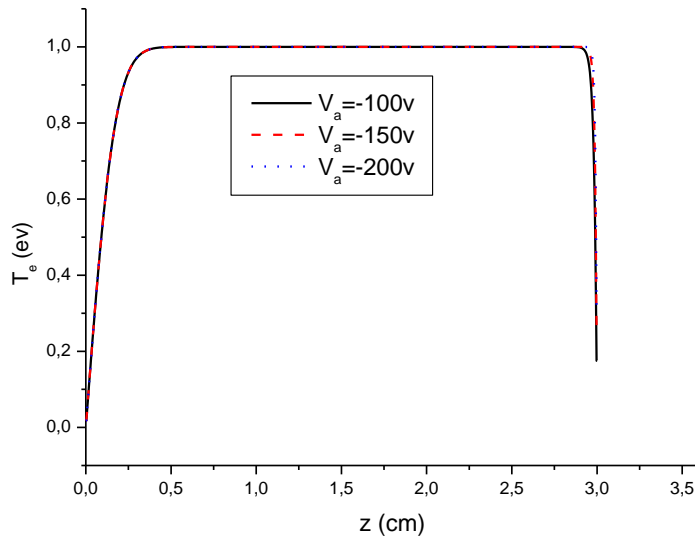


الشكل (III-27): التغير الموضعي للكثافة الايونية بدلالة الجهد المطبق.

نلاحظ من خلال الشكل (III-27) أن تغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة الجهد المطبق نجد أن كلما زاد الجهد تناقصت الكثافة الأيونية يوجد علاقة عكسية بينهم في المجال [0-1.5cm] وفي المجال [1.5-2.3cm] توجد علاقة طردية وفي المجال [2.3-3cm] لا تحدث تغير.



الشكل (III-28): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة الجهد المطبق

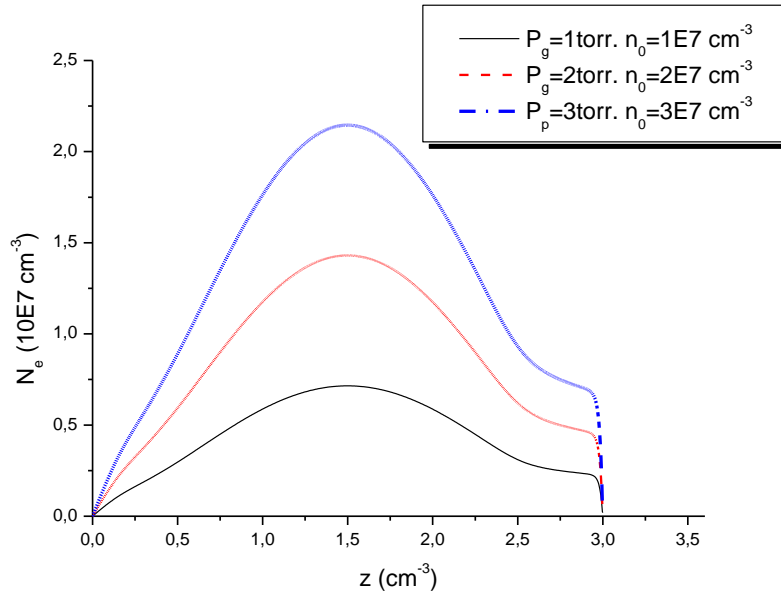


الشكل (III-29): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة الجهد المطبق

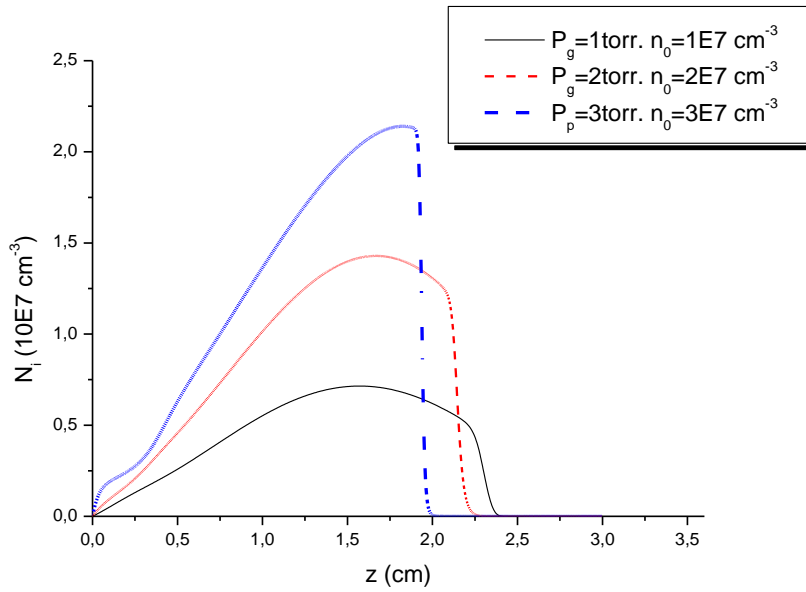
III-4-3 تأثير الضغط

لدراسة تأثير الضغط على خصائص الكهربائية لبلازما نقوم بتثبيت فرق الجهد (100V) مع تغير الضغط (1-2-3torr)

مع تغير درجة الحرارة الالكترونية مع قيمة N_0 ($1 \cdot 10^7$, $2 \cdot 10^7$, $3 \cdot 10^7$) cm^{-3} .



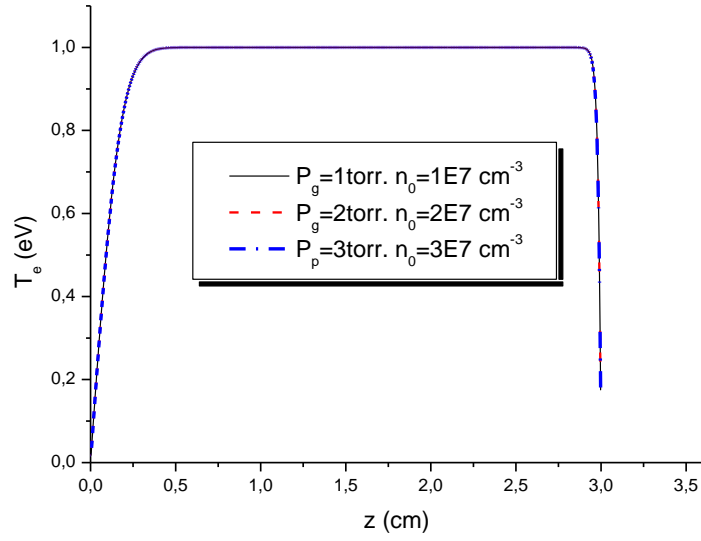
الشكل (III-30): التغير الموضعي للكثافة الالكترونية بدلالة الضغط.



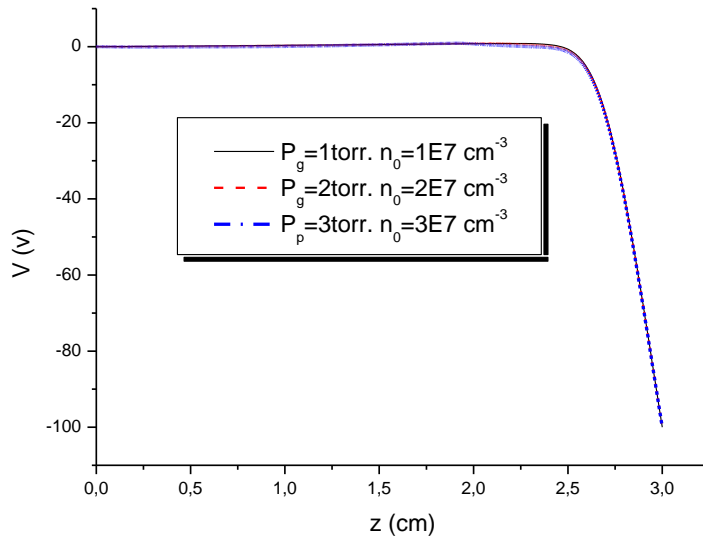
الشكل (III-31): التغير الموضعي للكثافة الأيونية بدلالة الضغط.

نلاحظ من خلال الشكل (III-30) و (III-31) أن التغير الموضعي للكثافة الأيونية والكثافة الالكترونية تتناسب طرديا مع

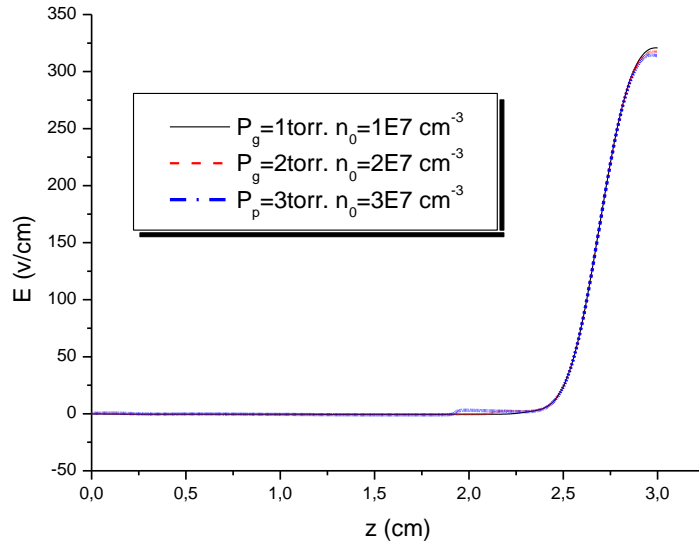
الضغط.



الشكل (III-32): التغير الموضعي لدرجة الحرارة الالكترونية بدلالة الضغط.



الشكل (III-33): التغير الموضعي للكمون الكهربائي بدلالة الضغط.



الشكل (III-34): التغير الموضعي للحقل الكهربائي بدلالة الضغط

نلاحظ من خلال الأشكال (III-32) و (III-32) و (III-33) التغير الموضعي ودرجة الحرارة الإلكترونية والكمون وللحقل

لا تتأثر بتغير الضغط.

مراجع الفصل الثالث

- [1] M. Dalvie ; M. Surendra and G. S. Selwyn; "*Self-consistent model of a direct-curent glow discharge in tow dimension*"; J. Appl. Lett. **62** (24); pp 3207-3209 (1993).
- [2] P. Scheubert; P. Awakowicz; R. Schwefel and G. Wachutka; "Fluid dynamic modelling and experimental diagnostics of an inductive high density plasma source (ICP) "; Surface and Coatings Technology **142-144**; pp 526-530 (2001).
- [3] A. Bouchiki, A. Hamid, A. Flitti and A. Tilmatine; "Application of the 2 order fluid model for the townsend 's discharge study; Acta electrotehnica; Vol. **49**; N(4) ; 404-411 (2008).
- [4] H. Tebani, A. Hennad; " Three-dimensional modelling of the DC glow discharge using the second order fluid model"; przeglad elektrotechniczny; R. **89** NR 8 pp 166-169 (2013).
- [5] ز. بلة; " الدراسة التشخيصية بالحاكاة العددية لمسبار كهربائي ساكن في رش مهبطي ";مذكرة ماجستير ;جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2007).
- [6] 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 ; **1 n°3**;pp 24-31 (2009).
- [7] س. عبيد; "دراسة في ثلاث أبعاد للمقادير الكهربائية في الجهاز الرش المهبطي المغنطروني في باستعمال طريقة الهجوم المنتهية"; مذكرة ماجستير; جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2012).
- [8] خ. بن واعر; "الخصائص الكهربائية لبلازما متعدد المركبات الأيونية بطريقة الرش المهبطي بمصدر RF"; مذكرة ماستر; جامعة قاصدي مرباح ورقلة (2014).

الخلاصة العلمية

الخلاصة العامة

لدراسة إمكانية الزيادة من سرعة ترسب الطبقات الرقيقة المتوضعة بطريقة الرش المهبطي وتحسين مردوده، من الضروري دراسة خصائص الكهربائية للبلازما، تتم هذه دراسة إما تجريبيا باستعمال طرق التشخيص، كمسبار لانجمير، المطياف الضوئي ومطياف الكتلة، أو نظريا بطريقة النمذجة حيث أقتحت عدة نماذج منها النموذج الحركي، نموذج الموائع والنموذج الهجين.

قمنا في هذا العمل بحساب الخصائص الكهربائية لبلازما الأرغون Ar، المستعملة لتوضع طبقات السيليسيوم Si بطريقة الرش المهبطي، حيث يتراوح البعد بين اللبوسين من (3cm إلى 4cm) وضغط يساوي (1Torr)، أما درجة حرارة الإلكترونات تقدر ب(1eV). لهذا الغرض استعملنا حل هذه المسألة نموذج الموائع لبعده واحد ونظام مستقر الذي يعتمد على معادلتى الاستمرارية للإلكترونات والايونات مكتملة بمعادلة يواسون حيث اعتبرنا الطرف الثاني لمعادلة الاستمرارية متعلق بدرجة الحرارة الإلكترونية. مما يستوجب علينا إضافة معادلة الطاقة، إذ تمكننا هذه الأخيرة من حساب تغير الموضعي لدرجة الحرارة الإلكترونية باعتبارها كأحد الخصائص الكهربائية للبلازما. ولقد إعتدنا على الصيغة الآسية لعبارات التدفق (الإلكتروني، الأيوني والطاقة) وعلى طريقة الهجوم المنتهية للحل العددي. وتمت برمجة المعادلات بلغة الفورترن معتمدين في ذلك الطريقة التكرارية غوص-صيدل لحساب الكمون الكهربائي، الكثافة الأيونية والكثافة الإلكترونية ودرجة الحرارة الإلكترونية. تم نستنتج الحقل الكهربائي.

النتائج التي تحصلنا عليها أبدت توافقا مع نتائج أعمال A. Bouchikhil المنشورة في مجلة (Acta electrotehnica) لسنة 2008 من ناحية سلوك منحنيات إلا أن هناك اختلاف في وسط البلازما. وهذا اختلاف راجع إلى طريقة المعالجة التي اعتمدها A. Bouchikhi بأن الوسط متكون من منطقتين (مصعد ومهبط) وهذا يفسر عدم حصوله على تطابق بين قيمتي الكثافة الإلكترونية والأيونية في قلب البلازما. كما وجدنا أن هناك تطابق في منحني الحقل الكهربائي والكمون الكهربائي.

و في الأخير تطرقنا إلى تأثيرا لخصائص الماكروسكوبية كالدرجة الحرارة الإلكترونية والضغط والجهد المطبق..... إلخ فتبين أن لهم دور في تغير خصائص الكهربائية للبلازما.

الخلاصة العامة

✓ وجدنا أن هناك علاقة طردية بين الكثافة الأيونية ودرجة الحرارة الالكترونية الابتدائية أي كلما زادت درجة الحرارة الالكترونية زادت كثافة الأيونية.

✓ نجد أن الكثافة الالكترونية، الكمون الكهربائي والحقل الكهربائي يتأثرون بتغير فرق الجهد ولكن هذا التغير يكون على مستوى المهبط فقط، كما توجد علاقة عكسية بين فرق الجهد والكثافة الأيونية. بينما توصلنا بأن درجة الحرارة الالكترونية لا تتأثر بتغير الجهد المطبق.

✓ المتأثرين بتغير الضغط هي الكثافة الأيونية و الكثافة الالكترونية (علاقة طردية) بينما لا تتأثر باقي المقادير المتمثلة في درجة الحرارة الالكترونية، الكمون الكهربائي والحقل الكهربائي بتغير الضغط.

✓ درجة الحرارة في وسط البلازما تكون ثابتة وعلى مستوى الحواف (مصعد والمهبط) تكون منخفضة.

و بالرغم من كل ما تطرقنا له في هذا العمل لدراسة بلازما التفريغ الكهربائي وتأثير درجة الحرارة الالكترونية وتغيرها بالنسبة للموضع إلا أن الأفاق تبقى مفتوحة للبحث حيث يمكن:

- إستغلال النتائج النظرية في الدراسة التجريبية لتشخيص بلازما التفريغ الكهربائي (إيجاد المميز تيار-جهد لمسبار لانجمير المستعمل بكثرة في عملية التشخيص).
- دراسة تأثير العامل الزمني على الخصائص الكهربائية لبلازما الأرغون.
- دراسة الخصائص الكهربائية لبلازما الأرغون لثلاثة أبعاد لتوضع الطبقات الرقيقة.
- دراسة الخصائص الكهربائية لبلازما الأرغون في ثلاثة أبعاد لتوضع الطبقات الرقيقة.
- دراسة الخصائص الكهربائية في جهد متناوب.

ملحق : الصيغة الاسية

لدينا عبارة تدفق الالكترونات أو الايونات من الشكل التالي

$$J = sn\mu E - \frac{\partial(nD)}{\partial n} \dots \dots \dots (1)$$

$$J = \frac{s\mu E}{D} (nD) - \frac{\partial(nD)}{\partial n} \dots \dots \dots (2)$$

هذه معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى

$$\frac{\partial(nD)}{\partial z} - \frac{s\mu E}{D} (nD) + J = 0 \dots \dots \dots (3)$$

حلها من الشكل التالي

$$nD = s \frac{D}{\mu E} J + C \exp\left(\frac{s\mu E}{D} z\right) \dots \dots \dots (4)$$

و يمكن كتابته في مواضع التالية

$$n_{j+1}D_{j+1} = s \frac{D_{j+1/2}J_{j+1/2}}{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}} + C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_{j+1}\right) \dots \dots \dots (5)$$

$$n_jD_j = s \frac{D_{j+1/2}J_{j+1/2}}{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}} + C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_j\right) \dots \dots \dots (6)$$

ب طرح المعادلتين (6) و (5) من بعضهم البعض نجد

$$n_{j+1}D_{j+1} - n_jD_j = C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_{j+1}\right) - C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_j\right) \dots \dots \dots (7)$$

$$n_{j+1}D_{j+1} - n_jD_j = C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_j\right) \left[\frac{C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_{j+1}\right)}{C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2}E_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} z_j\right)} - 1 \right] \dots \dots \dots (8)$$

نضع $\Delta z = z_{j+1} - z_j$

ملحق : الصيغة الاسية

$$\frac{n_{j+1}D_{j+1} - n_jD_j}{C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2} E_{j+1/2} \Delta z}{D_{j+1/2}}\right) - 1} = C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2} E_{j+1/2} z_j}{D_{j+1/2}}\right) \dots \dots \dots (9)$$

حيث

$$Z_{j+1/2} = s \frac{\mu_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} E_{j+1/2} \Delta z \dots \dots \dots (10)$$

إذن

$$C \exp\left(s \frac{\mu_{j+1/2} E_{j+1/2} z_j}{D_{j+1/2}}\right) = \frac{n_{j+1}D_{j+1} - n_jD_j}{C \exp Z_{j+1/2} - 1} \dots \dots \dots (11)$$

$$n_jD_j = s \frac{D_{j+1/2} J_{j+1/2}}{\mu_{j+1/2} E_{j+1/2}} + \frac{n_{j+1}D_{j+1} - n_jD_j}{C \exp Z_{j+1/2} - 1} \dots \dots \dots (12)$$

منه نجد عبارة الكثافة

$$J_{j+1/2} = \frac{1}{\Delta z} \left[n_j D_j \exp Z_{j+1/2} - n_{j+1} D_{j+1} \right] \frac{Z_{j+1/2}}{\exp Z_{j+1/2} - 1} \dots \dots \dots (13)$$

$$E_{j+1/2} \Delta z = -(V_{j+1} - V_j) \dots \dots \dots (14)$$

حيث

$$Z_{j+1/2} = -s \frac{\mu_{j+1/2}}{D_{j+1/2}} [V_{j+1} - V_j] \dots \dots \dots (15)$$

$$Z_{j-1/2} = -s \frac{\mu_{j-1/2}}{D_{j-1/2}} [V_j - V_{j-1}] \dots \dots \dots (16)$$

$$\begin{cases} s = -1 ; & \text{للالكترونات} \\ s = 1 & ; \text{للايونات} \end{cases}$$

حيث أن :

ملخص:

يهتم عملنا بحساب الخصائص الكهربائية (الكثافة الإلكترونية والكثافة الأيونية، درجة الحرارة الإلكترونية والكمون الكهربائي) لبلازما الأرجون Ar المستعملة لتوضع طبقات السيليسيوم Si بطريقة الرش المهبطي، حيث يتراوح البعد بين اللبوسين من (3cm إلى 4cm) والضغط يقدر ب (1Torr)، أما درجة حرارة الإلكترونات فتساوي (1eV).
قمنا بتطبيق نموذج المواع لبعده واحد ونظام مستقر، الذي يعتمد على معادلة الاستمرارية للإلكترونات والايونات مكملة بمعادلة بواسون. إعتبرنا الطرف الثاني لمعادلة الاستمرارية متعلق بدرجة الحرارة الإلكترونية مما يستوجب علينا إضافة معادلة الطاقة إذ تمكننا هذه الأخيرة. من حساب تغير الموضعي لدرجة الحرارة الإلكترونية. إعتدنا على الصيغة الآسية لعبارات التدفق (الكثافي، الأيوني والطاقة) وعلى طريقة الحجم المنتهية للحل العددي. تمت برجة المعادلات بلغة الفورترن معتمدين في ذلك الطريقة التكرارية غوص-صيدل لحساب الكمون الكهربائي، الكثافة الأيونية والكثافة الإلكترونية ودرجة الحرارة الإلكترونية.
النتائج التي تحصلنا عليها أبدت توافقا مع نتائج أعمال أخرى، أما عن تأثير الخصائص الماكروسكوبية فتبين لنا أن لها دور كبير في تغيير الخصائص الكهربائية للبلازما.
الكلمات المفتاحية: البلازما، الرش المهبطي، درجة الحرارة الإلكترونية، الخصائص الكهربائية، الصيغة الآسية وطريقة الحجم المنتهية.

Résumé :

Nous nous intéressons dans ce travail au calcul des propriétés électriques (densité électronique, densité ionique, température électronique et potentiel électrique) d'un plasma d'argon utilisé pour la déposition de couches minces de silicium par pulvérisation cathodique. La distance entre électrode est de 3 cm à 4 cm, la pression est de l'ordre de 1 torr et la température électronique est de 1 eV.

Nous avons appliqué le modèle fluide à une dimension en régime stationnaire se basant sur les équations de continuité des électrons et des ions et l'équation de Poisson. Nous avons considéré que le deuxième membre de l'équation de continuité dépend de la température. Il est alors nécessaire de résoudre l'équation d'énergie permettant un calcul spatial de la température électronique. Pour la résolution numérique, nous avons choisi le Schéma Exponentiel des densités électronique, ionique et d'énergie et la Méthode des Volumes Finies. La programmation au langage Fortran 77 et l'utilisation de la méthode itérative de Gauss-Seidel nous ont permis de calculer le potentiel électrique, la densité ionique, la densité électronique et la température électronique.

Les résultats obtenus sont en bon accord avec d'autres résultats cités dans la littérature. Les variations des grandeurs macroscopiques influencent les propriétés électriques.

Mots clés : Plasma, pulvérisation cathodique, température électronique, propriétés électriques, Schéma Exponentiel, Méthode des Volumes Finies.

Summary:

We are interested to calculate electrical properties (electronic density, ionic density, electronic temperature and electrical potential) of argon plasma used to deposit silicon layers by spraying method. Distance between electrodes is about 3cm to 4cm, and pressure is estimated to 1Torr and electronic temperature is 1eV.

We applied the fluid model at one dimension for a stationary system, which it's based on the continuity equation for electrons and ions and Poisson equation. We considered the second part of the continuity equation related to temperature, which requires us to add energy equation. This equation allows resolving local electronic temperature. For the numerical solution we used exponential form to current densities of electronic, ionic and energy and we used Finite Volume Method. Our program, written with Fortran 77 language, has used Gauss-Seidel iterative method to calculate the electrical potential, electronic density, ionic density and electronic temperature.

Results have shown that we have good agreement with published other works. We presented the effect of macroscopic parameters on electrical properties of the plasma.

Key words: Plasma, Sputtering, electronic temperature, electrical properties, Exponential form, Finite Volume Method.